

А.Ф. Горюнов

**МЕТОДЫ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
в примерах и задачах
том II**

Допущено Учебно-методическим объединением вузов
направления подготовки 140300 «Ядерная физика и технологии»
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлению
«Ядерная физика и технологии»



**МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2015**

УДК 517.958(075)

ББК 22.161.1я7

Г 71

Горюнов А. Ф. **Методы математической физики в примерах и задачах.** В 2 т. Т. II. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. — 772 с. — ISBN 978-5-9221-1650-3.

Учебное пособие ориентировано на специальности «Прикладная математика и информатика», «Физика», «Механика», «Физика атомного ядра и частиц» и др. Пособие представляет собой сборник задач и примеров по уравнениям математической физики. Темы первого тома: построение математических моделей различных физических процессов, решение задач методом Фурье и методом интегральных преобразований, интегральные уравнения. При решении задач используется аппарат обобщенных функций.

Пособие адресовано студентам, изучающим математическую и теоретическую физику; некоторые разделы могут быть полезны аспирантам, инженерно-техническим и научным работникам, интересующимся данной областью знаний.

Допущено Учебно-методическим объединением вузов направления подготовки 140300 «Ядерная физика и технологии» в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Ядерная физика и технологии».

Рецензент:

д.ф.-м.н., проф. Д. Б. Белостоцкий, Московский государственный строительный университет (МГСУ)

ISBN 978-5-9221-1650-3 (Т. II)

ISBN 978-5-9221-1642-8

© ФИЗМАТЛИТ, 2015

© А. Ф. Горюнов, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму тому	5
Обозначения	7
 Глава 5. Метод потенциалов	9
Литература к главе 5.	15
5.1. Вычисление потенциалов	15
5.2. Решение задач методом потенциалов	59
5.3. Ответы	84
 Глава 6. Метод функции Грина	146
Литература к главе 6.	147
6.1. Задачи для волнового уравнения	147
6.2. Задачи для уравнения теплопроводности	159
6.3. Задачи для уравнений Пуассона и Гельмгольца	181
6.4. Функция Грина одномерной краевой задачи	202
6.5. Ответы	217
 Глава 7. Метод конформных отображений	255
Литература к главе 7.	256
7.1. Комплексный потенциал; решение задачи Дирихле с кусочно-постоянными граничными условиями	257
7.2. Комплексный потенциал точечного источника	282
7.3. Комплексный потенциал точечного вихря	343
7.4. Ответы	359
 Глава 8. Метод характеристик	404
Литература к главе 8.	405

8.1. Линейные гиперболические уравнения с частными производными второго порядка	405
8.2. Квазилинейные уравнения с частными производными	460
8.3. Гиперболические системы квазилинейных уравнений	470
8.4. Ответы	489
Глава 9. Методы решения нелинейных уравнений.	537
Литература к главе 9.	538
9.1. Метод обратной задачи рассеяния	538
9.2. Метод преобразований Бэклунда	564
9.3. Метод Хироты	571
9.4. Другие методы построения точных решений	580
9.5. Ответы	604
Глава 10. Обобщенные функции.	654
10.1. Интеграл Лебега	655
10.2. Обобщенные функции в $\mathbb{R}^n$	691
10.3. Обобщенные функции в области	715
10.4. Ответы	729
Основные формулы	749
Литература	765

Предисловие ко второму тому

Второй том учебного пособия конструктивно устроен так же, как и предыдущий, является его непосредственным продолжением и содержит шесть глав.

Пятая глава знакомит с методом потенциалов. С физической точки зрения имеются в виду потенциалы электростатических (гравитационных) полей пространственно ограниченных систем зарядов. Задачи этой главы разбиты на две части. Сначала проводится вычисление и изучение свойств потенциалов различных систем зарядов (объемные потенциалы, потенциалы простого и двойного слоя), затем потенциалы применяются для решения краевых задач. Суть метода потенциалов заключается в сведении краевых задач к интегральному уравнению. В главе используются системы криволинейных ортогональных координат. Вычисление плотности заряда на проводниках сводится посредством применения потенциалов к решению интегральных уравнений.

На задачах *шестой главы* демонстрируется метод функции Грина. Здесь собраны задачи для уравнений гиперболического, параболического, эллиптического типов, а также одномерные краевые задачи. Идея применения этого метода заключается в замене задачи для дифференциального уравнения с источниками задачей для того же уравнения, но с одним точечным (по координате и времени) источником. В силу линейности суперпозиция действий точечных источников определяет решение исходной задачи.

Эффективным способом изучения плоских стационарных полей является метод конформных отображений. Он применим к задачам электро- и магнитостатики, гидродинамики идеальной несжимаемой жидкости, теплопроводности, фильтрации и др. Метод основан на построении аналитической функции — комплексного потенциала соответствующего векторного поля. Упражнения на эту тему помещены в *седьмой главе*.

Для решения задач *восьмой главы* применяется метод характеристик. В сферу его применимости входят задачи Коши и Гурса для линейных дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка гиперболического типа, задачи

для гиперболических систем линейных и квазилинейных дифференциальных уравнений. На ряде задач демонстрируется метод Римана. Предлагаются задачи газо- и гидродинамики, в которых исследуются ударные волны.

В последние десятилетия происходит интенсивное развитие теории нелинейных дифференциальных уравнений с частными производными. Практический интерес представляют собой частные решения ряда уравнений, называемые солитонами. В *девятой главе* рассмотрены методы построения решения задачи Коши, а также солитонных решений нелинейных дифференциальных уравнений. Приведены некоторые методы построения точных решений нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных.

При решении многих задач используется аппарат обобщенных функций, которым отведена *десятая глава*. Этот раздел математики не является частью математической физики, поэтому данную главу следует считать дополнением, сохраняющим (в какой-то мере) автономность пособия. Являясь дополнительной, глава не носит, тем не менее, справочного характера: основные свойства обобщенных функций излагаются в форме примеров и задач. Для чтения этой главы желательно владеть элементами функционального анализа. В крайнем случае можно ограничиться лишь знакомством с δ -функцией (именно она, главным образом, используется при решении задач), основываясь на ее физическом определении.

Значительная часть задач данного сборника доступна студентам, имеющим физико-математическую подготовку по учебным программам вузов РФ. Для решения ряда задач требуется более высокий уровень знаний физики и математики: здесь автор руководствовался программой подготовки специалистов, которую реализует НИЯУ МИФИ.

Пособие адресовано студентам, изучающим математическую физику, а также инженерам, желающим повысить квалификацию в этой области науки; некоторые главы могут быть полезны аспирантам.

Обозначения

$B(x, r)$ — шар, радиус которого r , центр — в точке $x \in \mathbb{R}^n$

$B_r = B(0, r)$

$\mathbf{e}_l = \mathbf{1}/l$

$\mathbb{C}$ — множество комплексных чисел

$E_i(x) = \int_{-x}^x \frac{e^\xi}{\xi} d\xi$

$\text{erf}(x)$ — интеграл вероятности

$\text{Erf}(x) = 1 - \text{erf}(x)$

$F(\alpha, \beta, \gamma, z)$ — гипергеометрическая функция

$H_n(x)$ — полином Чебышева–Эрмита

$H_\nu^{(1)}(z)$ — функция Ганкеля 1-го рода порядка ν

$H_\nu^{(2)}(z)$ — функция Ганкеля 2-го рода порядка ν

$I_\nu(z)$ — модифицированная функция Бесселя 1-рода порядка ν

$J_\nu(z)$ — функция Бесселя 1-рода порядка ν

$K_\nu(z)$ — модифицированная функция Бесселя 2-рода порядка ν (функция Макдональда)

$L_n^\alpha(x)$ — полином Чебышева–Лагерра

$\mathbb{N}_0$ — множество целых неотрицательных чисел

$\mathbb{N}$ — множество натуральных чисел

$P_n(x)$ — полином Лежандра

$P_n^m(x)$ — присоединенная функция Лежандра

$P_n^{(\alpha, \beta)}(x)$ — полином Якоби

$Q_n(x)$ — функция Лежандра 2-го ранга

$\mathbb{R}^n$ — n -мерное евклидово пространство

$\mathbb{R} = \mathbb{R}^1$

$S(x, r) = \partial B(x, r)$

$S_r = S(0, r)$

$|S_r|$ — площадь сферы S_r

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ — точка пространства $\mathbb{R}^n$

$Y_\nu(z)$ — функция Бесселя 2-рода порядка ν (функция Неймана)

$Y_n^m(\theta, \varphi)$ — фундаментальная сферическая функция

$\mathbb{Z}$ — множество целых чисел

$B(z, \zeta)$ — бета-функция Эйлера

$\Gamma(z)$ — гамма-функция Эйлера

$\gamma(z, a)$ — неполная гамма-функция

$$\eta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ 1, & 0 < x \end{cases}$$

$\delta(x)$ — дельта-функция Дирака

$$\delta_{mn} = \begin{cases} 1, & m = n, \\ 0, & m \neq n, \end{cases} \quad m, n \in \mathbb{N}$$

$\Phi(\alpha, \gamma, z)$ — вырожденная гипергеометрическая функция

Ω — область в $\mathbb{R}^n$

$\overline{\Omega}$ — замыкание Ω

$$\partial\Omega = \overline{\Omega}/\Omega$$

A/B — дополнение множества B до множества A

A^T — транспонированная матрица A

$[a]$ — целая часть вещественного числа a

$$(a, b) = \{x: a < x < b, \in \mathbb{R}\}$$

$$[a, b] = \{x: a \leq x \leq b, \in \mathbb{R}\}$$

$\overline{mn}$, где $m < n$, — множество целых чисел $\{m, m+1, m+2, \dots, n\}$

$\varphi_k(x) \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{E} \varphi(x)$ — равномерная сходимость на множестве E

Σ_a — макроскопическое сечение поглощения нейтронов

Σ_f — макроскопическое сечение деления нейтронов

Σ_s — макроскопическое сечение рассеяния нейтронов

Глава 5

МЕТОД ПОТЕНЦИАЛОВ

Объемным потенциалом в пространстве $\mathbb{R}^3$ называется интеграл

$$u(M) = \int_{\Omega} \frac{\rho(P)}{r_{MP}} d\mathbf{r}$$

по области Ω , в котором $\rho(P)$ — плотность объемного потенциала — заданная функция точки P , r_{MP} — расстояние между точками M и P . Потенциалами простого и двойного слоя в $\mathbb{R}^3$ называются, соответственно, интегралы

$$v(M) = \int_S \frac{\sigma(P)}{r_{MP}} ds, \quad w(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}^2} ds.$$

Здесь S — двусторонняя кусочно-гладкая поверхность, $\sigma(P)$ — плотность потенциала простого слоя, $\nu(P)$ (плотность потенциала двойного слоя) — функции, определенные на S , φ_{PM} — угол между внешней нормалью к S в точке P и вектором $\mathbf{r}_{PM}$ с началом в точке P .

Поверхность $S \subset \mathbb{R}^n$ принадлежит классу C^m , $m \in \mathbb{N}$, если у каждой точки $M_0(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) \in S$ существует окрестность B_{M_0} , в которой S определяется уравнением $F_{M_0}(x) = 0$; при этом $F_{M_0}(x_0) = 0$, $\nabla F_{M_0}(x_0) \neq 0$, функция $F_{M_0}(x)$ непрерывна вместе с частными производными до порядка m включительно. При условии $\nabla F_{M_0}(x_0) \neq 0$ уравнение $F_{M_0}(x) = 0$ определяет однозначную функцию одной из переменных x_k в зависимости от $n - 1$ остальных переменных. Например, если $\frac{\partial F_{M_0}}{\partial x_n} \Big|_{x=x_0} \neq 0$, то существует однозначная функция $x_n = f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$, которая при указанных условиях принадлежит классу $C^m(B_{M_0})$. Поверхность $S \subset \mathbb{R}^n$ называется кусочно-гладкой, если она является объединением конечного числа поверхностей класса C^1 .

Поверхностью Ляпунова называется ограниченная замкнутая поверхность S , удовлетворяющая условиям:

- 1) в каждой точке $M \in S$ существует касательная плоскость;
- 2) существует такое число $d > 0$, что для любой точки $M \in S$ пересечение $S \cap B(M, d)$ — связное множество и любая прямая, параллельная $\mathbf{n}_M$, пересекает его не более, чем в одной точке;
- 3) нормаль к S как функция точки $M \in S$ непрерывна по Гельдеру, т.е. существуют числа A и $\lambda \in (0; 1]$ такие, что для любых точек $M, P \in S$ выполняется неравенство $|\mathbf{n}_M - \mathbf{n}_P| \leq r_{MP}^\lambda$. (см. задачи 5.27, 5.28).

Введенные выше потенциалы представляют собой несобственные интегралы, зависящие от параметра. При некоторых ограничениях на области интегрирования и плотности $\rho(M)$, $\sigma(M)$, $\nu(M)$ потенциалы обладают следующими свойствами.

Свойства объемного потенциала, плотность $\rho(M)$ которого есть ограниченная интегрируемая функция в конечной области Ω , равная нулю вне Ω , будут следующими.

1. $u(M) \in C^1$, т.е. объемный потенциал непрерывно дифференцируемая функция в $\mathbb{R}^3$.
2. Вне $\bar{\Omega}$ функция $u(M) \in C^\infty$ и удовлетворяет уравнению Лапласа $\Delta u = 0$.
3. Если точка O фиксирована, то

$$u(M) = \frac{1}{r_{MO}} \int_{\Omega} \rho(P) d\mathbf{x} + O\left(\frac{1}{r_{MO}^2}\right), \quad M \rightarrow \infty. \quad (5.1)$$

4. Если $\rho(M) \in C^1(\bar{\Omega})$, то $u(M)$ имеет в области Ω непрерывные вторые производные и удовлетворяет уравнению Пуассона $\Delta u = -4\pi \rho(M)$, $M \in \Omega$.

Свойства потенциала простого слоя, распределенного на поверхности S Ляпунова с плотностью $\sigma(M)$, где $\sigma(M)$ — ограниченная интегрируемая функция, будут такими.

1. $v(M) \in C$, т.е. потенциал простого слоя непрерывная функция всюду в $\mathbb{R}^3$.
2. Вне поверхности S функция $v(M) \in C^\infty$ и удовлетворяет уравнению Лапласа $\Delta v = 0$.
3. Если точка O фиксирована, то

$$v(M) = \frac{1}{r_{MO}} \int_S \sigma(P) dS + O\left(\frac{1}{r_{MO}^2}\right), \quad M \rightarrow \infty. \quad (5.2)$$

4. Пусть $\sigma(M) \in C(S)$. Какую бы точку $M \in S$ ни взять, внешняя нормаль к S в которой $\mathbf{n}_M$, существует интеграл

от производной подынтегральной функции в направлении $\mathbf{n}_M$

$$\left(\frac{\partial v(M)}{\partial n}\right)\Big|_0 = \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP}}{r_{MP}^2} ds, \quad M \in S,$$

где φ_{MP} — угол между нормалью $\mathbf{n}_M$ и вектором $\mathbf{r}_{MP}$ с началом в точке M (рис. 5.1, а). Этот интеграл называется прямым значением нормальной производной потенциала простого слоя на поверхности S и является непрерывной функцией на S . Пусть далее точки M' и M'' принадлежат прямой, содержащей нормаль $\mathbf{n}_M$; при этом отрезок $M'M \in \overline{\Omega}$, а отрезок $MM'' \in \mathbb{R}^3 \setminus \Omega$ (рис. 5.1, б). Существуют предельные значения нормальных про-

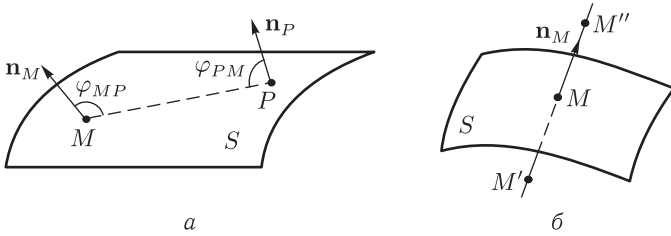


Рис. 5.1

изводных на S извне и изнутри

$$\left(\frac{\partial v(M)}{\partial n}\right)\Big|_+ = \lim_{\substack{M' \rightarrow M \\ M' \in \Omega}} \frac{\partial v(M')}{\partial n}, \quad \left(\frac{\partial v(M)}{\partial n}\right)\Big|_- = \lim_{\substack{M'' \rightarrow M \\ M'' \in \mathbb{R}^3 \setminus \overline{\Omega}}} \frac{\partial v(M'')}{\partial n},$$

которые определяются формулами

$$\left(\frac{\partial v(M)}{\partial n}\right)\Big|_+ = \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP}}{r_{MP}^2} ds - 2\pi\sigma(M), \quad M \in S, \quad (5.3)$$

$$\left(\frac{\partial v(M)}{\partial n}\right)\Big|_- = \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP}}{r_{MP}^2} ds + 2\pi\sigma(M), \quad M \in S. \quad (5.4)$$

Указанные свойства потенциала простого слоя сохраняются для поверхности S , являющейся частью поверхности Ляпунова.

Свойства потенциала двойного слоя, распределенного на поверхности S Ляпунова с плотностью $\nu(M)$, где $\nu(M)$ — ограниченная интегрируемая функция, будут следующими.

1. $w(M)$ определен всюду, т. е. несобственный интеграл сходится в любой точке пространства $\mathbb{R}^3$.

2. Вне поверхности S функция $w(M) \in C^\infty$ и удовлетворяет уравнению Лапласа $\Delta v = 0$.

3. Если точка O фиксирована, то

$$w(M) = O\left(\frac{1}{r_{MO}^2}\right), \quad M \rightarrow \infty. \quad (5.5)$$

4. Если $\nu(M) \in C(S)$, то интеграл

$$\int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}^2} ds, \quad M \in S,$$

называемый прямым значением потенциала двойного слоя на поверхности S , является непрерывной функцией на S . При этом: какова бы ни была точка $M \in S$, существуют предельные значения

$$w_+ = \lim_{\substack{M'' \rightarrow M \\ M'' \in \mathbb{R}^3 \setminus \Omega}} w(M''), \quad w_-(M) = \lim_{\substack{M' \rightarrow M \\ M' \in \Omega}} w(M'),$$

связанные с прямым значением потенциала на S формулами

$$w_+(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}^2} ds + 2\pi\nu(M), \quad M \in S, \quad (5.6)$$

$$w_-(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}^2} ds - 2\pi\nu(M), \quad M \in S. \quad (5.7)$$

Физический смысл потенциалов: $u(M)$ представляет собой электростатический потенциал зарядов, распределенных по области Ω с плотностью $\rho(P)$; $v(M)$ — потенциал зарядов, распределенных на поверхности S с плотностью $\sigma(P)$; $w(M)$ является потенциалом поля диполей, распределенных на поверхности S и направленных по нормали к поверхности, $\nu(P)$ — плотность дипольного момента (кулоновский потенциал). Интегралы $u(M)$ и $v(M)$ можно также трактовать как потенциалы поля тяготения масс, распределенных в пространстве с заданной плотностью (ньютонів потенциал).

Аналогично определяются потенциалы, называемые логарифмическими, в пространстве $\mathbb{R}^2$. Логарифмическим потенциалом площади называется интеграл

$$u(M) = \int_{\Omega} \rho(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} d\mathbf{r}$$

по области $\Omega \in \mathbb{R}^2$. Логарифмическими потенциалами простого и двойного слоя называются, соответственно, интегралы

$$v(M) = \int_S \sigma(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} ds, \quad w(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}} ds.$$

где S — кусочно-гладкая линия.

Свойства логарифмического потенциала площади, плотность $\rho(M)$ которого — ограниченная интегрируемая функция в конечной области Ω , равная нулю вне Ω , — следующие.

1. $u(M) \in C^1$, т. е. потенциал — непрерывно дифференцируемая функция в $\mathbb{R}^2$.

2. Вне $\bar{\Omega}$ функция $u(M) \in C^\infty$ и удовлетворяет уравнению Лапласа $\Delta u = 0$.

3. Если точка O фиксирована, то

$$u(M) = \ln \frac{1}{r_{MO}} \int_S \rho(P) d\mathbf{r} + O\left(\frac{1}{r_{MO}}\right), \quad M \rightarrow \infty. \quad (5.8)$$

4. Если $\rho(M) \in C^1(\bar{\Omega})$, то $u(M)$ имеет в области Ω непрерывные вторые производные и удовлетворяет уравнению Пуассона $\Delta u = -2\pi \rho(M)$, $M \in \Omega$.

Свойства потенциала простого слоя, распределенного на линии S Ляпунова с плотностью $\sigma(M)$, где $\sigma(M)$ — ограниченная интегрируемая функция, — следующие.

1. $v(M) \in C$, т. е. потенциал простого слоя есть непрерывная функция всюду в $\mathbb{R}^2$.

2. Вне поверхности S функция $v(M) \in C^\infty$ и удовлетворяет уравнению Лапласа $\Delta v = 0$.

3. Если точка O фиксирована, то

$$v(M) = \ln \frac{1}{r_{MO}} \int_S \sigma(P) dS + O\left(\frac{1}{r_{MO}}\right), \quad M \rightarrow \infty. \quad (5.9)$$

4. Если $\sigma(M) \in C(S)$, то существует интеграл от производной подынтегральной функции в направлении внешней $\mathbf{n}_M$ в этой точке

$$\left(\frac{\partial v(M)}{\partial n}\right)\Big|_0 = \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP}}{r_{MP}} ds$$

и является непрерывной функцией на S . Существуют также предельные значения нормальных производных на S извне

и изнутри, определяемые формулами:

$$\left(\frac{\partial v(M)}{\partial n}\right)\Big|_+ = \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP}}{r_{MP}} ds - \pi \sigma(M), \quad M \in S, \quad (5.10)$$

$$\left(\frac{\partial v(M)}{\partial n}\right)\Big|_- = \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP}}{r_{MP}} ds + \pi \sigma(M), \quad M \in S. \quad (5.11)$$

Свойства логарифмического потенциала двойного слоя, распределенного на линии S Ляпунова с плотностью $\nu(M)$, где $\nu(M)$ — ограниченная интегрируемая функция, будут такими.

1. $w(M)$ определен всюду, т. е. несобственный интеграл сходится в любой точке пространства $\mathbb{R}^2$.

2. Вне линии S функция $w(M) \in C^\infty$ и удовлетворяет уравнению Лапласа $\Delta v = 0$.

3. Если точка O фиксирована, то

$$w(M) = \mathcal{O}\left(\frac{1}{r_{M0}}\right), \quad M \rightarrow \infty. \quad (5.12)$$

4. Если $\nu(M) \in C(S)$, то интеграл

$$\int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}} ds, \quad M \in S,$$

называемый прямым значением потенциала двойного слоя на S , является непрерывной функцией на S . При этом существуют предельные значения

$$w_+ = \lim_{\substack{M'' \rightarrow M \\ M'' \in \mathbb{R}^2 \setminus \Omega}} w(M''), \quad w_-(M) = \lim_{\substack{M' \rightarrow M \\ M' \in \Omega}} w(M'),$$

связанные с прямым значением потенциала на S формулами

$$w_+(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}} ds + \pi \nu(M), \quad M \in S, \quad (5.13)$$

$$w_-(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}} ds - \pi \nu(M), \quad M \in S. \quad (5.14)$$

Логарифмические потенциалы с множителем 2 представляют собой потенциалы электростатического поля зарядов, заполняющих бесконечный цилиндр с осью Oz , поперечным сечением которого является область Ω , либо зарядов или диполей, расположенных на поверхности цилиндра, с плотностями $\rho(P)$, $\sigma(P)$, $\nu(P)$ соответственно, не зависящими от z ; при этом аддитивная постоянная равна нулю.

Потенциалы применяются для решения краевых задач математической физики.

Литература к главе 5

1. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. — М.: МГУ, Наука, 2004.
2. Сборник задач по уравнениям математической физики / под ред. В.С. Владимирова — 4-е изд., стереотип. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
3. Муратов Р.З. Потенциалы эллипсоида. — М.: Атомиздат, 1976.

5.1. Вычисление потенциалов

Пример 5.1. Найти потенциал электрического поля зарядов, распределенных в ограниченной области $\Omega \in \mathbb{R}^3$ с плотностью $\rho(M)$ (объемный потенциал), и вычислить потенциал равномерно заряженного шара, радиус которого r_0 , плотность зарядов ρ_0 .

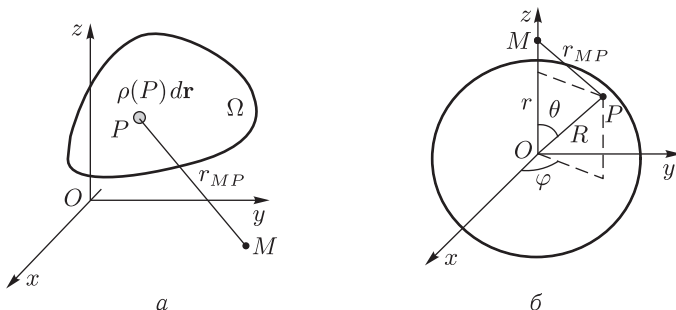


Рис. 5.2

Потенциал системы зарядов равен сумме потенциалов каждого заряда, а потенциал точечного заряда q на расстоянии r от него равен q/r . Следовательно, потенциал в точке M , созданный заряженной областью Ω , равен сумме потенциалов «точечных» зарядов $\rho(P)d\mathbf{r}$, т. е. (рис. 5.2, а)

$$u(M) = \int_{\Omega} \frac{\rho(P)}{r_{MP}} d\mathbf{r}.$$

Вычислим потенциал шара.

1-й способ. Пусть M — произвольная точка, расстояние которой до центра шара равно r . Ввиду сферической симметрии электрического поля значение потенциала в точке M зависит лишь от расстояния этой точки до центра шара, поэтому естественно выбрать сферическую систему координат с началом в центре шара, ось Oz которой проходит через точку M (рис. 5.2, б). Расстояние между точками M и P в координатах (R, θ, φ) равно (по теореме косинусов) $r_{MP} = \sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos \theta}$; по определению объемного потенциала

$$\begin{aligned} u(M) &= \int_{\Omega} \frac{\rho(P)}{r_{MP}} d\mathbf{r} = \rho_0 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r_0} R^2 dR \int_0^{\pi} \frac{\sin \theta d\theta}{\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos \theta}} = \\ &= 2\pi\rho_0 \int_0^{r_0} R^2 dR \left. \frac{\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos \theta}}{Rr} \right|_0^{\pi} = \\ &= \frac{2\pi\rho_0}{r} \int_0^{r_0} R(R+r - |R-r|) dR. \end{aligned}$$

Если $r \geq r_0$, то

$$u(r) = \frac{2\pi\rho_0}{r} \int_0^{r_0} 2R^2 dR = \frac{4\pi r_0^3 \rho_0}{3} \frac{1}{r};$$

если $r < r_0$, то

$$u(r) = \frac{2\pi\rho_0}{r} \left[\int_0^r 2R^2 dR + \int_r^{r_0} 2rR dR \right] = 2\pi\rho_0 \left(r_0^2 - \frac{r^2}{3} \right).$$

2-й способ. Свойства объемного потенциала позволяют трактовать его как решение краевой задачи

$$\begin{aligned} \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} r^2 \frac{du}{dr} &= -4\pi\rho_0, & \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} r^2 \frac{du}{dr} &= 0, \\ 0 < r < r_0, & & r_0 < r, \\ |u(0)| < \infty, & & u(\infty) = 0, \\ u(r_0 - 0) &= u(r_0 + 0), \\ u_r(r_0 - 0) &= u_r(r_0 + 0). \end{aligned}$$

Общее решение системы

$$u(r) = \begin{cases} -\frac{2\pi\rho_0 r^2}{3} + \frac{C_1}{r} + C_2, & r < r_0, \\ \frac{C_3}{r} + C_4, & r_0 < r, \end{cases}$$

удовлетворяющее условиям при $r = 0$ и $r = \infty$, принимает форму:

$$u(r) = \begin{cases} -\frac{2\pi\rho_0 r^2}{3} + C_2, & r < r_0, \\ \frac{C_3}{r}, & r > r_0. \end{cases}$$

Чтобы найти константы C_1 и C_2 , достаточно воспользоваться непрерывностью $u(r)$ и $u_r(r)$ при $r = r_0$:

$$\begin{cases} -\frac{2\pi\rho_0 r_0^2}{3} + C_2 = \frac{C_3}{r_0}, \\ -\frac{4\pi r_0}{3} = -\frac{C_3}{r_0^2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} C_3 = \frac{4\pi\rho_0 r_0^3}{3}, \\ C_2 = 2\pi\rho_0 r_0^2. \end{cases}$$

Следует отметить, что константу C_3 можно определить непосредственно с помощью свойства (5.1).

З а м е ч а н и е. Если $r > r_0$, то $u(r) = \frac{Q_0}{r}$, где $Q_0 = \frac{4\pi\rho_0 r_0^3}{3}$ есть полный заряд шара. Этот результат известен: потенциал равномерно заряженного шара вне шара равен потенциалу заряда, сосредоточенного в центре шара.

5.1. Плотность заряда шара, радиус которого r_0 , — сферически симметричная функция $\rho(r)$. Показать, что потенциал шара

$$u(r) = \frac{4\pi}{r} \cdot \begin{cases} \int_0^r \rho(R) R^2 dR + r \int_r^{r_0} \rho(R) R dR, & r < r_0, \\ \int_0^{r_0} \rho(R) R^2 dR, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

5.2. Найти потенциал электростатического поля заряженного шара, радиус которого r_0 , а плотность заряда — сферически

симметричная функция, равная:

$$1) \rho_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^\alpha; \quad 2) \frac{\rho_0 r_0}{r_0 + \alpha r}; \quad 3) \frac{\rho_0 r_0^2}{r_0^2 + \alpha^2 r^2}; \quad 4) \frac{\rho_0 r_0 r}{r_0^2 + \alpha^2 r^2};$$

$$5) \frac{\rho_0 r_0 \sqrt{r_0}}{\sqrt{r} (r_0 + \alpha r)}; \quad \alpha > 0.$$

5.3. Плотность объемного потенциала шара, радиус которого r_0 , — сферически симметричная функция, равная:

$$1) \rho_0 e^{-\frac{\alpha r}{r_0}}; \quad 2) \rho_0 \operatorname{sh} \frac{\alpha r}{r_0}; \quad 3) \rho_0 e^{-(\frac{\alpha r}{r_0})^2}; \quad 4) \rho_0 \frac{r_0}{r} \ln \left(1 + \frac{\alpha r}{r_0} \right);$$

$$5) \rho_0 \operatorname{erf} \left(\frac{\alpha r}{r_0} \right); \quad 6) \rho_0 \frac{r_0}{r} \operatorname{erf} \left(\frac{\alpha r}{r_0} \right); \quad 7) \rho_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^\beta e^{-\frac{\alpha r}{r_0}}; \quad \alpha > 0.$$

Вычислить объемный потенциал шара.

5.4. В шаре, радиус которого r_0 , распределен заряд с плотностью:

$$1) \rho_0 \cos \frac{\alpha r}{r_0}; \quad 2) \rho_0 \frac{r_0}{r} \sin \frac{\alpha r}{r_0}; \quad 3) \rho_0 \frac{r_0^2}{r^2} \left(\frac{\alpha r}{r_0} - \sin \frac{\alpha r}{r_0} \right);$$

$$4) \rho_0 \frac{r_0^2}{r^2} \left(1 - \cos \frac{\alpha r}{r_0} \right); \quad 5) \rho_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{3}{2}} \sin \frac{\alpha r}{r_0}; \quad \alpha > 0,$$

а $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Вычислить объемный потенциал шара.

5.5. В шаре, радиус которого r_0 , распределен заряд со сферически симметричной плотностью:

$$1) \rho_0 \left(k - \frac{r}{r_0} \right); \quad 2) \rho_0 \cos \frac{kr}{r_0}; \quad 3) \rho_0 \frac{r_0}{r} \sin \frac{kr}{r_0}; \quad 4) \rho_0 \sin \frac{kr}{r_0}; \quad k \in \mathbb{R};$$

$$5) \rho_0 \ln \left(1 + \frac{kr}{r_0} \right), \quad k > -1.$$

Существуют ли значения k такие, что электрическое поле вне шара равно нулю? Каков потенциал шара в этом случае?

5.6. Найти потенциал сферического слоя ($r_1 < r < r_2$), плотность заряда которого $\rho_0 = \text{const}$.

5.7. В сферическом слое ($r_0 < r < r_1$) распределен заряд с плотностью $\rho(r) = \rho_0 \left(9 - \frac{14r_0}{r} \right)$, где $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. При каком значении r_1 электрическое поле вне слоя равно нулю? Каков при этом будет потенциал шара?

5.8. Два равномерно заряженных шара, радиусы которых r_0 , могут проникать друг в друга; при этом плотность заряда каждого шара не меняется. Найти силу взаимодействия шаров, если их заряды Q_1 и Q_2 .

5.9. Показать, что объемный потенциал, плотность которого ограниченная интегрируемая функция, а область Ω ограничена, вне $\bar{\Omega}$ принадлежит классу C^∞ и удовлетворяет уравнению Лапласа.

5.10. Получить асимптотическое представление (5.1) объемного потенциала.

5.11. Найти объемный потенциал шара, радиус которого r_0 , если плотность ρ равна:

$$\begin{aligned} 1) \rho_0 \cos \theta; & \quad 2) \rho_0 \frac{r}{r_0} \sin \theta \cos \varphi; \\ 3) \rho_0 \frac{r}{r_0} \sin^2 \theta \cos \theta \sin 2\varphi; & \quad 4) \rho_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^4 \sin^2 2\theta \cos 2\varphi. \end{aligned}$$

5.12. Найти ньютонов потенциал шара, радиус которого r_0 , а плотность массы $\rho(x, y, z)$ равна: 1) $\rho_0 \frac{z}{r_0}$; 2) $\rho_0 \frac{z^2}{r_0^2}$.

Пример 5.2. Вычислить потенциал на оси равномерно заряженного диска, радиус которого r_0 , толщина h , плотность заряда ρ_0 . В цилиндрической системе координат, осью Oz которой является ось диска, а начало расположено в центре одного из оснований (рис. 5.3), боковая поверхность определяется уравнениями $r = r_0$, $0 \leq z \leq h$, а расстояние между точкой P оси Oz с аппликатой z_0 и точкой $M(r, z, \varphi)$ внутри диска равно $r_{MP} = \sqrt{r^2 + (z - z_0)^2}$. По определению объемного потенциала

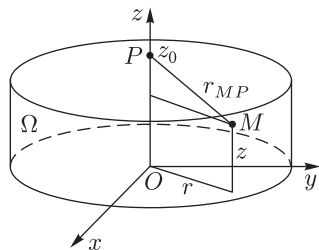


Рис. 5.3

$$\begin{aligned} u(z_0) &= \int_{\Omega} \frac{\rho(P)}{r_{MP}} d\mathbf{r} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^h dz \int_0^{r_0} \frac{r dr}{\sqrt{r^2 + (z - z_0)^2}} = \\ &= 2\pi \rho_0 \int_0^h \sqrt{r^2 + (z - z_0)^2} dz \Big|_0^{r_0} = 2\pi \rho_0 \int_0^h \left(\sqrt{r_0^2 + (z - z_0)^2} - |z - z_0| \right) dz. \end{aligned}$$

Замена $z - z_0 = t$ преобразует полученное выражение к виду

$$u(z_0) = 2\pi \rho_0 \left(\int_{-z_0}^{h-z_0} \sqrt{t^2 + r_0^2} dt - \int_{-z_0}^{h-z_0} |t| dt \right).$$

Для вычисления первого интеграла применимо интегрирование по частям:

$$I = \int \sqrt{t^2 + r_0^2} dt = t\sqrt{t^2 + r_0^2} - \int \frac{t^2 dt}{\sqrt{t^2 + r_0^2}} = t\sqrt{t^2 + r_0^2} - \int \frac{(t^2 + r_0^2 - r_0^2) dt}{\sqrt{t^2 + r_0^2}} = t\sqrt{t^2 + r_0^2} - \int \sqrt{t^2 + r_0^2} dt + r_0^2 \int \frac{dt}{\sqrt{t^2 + r_0^2}}.$$

Справа содержится интеграл I и табличный интеграл, так что

$$I = \frac{1}{2} \left[t\sqrt{t^2 + r_0^2} + r_0^2 \ln(t + \sqrt{t^2 + r_0^2}) \right] + C.$$

Второй интеграл

$$\int_{-z_0}^{h-z_0} |t| dt = \frac{t|t|}{2} \Big|_{-z_0}^{h-z_0} = \frac{(h-z_0)|h-z_0|}{2} + \frac{z_0|z_0|}{2}.$$

Окончательно (можно заменить z_0 на z)

$$u(z) = \pi \rho_0 \left[(h-z)\sqrt{r_0^2 + (h-z)^2} + z\sqrt{r_0^2 + z^2} + r_0^2 \ln \left| \frac{\sqrt{r_0^2 + (h-z)^2} + h-z}{\sqrt{r_0^2 + z^2} - z} \right| + (z-h)|z-h| - z|z| \right].$$

5.13. Найти потенциал на оси Oz сферического слоя, радиус которого r_0 , высота h , плотность заряда ρ_0 (рис. 5.4, а).

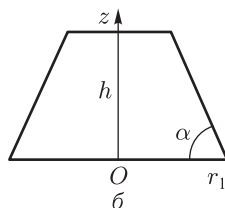
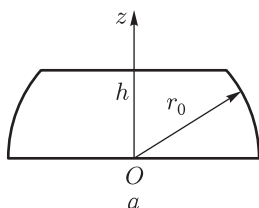


Рис. 5.4

5.14. Найти потенциал на оси Oz равномерно заряженного усеченного конуса, радиус нижнего основания которого r_1 , высота h , угол при основании α , плотность заряда ρ_0 (рис. 5.4, б)

5.15. Найти объемный потенциал на оси Oz , обусловленный зарядом, распределенным по области Ω с постоянной плотностью ρ_0 :

- 1) $\Omega = \{x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 < r_0^2, z > 0\}$;
- 2) $\Omega = \{x, y, z: x^2 + y^2 + (z + h)^2 < r_0^2, 0 < h < r_0\}$;
- 3) $\Omega = \{r, \theta, \varphi: 0 < r < r_0, 0 < \theta < \alpha \leq \pi, 0 \leq \varphi < \pi\}$;
- 4) $\Omega = \{x, y, z: x^2 + y^2 < r_0^2, |z| < h\}$;
- 5) $\Omega = \{x, y, z: x^2 + y^2 < z^2 \operatorname{tg} \alpha, 0 < z < h, 0 < \alpha < \frac{\pi}{2}\}$;
- 7) $\Omega = \{x, y, z: x^2 + y^2 + a^2 < z^2\}$;
- 8) $\Omega = \left\{x, y, z: \frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} < 1, a < b\right\}$;
- 9) $\Omega = \left\{x, y, z: \frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} < 1, a > b\right\}$.

5.16. Найти потенциал равномерно заряженного сферического слоя ($r_1 < r < r_2$), объемная плотность заряда которого ρ_0 .

5.17. Определить потенциал полушара ($x^2 + y^2 + z^2 < r_0^2, z > 0$) на оси Oz ; объемная плотность заряда постоянна и равна ρ_0 .

5.18. Определить потенциал заряженного шара ($x^2 + y^2 + z^2 < r_0^2$) в точках оси Oz , если объемная плотность заряда пропорциональна расстоянию до плоскости xOy и равна ρ_0 на расстоянии r_0 от этой плоскости. Чему равен потенциал в центре шара?

5.19. Найти потенциал полушара ($x^2 + y^2 + z^2 < r_0^2, z > 0$) в точках оси Oz , если объемная плотность заряда $\rho(x, y, z) = \rho_0 \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$. Чему равен потенциал в центре шара?

5.20. Определить потенциал на оси Oz сферического сегмента $\Omega = \{x, y, z: x^2 + y^2 + (z + h)^2, 0 < z < r_0 - h, 0 < h < r_0\}$, плотность заряда которого $\rho_0 \sqrt{\frac{r_0}{z}}$.

5.21. Найти потенциал в центре основания полуограниченного цилиндра $\Omega = \{x, y, z: x^2 + y^2 < r_0^2, 0 < z\}$, плотность заряда которого равна: 1) $\rho(z)$; 2) $\rho(z) \sin \varphi$; 3) $\rho(z) \cos^2 \varphi$, где плотность $\rho(z) = \rho_0 \frac{z}{r_0} e^{-\alpha z^2}$, $\alpha > 0$.

5.22. Тор образован вращением круга $(x - a)^2 + z^2 < r_0^2$, $a > r_0$, около оси Oz . Плотность заряда тора постоянна и равна ρ_0 . Вычислить потенциал в точке с координатами $x = y = z = 0$.

5.23. Тело получено вращением криволинейной трапеции $\{x, z: 0 < x < \frac{a}{b}\sqrt{z^2 + b^2}, 0 < z < h\}$ около оси Oz ; его объемная плотность заряда равна ρ_0 . Найти потенциал и напряженность электрического поля в точке $M(0, 0, 0)$.

5.24. Плотность заряда полушара ($x^2 + y^2 + z^2 < r_0^2, z > 0$) равна: 1) $\rho_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}}$; 2) $\rho_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} \sin \varphi$. Найти потенциал и напряженность электрического поля в центре основания.

5.25. Плотность заряда тела $\Omega = \{x, y, z: 2p\sqrt{x^2 + y^2} < z^2, 0 < z < h\}$ равна: 1) ρ_0 ; 2) $\rho_0 \frac{r}{r_0} \sin^3 \varphi$, где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Найти потенциал и напряженность электрического поля в точке с координатами $x = y = z = 0$.

5.26. В полуограниченном цилиндре $\Omega = \{x, y, z: x^2 + y^2 < r_0^2, 0 < z\}$ распределен заряд с плотностью $\rho_0 e^{-\alpha z^2}$, $\alpha > 0$. Какая сила действует на точечный заряд q , помещенный в центр основания Ω ?

5.27. Вычислить потенциал в центре эллипсоида с полуосями $a > b > c$, плотность которого постоянна и равна ρ_0 .

5.28. Тело получено вращением криволинейной трапеции $\{x, z: 0 < x < \frac{a}{b}\sqrt{b^2 - z^2}, 0 < z, a > b > 0\}$ около оси Oz ; его объемная плотность заряда равна: 1) ρ_0 ; 2) $\rho_0 \cos(\frac{\pi}{4} - \varphi)$; 3) $\rho_0 \cos^3 \varphi$. Найти силу, действующую на точечный заряд q , координаты которого равны $x = y = z = 0$.

5.29. Решить предыдущую задачу при условии $0 < a < b$, если плотность заряда равна: 1) $\rho_0 \sin \varphi$; 2) $\rho_0 \sin^2 \varphi \cos \varphi$; 3) $\rho_0 \sin^2 2\varphi$.

5.30. Показать, что в определении поверхности Ляпунова условие 2 следует из условий 1 и 3.

5.31. Показать, что: 1) поверхность Ляпунова принадлежит классу поверхностей гладкости C^1 ; 2) любая замкнутая ограниченная поверхность класса гладкости C^2 есть поверхность Ляпунова.

5.32. На двусторонней поверхности S определена плотность потенциала простого слоя. Руководствуясь физическим смыслом потенциалов, получить выражение для потенциала простого слоя в виде интеграла.

5.33. Плотность потенциала простого слоя $\sigma(P)$ определена на поверхности Ляпунова S и является ограниченной интегрируемой функцией. Показать, что вне S потенциал простого слоя принадлежит классу C^∞ и удовлетворяет уравнению Лапласа.

5.34. Получить асимптотическое представление (5.2) потенциала простого слоя.

Пример 5.3. Найти потенциал простого слоя, расположенного на сфере, радиус которой r_0 , с плотностью (в сферических координатах) $\sigma_0 \cos \theta$. Так как плотность не зависит от φ , то поле аксиально симметрично и точку наблюдения M можно выбрать в координатной плоскости xOz (рис. 5.5). Расстояние между $M(r, \mathbf{s}) = M(r, \theta, 0)$ и $P(\mathbf{r}_0) = P(r_0, \mathbf{s}') = P(r, \theta', \varphi')$ равно

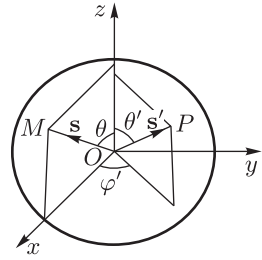


Рис. 5.5

$r_{MP} = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \gamma}$, где γ — угол между двумя единичными векторами, $\mathbf{s} = \sin \theta \mathbf{e}_x + \mathbf{e}_z$, $\mathbf{s}' = \sin \theta' \cos \varphi' \mathbf{e}_x + \sin \theta' \sin \varphi' \mathbf{e}_y + \cos \theta' \mathbf{e}_z$. Откуда $\cos \gamma = \mathbf{s} \mathbf{s}' = \sin \theta \sin \theta' \cos \varphi' + \cos \theta \cos \theta'$. Следовательно, потенциал простого слоя

$$v(M) = \sigma_0 \int_S \frac{\cos \theta' ds}{r_{MP}} = \sigma_0 r_0^2 \int_{S_1} \frac{\cos \theta' ds'}{\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \gamma}},$$

$ds' = \sin \theta' d\theta' d\varphi'$, $S_1 = S(0, 1)$. Функция $\frac{1}{r_{MP}}$ отличается множителем от производящей функции полиномов Лежандра. Действительно, если $r < r_0$, то

$$\frac{1}{r_{MP}} = \frac{1}{r_0} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{r_0^2} - 2\frac{r}{r_0} \cos \gamma}} = \frac{1}{r_0} \sum_{n=0}^{\infty} t^n P_n(\cos \gamma), \quad t = \frac{r}{r_0};$$

если $r > r_0$, то

$$\frac{1}{r_{MP}} = \frac{1}{r} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r_0^2}{r^2} - 2\frac{r_0}{r} \cos \gamma}} = \frac{1}{r_0} \sum_{n=0}^{\infty} t^n P_n(\cos \gamma), \quad t = \frac{r_0}{r}.$$

Так как $|P_n(\cos \gamma)| \leq 1$ для любого $n \in \mathbb{N}_0$, то оба функциональных ряда мажорируются сходящимся числовым рядом $\sum_{n=0}^{\infty} t^n$ и по достаточному признаку Вейерштрасса равномерно сходятся на S_1 . Таким образом, обосновано почленное интегрирование рядов. В вычислении интегралов можно применить интегральную формулу для для сферических функций ([15], глава V, § 25)

$$\int_{S_1} Y_k(s') P_n(ss') ds' = \frac{4\pi}{2k+1} Y_k(s) \delta_{kn}, \quad (5.15)$$

согласно которой при $r < r_0$

$$\begin{aligned} v(M) &= \sigma_0 r_0 \sum_{n=0}^{\infty} t^n \int_{S_1} \cos \theta' P_n(ss') ds' = \\ &= \sigma_0 r_0 \sum_{n=0}^{\infty} t^n \int_{S_1} Y_1^0(s') P_n(ss') ds' = \sigma_0 r_0 t Y_1^0(s) \frac{4\pi}{3} = \frac{4\pi}{3} r \cos \theta; \end{aligned}$$

если же $r > r_0$, то $\sigma_0 \frac{r_0^2}{r} \frac{r_0}{r} \frac{4\pi}{3} r \cos \theta = \sigma_0 \frac{4\pi}{3} \frac{r_0^3}{r^2} \cos \theta$. Поскольку $v(M) \in C$, в результате

$$v(M) = \frac{4\pi\sigma_0 r_0}{3} \cdot \begin{cases} \frac{r}{r_0} \cos \theta, & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^2}{r^2} \cos \theta, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

Другой метод решения основан на свойствах потенциала простого слоя, согласно которым функция $v(M)$ — решение краевой задачи

$$\begin{aligned} \Delta v &= -4\pi\sigma_0 \delta(r - r_0) \cdot \cos \theta, \quad r \neq r_0, \\ |v| &< \infty, \quad v \xrightarrow{r \rightarrow \infty} 0. \end{aligned}$$

Эта задача равносильна следующей:

$$\begin{aligned} \Delta v &= 0, & \Delta v &= 0, \\ 0 < r < r_0, & r_0 < r, \\ |v| < \infty, & v \xrightarrow{r \rightarrow \infty} 0, \\ v|_{r_0-0} - v|_{r_0+0}, & \frac{\partial v}{\partial r}|_{r_0-0} - \frac{\partial v}{\partial r}|_{r_0+0} = 4\pi\sigma_0 \cos \theta \end{aligned}$$

Решения уравнений (см. пример 2.26), удовлетворяющие условиям в нуле и на бесконечности имеют форму рядов

$$v(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \left(\frac{r}{r_0}\right)^n P_n(\cos \theta), \quad r < r_0,$$

$$v(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \left(\frac{r_0}{r}\right)^{n+1} P_n(\cos \theta), \quad r_0 < r.$$

При $r = r_0$ для определения коэффициентов A_n и B_n получается бесконечное множество систем линейных уравнений вида

$$\begin{cases} A_n - B_n = 0, \\ nA_n + (n+1)B_n = 4\pi\sigma_0 r_0 \delta_{n1}. \end{cases}$$

При $n \neq 1$ определитель каждой системы отличен от нуля, поэтому единственным решением будет $A_n = B_n = 0$. Если $n = 1$, то $A_1 = B_1 = \frac{4\pi\sigma_0 r_0}{3}$. При подстановке найденных коэффициентов в выражения для $v(r, \theta)$ при $r < r_0$ и $r > r_0$ получается решение задачи.

5.35. Найти потенциал простого слоя, распределенного на сфере $S = \{x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 = r_0^2\}$ с плотностью:

$$1) \sigma_0; \quad 2) \sigma_0 \sin \theta \sin \varphi; \quad 3) \sigma_0 \sin^3 \theta \cos 3\varphi; \quad 4) \sigma_0 \eta(\theta_0 - \theta).$$

5.36. На концентрических сферах, радиусы которых r_1 и r_2 , $r_1 < r_2$, распределен заряд, соответственно, с плотностями σ_1 и σ_2 . Определить потенциал электростатического поля в пространстве.

5.37. Определить потенциал электростатического поля на оси полого ограниченного цилиндра ($r = r_0$, $0 < \varphi \leq 2\pi$, $|z| < h$), поверхностная плотность заряда которого σ_0 .

5.38. Найти потенциал на оси сферического сегмента, полученного вращением части окружности $z^2 + x^2 = r_0^2$, $r_0 \operatorname{ctg} \alpha < z < r_0$ около оси Oz , если поверхностная плотность заряда σ_0 .

5.39. Найти потенциал на оси конуса, поверхность которого получена вращением отрезка прямой $z = \operatorname{ctg} \alpha x$, $0 < z < h$, $0 < \alpha < \pi/2$, около оси Oz , если поверхностная плотность заряда σ_0 .

5.40. Плотность заряда цилиндрической поверхности $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, 0 \leq z \leq h\}$ равна: 1) σ_0 ; 2) $\sigma_0 \cos \varphi$; 3) $\sigma_0 \sin^2 \varphi$. Найти напряженность поля на оси Oz .

5.41. Плотность заряда цилиндрической поверхности $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, 0 < z\}$ равна $\sigma_0 e^{-\alpha z^2}$, $\alpha > 0$. Какая сила действует на точечный заряд q , расположенный в точке $M(0, 0, 0)$?

5.42. Сферический сегмент S получен в результате вращения дуги $L = \{x, z: x^2 + z^2 = r_0^2, r_0 \cos \alpha \leq z \leq r_0, 0 < \alpha < \pi\}$ около оси Oz . Найти силу, действующую на точечный заряд q , расположенный в точке $M(0, 0, 0)$, если плотность заряда на S равна: 1) $\sigma_0 \cos \theta \sin^2 \frac{\varphi}{2}$; 2) $\sigma_0 \sin \theta \cos^2 \frac{\varphi}{2}$.

5.43. Простой слой расположен на сфере $S = \{x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 = r_0^2\}$ с плотностью: 1) $\sigma_0 \cos \frac{\theta}{2}$; 2) $\sigma_0 \sin \frac{\theta}{2}$; 3) $\sigma_0 \sin \theta$. Вычислить потенциал на оси Oz .

5.44. Плотность заряда полусферы $\{x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 = r_0^2, 0 < z\}$ равна: 1) $\sigma_0 \cos \varphi$; 2) $\sigma_0 \cos^2 \varphi$. Определить напряженность электрического поля на оси Oz .

5.45. На тонком диске с отверстием $S = \{x, y, z: 0 < r_1 < \sqrt{x^2 + y^2} < r_2, z = 0\}$ распределен простой слой с плотностью: 1) σ_0 ; 2) $\frac{\sigma_0}{r}$; 3) $\frac{\sigma_0}{r^2}$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Определить потенциал на оси Oz . Рассмотреть частный случай: $r_1 = 0$, $r_2 = r_0$, $\sigma = \sigma_0$.

5.46. Определить напряженность электрического поля на оси тонкого диска с отверстием $S = \{x, y, z: 0 < r_1 < \sqrt{x^2 + y^2} < r_2, z = 0\}$, плотность заряда которого постоянна и равна σ_0 .

5.47. Определить потенциал в центре тонкого эллиптического диска $S = \{x, y, z: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} < 1, z = 0\}$, плотность заряда которого постоянна и равна σ_0 .

5.48. На тонком эллиптическом диске с отверстием $S = \{x, y, z: 0 < \frac{x^2 + y^2}{r_0^2} < \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} < 1, z = 0\}$ распределен заряд с плотностью $\frac{\sigma_0 x}{r_0}$. Какая сила действует на точечный заряд q , координаты которого $x = y = z = 0$?

5.49. Найти потенциал равномерно заряженного тонкого диска, радиус которого r_0 , заряд Q .

5.50. Найти потенциал электрического поля зарядов, расположенных с плотностью σ_0 на: 1) полосе $(-l < x < l, y = 0)$,

$-\infty < z < \infty$); 2) полуплоскости ($0 < x, y = 0, -\infty < z < \infty$); 3) плоскости $y = 0$.

5.51. Найти потенциал электростатического поля зарядов, расположенных с постоянной плотностью q : 1) на отрезке $[-l, l]$ оси Oz ; 2) на положительной части оси Oz ; 3) на оси Oz .

5.52. Определить потенциал электростатического поля на оси (одного) витка винтовой линии (радиус r_0 , шаг h), полный заряд которого Q .

5.53. На оси витка, описанного в предыдущей задаче, расположен точечный заряд q . Определить силу, действующую на заряд.

5.54. Решить задачу 2.846 (т. 1) исходя из выражения для потенциала в виде интеграла.

5.55. Показать, что потенциал равномерно заряженного тонкого кольца $L = \{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, z = 0\}$ (в цилиндрических координатах)

$$u(r, \varphi, z) = \frac{2Q}{\pi \sqrt{(r + r_0)^2 + z^2}} K(k), \quad k^2 = \frac{4rr_0}{(r + r_0)^2 + z^2},$$

где Q — полный заряд кольца.

5.56. Найти потенциал тонкого заряженного кольца $L = \{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, z = 0\}$, линейная плотность заряда которого равна (в цилиндрических координатах) $q \sin \varphi$. Ответ выразить через эллиптические интегралы.

5.57. В пространстве $\mathbb{R}^3$ получить выражение для потенциала точечного электрического диполя, момент которого $\mathbf{p}$.

5.58. На поверхности S класса гладкости C^1 расположены диполи, плотность момента которых $\nu(P)\mathbf{n}_P$, где $\mathbf{n}_P$ — единичная нормаль к S в точке P (двойной слой). Получить следующие выражения для потенциала электрического поля этой системы зарядов:

$$w(M) = \int_S \nu(P) \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r_{MP}} ds = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}^2} ds = \int_{\omega} \nu(P) d\omega_{PM},$$

где r_{MP} — расстояние между точками P и M , $\varphi_{PM} \in [0; \pi]$ — угол между нормалью $\mathbf{n}_P$ и вектором $\mathbf{r}_{PM}$, $d\omega_{PM}$ — телесный угол со знаком: абсолютная величина $|d\omega_{PM}|$ — телесный

угол, под которым виден элемент поверхности ds из точки M , знак $d\omega_{PM}$ равен знаку $\cos \varphi_{PM}$.

5.59. Получить асимптотическое представление (5.5) потенциала двойного слоя в $\mathbb{R}^3$.

5.60. Доказать, что вне поверхности S потенциал двойного слоя удовлетворяет уравнению Лапласа.

5.61. Поверхность Ляпунова S ограничивает область $\Omega \in \mathbb{R}^3$. Показать, что потенциал двойного слоя, плотность момента которого $\nu(P) = 1$,

$$w_0(M) = \begin{cases} 0, & M \notin \overline{\Omega}, \\ -2\pi, & M \in S, \\ -4\pi, & M \in \Omega. \end{cases}$$

Первое и третье равенства верны для кусочно-гладкой замкнутой поверхности.

5.62. Сфера S_1 ограничивает шар Ω_1 , поверхность S_2 — граница эллипсоида Ω_2 . На каждой поверхности расположен двойной слой, плотность которого постоянна и равна ν_1 на S_1 , ν_2 на S_2 . Найти потенциал в пространстве, если $S_1 \in \Omega_2$.

5.63. Плотность момента двойного слоя на поверхностях Ляпунова S_1 и S_2 , ограничивающих односвязные области Ω_1 и Ω_2 соответственно, постоянна и равна ν_0 . Поверхности имеют общую часть границы $S = S_1 \cap S_2$ — односвязное множество, $S \neq S_i, i = 1, 2$, $\Omega_1 \cap \Omega_2 = \emptyset$. Найти потенциал в пространстве. Какова плотность момента двойного слоя на S ?

5.64. Двойной слой, плотность которого $\rho(P) = 1$, расположен на поверхности S , ограничивающей прямоугольный параллелепипед Ω . Определить потенциал двойного слоя.

Пример 5.4. Определить потенциал двойного слоя, расположенного на сфере S ($x^2 + y^2 + z^2 = r_0^2$) с плотностью (в сферических координатах) $\nu(\theta, \varphi) = \nu_0 \sin^2 \theta \cos \theta \sin 2\varphi$.

В данном случае плотность $\nu(\theta, \varphi) = aY_3^2(\theta, \varphi)$, где $a = \frac{1}{15}$, так что

$$w(r, \mathbf{s}) = \int_S \nu(\mathbf{s}') \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r_{MP}} ds = a\nu_0 r_0^2 \int_{S_1} Y_3^2(\mathbf{s}') \frac{\partial}{\partial r_0} \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \gamma}} ds',$$

где γ — угол между векторами $\mathbf{s}(r, \theta, \varphi)$ и $\mathbf{s}'(r_0, \theta', \varphi')$, $ds' = \sin \theta' d\theta' d\varphi'$. Далее следуют такие же преобразования, как

и в примере 5.3: разложение подынтегральной функции в ряд и применение интегральной формулы (5.15). Итак, при $r < r_0$

$$\begin{aligned} w(r, \mathbf{s}) &= a\nu_0 r_0^2 \int_{S_1} Y_3^2(\mathbf{s}') \frac{\partial}{\partial r_0} \frac{1}{r_0} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^n P_n(\cos \gamma) ds' = \\ &= a\nu_0 r_0^2 \frac{\partial}{\partial r_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{r^n}{r_0^{n+1}} \int_{S_1} Y_3^2(\mathbf{s}') P_n(\cos \gamma) ds' = a\nu_0 r_0^2 \frac{\partial}{\partial r_0} \frac{r^3}{r_0^4} \frac{4\pi}{7} Y_3^2(\mathbf{s}) = \\ &= -\frac{16}{7} \nu_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^3 \sin^2 \theta \cos \theta \sin 2\varphi. \end{aligned}$$

Если $r > r_0$, то

$$\begin{aligned} w(r, \mathbf{s}) &= a\nu_0 r_0^2 \int_{S_1} Y_3^2(\mathbf{s}') \frac{\partial}{\partial r_0} \frac{1}{r_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{r_0^n}{r^{n+1}} P_n(\cos \gamma) ds' = \\ &= a\nu_0 r_0^2 \frac{\partial}{\partial r_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{r_0^n}{r^{n+1}} \int_{S_1} Y_3^2(\mathbf{s}') P_n(\cos \gamma) ds' = a\nu_0 r_0^2 \frac{\partial}{\partial r_0} \frac{r_0^3}{r^4} \frac{4\pi}{7} Y_3^2(\mathbf{s}) = \\ &= \frac{12}{7} \nu_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^4 \sin^2 \theta \cos \theta \sin 2\varphi. \end{aligned}$$

Значение $w(M)$ на S можно найти из соотношения (5.6):

$$\begin{aligned} \frac{12}{7} \nu(\theta, \varphi) &= w(r_0, \theta, \varphi) - 2\pi \nu(\theta, \varphi) \implies w(r_0, \theta, \varphi) = \\ &= -\frac{2\pi}{7} \nu_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^3 \sin^2 \theta \cos \theta \sin 2\varphi. \end{aligned}$$

Другой метод вычисления основан на свойствах потенциала двойного слоя, которые определяют краевую задачу для функции $w(M)$ (см. задачу 5.65).

5.65. Показать, что потенциал $w(M)$ при условиях, сформулированных в примере 5.4, является решением краевой задачи и решить ее.

5.66. Найти потенциал двойного слоя, распределенного на сфере $\{x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 = r_0^2\}$ с плотностью:

$$1) \nu_0; \quad 2) \nu_0 \cos \theta; \quad 3) \nu_0 \sin 2\theta \cos \varphi; \quad 4) \nu_0 \eta(\theta_0 - \theta).$$

5.67. Определить потенциал двойного слоя, распределенного на диске, радиус которого r_0 , постоянная плотность момента равна ν_0 .

5.68. Двойной слой распределен на поверхности S цилиндра $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, 0 \leq z \leq h\}$ с постоянной плотностью момента ν_0 . Определить потенциал на оси Oz . Какая сила действует на заряд q в точке $M(0, 0, \frac{h}{2})$?

5.69. Плотность момента двойного слоя, расположенного на части $S = \{x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 = r_0^2, \cos \alpha \leq z \leq r_0, 0 < \alpha \leq \pi\}$ сферической поверхности, постоянна и равна ν_0 . Определить потенциал на оси Oz . Какова напряженность поля в точке $M(0, 0, 0)$?

5.70. Поверхность S получена вращением около оси Oz отрезка прямой $L \left(0 < r_1 \leq x \leq r_2, y = 0, z = \frac{h(r_1 - x)}{r_1 - r_2} \right)$ и является носителем двойного слоя, плотность момента которого постоянна и равна ν_0 . Определить потенциал на оси Oz . Указать точки на оси Oz , в которых напряженность электрического поля равна нулю, если: 1) $r_1 = 2\sqrt{2}h, r_2 = h$; 2) $r_1 = h\sqrt{3}, r_2 = \frac{h}{3}$. При каких значениях r_1, r_2, h не существует точки на оси Oz , в которой напряженность поля равна нулю, или существует лишь одна такая точка?

5.71. Найти потенциал двойного слоя с постоянной плотностью момента $\nu_0 = 1$, носитель которого поверхность S :

- 1) плоскость $z = 0$;
- 2) полуплоскость $\{x, y, z: -\infty < x < \infty, 0 \leq y, z = 0\}$;
- 3) полоса $\{x, y, z: -\infty < x < \infty, 0 \leq y \leq h, z = 0\}$;
- 4) первый квадрант $\{x, y, z: 0 \leq x, 0 \leq y, z = 0\}$;
- 5) полуполоса $\{x, y, z: 0 \leq x, 0 \leq y \leq h, z = 0\}$;
- 6) угол $\{x, y, z: 0 \leq x, 0 \leq y \leq kx, z = 0\}$;
- 7) прямоугольник $\{x, y, z: -a \leq x \leq a, -b \leq y \leq b, z = 0\}$;
- 8) треугольник $\left\{x, y, z: 0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b - \frac{b}{a}x, z = 0\right\}$;

5.72. Дипольный момент единицы длины отрезка $[-l, l]$ оси Ox пространства $\mathbb{R}^3$ равен $\nu_0 \mathbf{e}_z$. Определить потенциал электростатического поля этой системы зарядов.

5.73. Дипольный момент единицы длины тонкого кольца, радиус которого r_0 , параллелен оси кольца и равен ν_0 . Определить потенциал электростатического поля этой системы зарядов.

5.74. Дипольный момент единицы длины тонкого кольца $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, z = 0\}$ равен (в цилиндрических координатах) $p_0 \mathbf{e}_r$. Выразить потенциал электростатического поля кольца через эллиптические интегралы.

5.75. Определить потенциал электростатического поля на оси Oz витка L винтовой линии (L — один виток, радиус витка r_0 , шаг h), дипольный момент единицы длины которого $\rho_0 \mathbf{n}$, где $\mathbf{n}$ — единичный вектор, перпендикулярный к витку в точке P : 1) направлен по внешней нормали в точке P к поверхности цилиндра, на которую можно поместить винтовую линию; 2) расположен в касательной плоскости к цилиндру в точке P и составляет острый угол с осью Oz .

5.76. Плотность заряда $\rho(P)$ неограниченного цилиндра, поперечным сечением которого является область Ω , а образующая параллельна оси Oz , не зависит от z . Определить потенциал электростатического поля цилиндра. Получить интегральное представление логарифмического потенциала площади для $\Omega \in \mathbb{R}^2$, плотность которого $\rho(P)$.

5.77. Получить асимптотическое представление (5.8) логарифмического потенциала $u(M)$ при $M \rightarrow \infty$.

5.78. Показать, что логарифмический потенциал площади, плотность которого — ограниченная интегрируемая функция, а область Ω ограничена, вне $\bar{\Omega}$ принадлежит классу C^∞ и удовлетворяет уравнению Лапласа.

Пример 5.5. Найти логарифмический потенциал площади для круга $\Omega = \{x, y: x^2 + y^2 \leq r_0^2\}$, если плотность $\rho(r, \varphi) = \rho_0 \frac{r}{r_0} \cos 3\varphi$. В полярных координатах расстояние между точкой наблюдения $M(R, \psi)$ и точкой $P(r, \varphi)$, принадлежащей кругу, равно (рис. 5.6) $r_{MP} = \sqrt{r^2 + R^2 - 2rR \cos \gamma}$, где угол $\gamma = \varphi - \psi$. Следовательно, (см. задачу 5.76) потенциал равен интегралу

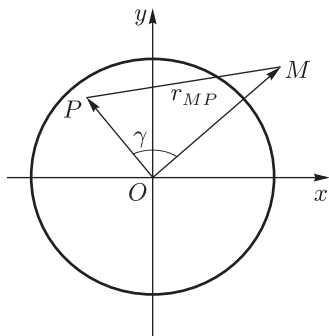


Рис. 5.6

$$u(r, \varphi) = \int_{\Omega} \rho(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} d\mathbf{r} = \frac{\rho_0}{r_0} \int_0^{2\pi} \cos 3\varphi d\varphi \int_0^{r_0} r^2 dr \ln \frac{1}{r_{MP}}.$$

Вычисление интеграла проводится с помощью разложения

$$\ln \frac{1}{\sqrt{1 + t^2 - 2t \cos \gamma}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^n \cos n\gamma}{n}, \quad |t| < 1. \quad (5.16)$$

Если $R > r_0$, то вычисляемый интеграл равен

$$\int_0^{2\pi} \cos 3\varphi d\varphi \int_0^{r_0} r^2 dr \left(\ln \frac{1}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R} \right)^n \frac{\cos n(\varphi - \psi)}{n} \right).$$

Ряд равномерно сходится на $[0; 2\pi]$, так как мажорируется сходящимся числовым рядом $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^n}{n}$, стало быть допустимо почленное интегрирование по φ . В силу ортогональности тригонометрических функций $\cos n\varphi$, $\sin n\varphi$ на промежутке $[0; 2\pi]$

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \cos n(\varphi - \psi) d\varphi &= \int_0^{2\pi} \cos n\varphi \cos 3\varphi \cos n\psi d\varphi + \\ &+ \int_0^{2\pi} \sin n\varphi \sin 3\varphi \sin 3\psi d\varphi = \pi \cos 3\psi \delta_{n3}, \end{aligned}$$

так что

$$u(R, \psi) = \frac{\pi \rho_0}{r_0} \int_0^{r_0} \frac{r^6 dr}{3R^3} \cos 3\psi = \frac{\pi \rho_0 r_0^5}{18R^3} \cos 3\psi.$$

Если $R < r_0$, интеграл равен

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \cos 3\varphi d\varphi \left[\int_0^R r^2 dr \left(\ln \frac{1}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R} \right)^n \frac{\cos n(\varphi - \psi)}{n} \right) + \right. \\ \left. + \int_R^{r_0} r^2 dr \left(\ln \frac{1}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^n \frac{\cos n(\varphi - \psi)}{n} \right) \right] = \\ = \frac{\pi \rho_0}{3r_0} \left(\int_0^R \frac{r^5}{R^3} dr + \int_0^R \frac{R^3}{r} dr \right) = \frac{\pi \rho_0}{3r_0} \left(\frac{R^6}{6} + R^3 \ln \frac{r_0}{R} \right) \cos 3\psi. \end{aligned}$$

В обозначениях $R \rightarrow r$, $\psi \rightarrow \varphi$

$$u(r, \varphi) = \frac{\pi \rho_0}{3r_0} \cos 3\varphi \cdot \begin{cases} r^3 \left(\frac{1}{6} + \ln \frac{r_0}{r} \right), & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^6}{6r^3}, & r \geq r_0. \end{cases}$$

Другой способ вычисления потенциала — решение краевой задачи (см. задачу 5.79).

5.79. Вычислить потенциал, рассмотренный в примере 5.5, решая краевую задачу.

5.80. Плотность логарифмического потенциала площади для круга $\Omega = \{x, y: x^2 + y^2 < r_0^2\}$ зависит только от расстояния $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ от центра круга и равна $\rho(r)$. Показать, что потенциал

$$u(r) = 2\pi \cdot \begin{cases} F(r_0) \ln \frac{1}{r_0} - F(0) \ln \frac{1}{r} + \int_r^{r_0} \frac{F(r)}{r} dr, & r \leq r_0, \\ (F(r_0) - F(0)) \ln \frac{1}{r}, & r \geq r_0, \end{cases}$$

где $F(r)$ — первообразная функции $r\rho(r)$.

5.81. Найти логарифмический потенциал площади для круга $\Omega = \{x, y: x^2 + y^2 < r_0^2\}$, если плотность $\rho(r)$, где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, равна:

- 1) ρ_0 ; 2) $\rho_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^\alpha$; 3) $\rho_0 \sin \alpha r$; 4) $\rho_0 \cos \alpha r$;
 5) $\rho_0 \frac{\sin \alpha r}{\alpha r}$; 6) $\rho_0 \cos \alpha r^2$; 7) $\rho_0 e^{\alpha r}$; 8) $\rho_0 e^{\alpha r^2}$.

5.82. Найти логарифмический потенциал площади для круга, радиус которого r_0 , если плотность потенциала:

- 1) $\rho_0 \cos \varphi$; 2) $\rho_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 \sin 2\varphi$.

5.83. Вычислить потенциал электростатического поля бесконечно длинной, равномерно заряженной трубы ($r_1 < r < r_2$), плотность заряда которой: 1) ρ_0 ; 2) $\rho_0 \frac{r}{r_0} \sin \varphi$; 3) $\rho_0 \cos 2\varphi$.

5.84. Найти логарифмический потенциал площади для квадрата со стороной a ; плотность потенциала ρ_0 .

5.85. Два пучка заряженных частиц параллельны друг другу. Определить линейную плотность силы кулоновского взаимодействия между пучками, рассматривая их как равномерно заряженные цилиндры, радиусы которых r_0 , заряды единицы длины (вдоль оси) q_1 и q_2 .

5.86. Плотность заряда $\rho(P)$ неограниченной цилиндрической поверхности, поперечным сечением которой является линия S , а образующая параллельна оси Oz , не зависит от z . Определить потенциал электростатического поля цилиндра. Получить интегральное представление логарифмического потенциала простого слоя, расположенного на S , с плотностью $\rho(P)$.

5.87. Получить асимптотическое представление (5.9) логарифмического потенциала простого слоя $v(M)$ при $M \rightarrow \infty$.

5.88. Показать, что логарифмический потенциал простого слоя, плотность $\sigma(P)$ которого — ограниченная интегрируемая функция, а S — спрямляемая линия, вне S принадлежит классу C^∞ и удовлетворяет уравнению Лапласа.

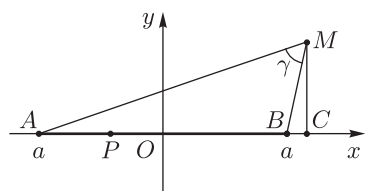


Рис. 5.7

Пример 5.6. Вычислить логарифмический потенциал простого слоя, расположенного на отрезке $\{x, y: -a \leq x \leq a, y = 0\}$ с постоянной плотностью σ_0 (рис. 5.7). Если $M(x, y)$ — точка наблюдения, а точка $P \in S$, то (см. задачу 5.86) потенциал равен

$$v(x, y) = \int_S \sigma(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} ds = \sigma_0 \int_{-a}^a d\xi \ln \frac{1}{\sqrt{(\xi - x)^2 + y^2}}.$$

Результат достигается подстановкой $\xi - x = t$ и интегрированием по частям:

$$\begin{aligned} v(x, y) &= -\frac{1}{2}\sigma_0 \int_{-a-x}^{a-x} dt \ln(t^2 + y^2) = \\ &= -\frac{1}{2}\sigma_0 \left(t \ln(t^2 + y^2) \Big|_{-a-x}^{a-x} - 2 \int_{-a-x}^{a-x} \frac{t^2 dt}{t^2 + y^2} \right) = \\ &= -\frac{1}{2}\sigma_0 \left(t \ln(t^2 + y^2) - 2t + 2|y| \operatorname{arctg} \frac{t}{|y|} \right) \Big|_{-a-x}^{a-x} = \\ &= \sigma_0 \left[2a - \frac{1}{2}(a+x) \ln((a+x)^2 + y^2) - \frac{1}{2}(a-x) \ln((a-x)^2 + y^2) - \right. \\ &\quad \left. - |y| \left(\operatorname{arctg} \frac{x+a}{|y|} - \operatorname{arctg} \frac{x-a}{|y|} \right) \right]. \end{aligned}$$

Последнее слагаемое содержит разность дуг $\gamma = \alpha - \beta$, где

$$\alpha = \arctg \frac{x+a}{|y|}, \quad \beta = \arctg \frac{x-a}{|y|}; \quad \tg \gamma = \frac{2a|y|}{y^2 + x^2 - a^2}.$$

Если $|x| > a$, то α и β — острые углы разных знаков, так что $\gamma \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right)$; а так как при этом $\tg \gamma > 0$, то $\gamma \in \left(0; \frac{\pi}{2}\right)$. Если $|x| < a$, то $\alpha > 0$, $\beta > 0$ и $\alpha > \beta$ ($\arctg x$ монотонно возрастающая функция), а $\tg \gamma$ в данном случае может иметь любой знак. Эти свойства углов демонстрирует рис. 5.7, на котором $\angle AMC = \alpha$, $\angle BMC = \beta$, а γ — угол, под которым из точки M виден отрезок $[-a; a]$. Таким образом,

$$0 < \gamma < \pi, \quad \ctg \gamma = \frac{y^2 + x^2 - a^2}{2a|y|} \implies \gamma = \operatorname{arccctg} \frac{y^2 + x^2 - a^2}{2a|y|}.$$

В итоге

$$v(x, y) = \sigma_0 \left[2a - \frac{1}{2}(a+x) \ln((a+x)^2 + y^2) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2}(a-x) \ln((a-x)^2 + y^2) - |y| \operatorname{arccctg} \frac{y^2 + x^2 - a^2}{2a|y|} \right].$$

5.89. Найти логарифмический потенциал простого слоя, расположенного на отрезке $\{x, y: -a \leq x \leq a, y = 0\}$ с плотностью:

1) $\sigma_0 \operatorname{sign} x$; 2) $\sigma_0 \frac{x}{a}$; 3) $\sigma_0 \frac{|x|}{a}$.

5.90. На окружности $S = \{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2\} \subset \mathbb{R}^2$ расположен простой слой с постоянной плотностью σ_0 . 1) Вычислить потенциал простого слоя и проверить его свойства. 2) Зная свойства потенциала, найти его, решая краевую задачу.

5.91. Найти логарифмический потенциал простого слоя, распределенного на окружности, радиус которой r_0 , с плотностью:

1) $\sigma_0 \cos \varphi$; 2) $\sigma_0 \cos^2 \varphi$; 3) $\sigma_0 \sin \frac{\varphi}{2}$; 4) $\sigma_0 \cos \frac{\varphi}{2}$; 5) $\sigma_0 \eta(\varphi_0 - |\varphi|)$.

5.92. Найти логарифмический потенциал простого слоя, расположенного на полуокружности $S = \{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2, y \geq 0\}$ с постоянной плотностью σ_0 .

5.93. На прямой $S \in \mathbb{R}^3$ расположены электрические диполи, плотность момента которых $\mathbf{p} = p\mathbf{n}$, где $\mathbf{p}$ — постоянный вектор,

перпендикулярный S . Определить потенциал электрического поля прямой.

5.94. На цилиндрической поверхности класса гладкости C^1 , образующие которой параллельны оси Oz , расположены диполи, поверхностная плотность которых $\nu(P)\mathbf{n}$, где $\mathbf{n}$ — вектор единичной нормали к поверхности в точке P , а функция $\nu(P)$ не зависит от z ; поперечное сечение поверхности — линия S . Имея ввиду физический смысл потенциалов, получить следующие выражения логарифмического потенциала двойного слоя для линии S :

$$w(M) = \int_S \frac{\partial}{\partial n} \nu(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} ds = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}} ds = \int_{\omega} \nu(P) d\omega_{PM},$$

где $\varphi_{PM} \in [0; \pi]$ — угол между векторами $\mathbf{n}_P$ и $\mathbf{r}_{MP}$, $d\omega_{PM}$ — линейный угол со знаком: $|d\omega_{PM}|$ — линейный угол, под которым виден элемент ds линии S из точки M , знак $d\omega_{PM}$ равен знаку $\cos \varphi_{PM}$.

5.95. Получить асимптотическое представление (5.12) логарифмического потенциала двойного слоя $v(M)$ при $M \rightarrow \infty$.

5.96. Показать, что логарифмический потенциал двойного слоя, плотность $\sigma(P)$ которого — ограниченная интегрируемая функция, а S — спрямляемая линия, вне S принадлежит классу C^∞ и удовлетворяет уравнению Лапласа.

5.97. Линия Ляпунова S ограничивает область $\Omega \in \mathbb{R}^2$. Показать, что потенциал двойного слоя, плотность момента которого $\nu(P) = 1$,

$$w_0(M) = \begin{cases} 0, & M \notin \overline{\Omega}, \\ -\pi, & M \in S, \\ -2\pi, & M \in \Omega. \end{cases}$$

Первое и третье равенства верны для кусочно-гладкой замкнутой линии.

5.98. На каждой из окружностей S_1 и S_2 , ограничивающих, соответственно, области Ω_1 и Ω_2 , расположен двойной слой с плотностью момента $\nu(P) = 1$. Найти логарифмический потенциал двойного слоя в $\mathbb{R}^2$, если окружности касаются в точке A : 1) внутренним ($\Omega_1 \in \Omega_2$); 2) внешним образом.

5.99. Двойной слой, плотность которого $\rho(P) = 1$, расположен на линии S , ограничивающей прямоугольник Ω . Определить логарифмический потенциал двойного слоя в $\mathbb{R}^2$.

Пример 5.7. Двойной слой расположен на окружности $S = \{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2\} \in \mathbb{R}^2$ с плотностью момента $\nu_0 \sin^2 \varphi$. Определить логарифмический потенциал двойного слоя в $\mathbb{R}^2$.

В полярных координатах расстояние между точками $M(r, \varphi)$ и $P(r_0, \psi) \in S$ равно $r_{MP} = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \gamma}$, где угол $\gamma = \psi - \varphi$. Потенциал двойного слоя (см. задачу 5.94)

$$\begin{aligned} w(M) &= \int_S \nu(P) \frac{\partial}{\partial n} \ln \frac{1}{r_{MP}} ds = \\ &= \nu_0 r_0 \int_0^{2\pi} \sin^2 \psi \frac{\partial}{\partial r_0} \ln \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \gamma}} d\psi. \end{aligned}$$

Вычисление интеграла проводится с помощью разложения (5.16). Если $r < r_0$, то

$$w(r, \varphi) = \frac{\nu_0 r_0}{2} \int_0^{2\pi} (1 - \cos 2\psi) \frac{\partial}{\partial r_0} \left(\ln \frac{1}{r_0} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \frac{\cos n(\psi - \varphi)}{n} \right) d\psi.$$

Так как функции $\cos n\varphi$ и $\sin n\varphi$ ортогональны на промежутке $[0; 2\pi]$, то

$$\begin{aligned} w(r, \varphi) &= \frac{\nu_0}{2} \left[- \int_0^{2\pi} d\psi + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \int_0^{2\pi} \cos 2\psi \cos 2\varphi \right] d\psi = \\ &= \pi \nu_0 \left(-1 + \frac{r^2}{2r_0^2} \cos 2\varphi \right). \end{aligned}$$

Если $r > r_0$, то аналогичным образом

$$\begin{aligned} w(r, \varphi) &= \frac{\nu_0}{2} \int_0^{2\pi} (1 - \cos 2\psi) \frac{\partial}{\partial r_0} \left(\ln \frac{1}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \frac{\cos n(\psi - \varphi)}{n} \right) d\psi = \\ &= - \frac{\nu_0 r_0^2}{2r^2} \int_0^{2\pi} \cos 2\psi \cos 2\varphi d\psi = - \frac{\nu_0 r_0^2}{2r^2} \cos 2\varphi. \end{aligned}$$

Значение потенциала при $r = r_0$ определяется либо из свойства (5.13), либо интегрированием:

$$\begin{aligned} w(r_0) &= \nu_0 r_0 \int_0^{2\pi} \sin^2 \psi \frac{\partial}{\partial r_0} \ln \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \gamma}} \Big|_{r=r_0} d\psi = \\ &= -\frac{\nu_0 r_0}{4} \int_0^{2\pi} (1 - \cos \psi) \frac{2r_0 - 2r \cos \gamma}{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \gamma} \Big|_{r=r_0} d\psi = \frac{\pi \nu_0}{2}. \end{aligned}$$

Итак,

$$w(r, \varphi) = -\frac{\pi \nu_0}{2} \cdot \begin{cases} 2 - \frac{r^2}{r_0^2} \cos 2\varphi, & r < r_0, \\ 1, & r = r_0, \\ \frac{r_0^2}{r^2} \cos 2\varphi, & r > r_0. \end{cases}$$

Другой метод вычисления потенциала — решение краевой задачи (см. задачу 5.100).

5.100. Найти потенциал, рассмотренный в примере 5.7, решая соответствующую краевую задачу.

5.101. Найти логарифмический потенциал двойного слоя, распределенного на окружности $\{x, y: x^2 + y^2 = r_0\}$ с плотностью:

- 1) ν_0 ; 2) $\nu_0 \sin \varphi$; 3) $\nu_0 \cos m\varphi$, $m > 0$;
4) $\nu_0 \sin \frac{\varphi}{2}$; 5) $\nu_0 \cos \frac{\varphi}{2}$; 6) $\nu_0 \eta(\varphi_0 - |\varphi|)$, $\varphi_0 \in (-\pi; \pi)$.

5.102. Найти логарифмический потенциал двойного слоя, расположенного на полуокружности $\{x, y: x^2 + y^2 = r_0, y \geq 0\}$ с постоянной плотностью ν_0 .

5.103. Найти логарифмический потенциал двойного слоя, расположенного на оси Ox с плотностью:

- 1) ν_0 ; 2) $\nu_0 \operatorname{sign} x$; 3) $\nu_0 \sin \alpha x$; 4) $\nu_0 \cos \alpha x$;
5) $\frac{\nu_0 a^2}{x^2 + a^2}$; 6) $\frac{\nu_0 a^2}{x^2 + a^2} \operatorname{sign} x$; 7) $\frac{\nu_0 a x}{x^2 + a^2}$; 8) $\frac{\nu_0 a |x|}{x^2 + a^2}$;
9) $\frac{\nu_0 x^2}{x^2 + a^2}$; 10) $\frac{\nu_0 x^2}{x^2 + a^2} \operatorname{sign} x$.

5.104. Найти логарифмический потенциал двойного слоя, расположенного на луче $\{x, y: 0 \leq x, y = 0\}$ с плотностью:

$$1) \nu_0; \quad 2) \frac{\nu_0 a^2}{x^2 + a^2}; \quad 3) \frac{\nu_0 a x}{x^2 + a^2}; \quad 4) \frac{\nu_0 x^2}{x^2 + a^2}.$$

5.105. Найти логарифмический потенциал двойного слоя, расположенного на отрезке $\{x, y: -a \leq x \leq a, y = 0\}$ с плотностью:

$$\begin{aligned} 1) \nu_0; \quad 2) \nu_0 \operatorname{sign} x; \quad 3) \frac{\nu_0 a^2}{x^2 + a^2}; \quad 4) \frac{\nu_0 a^2}{x^2 + a^2} \operatorname{sign} x; \\ 5) \frac{\nu_0 a x}{x^2 + a^2}; \quad 6) \frac{\nu_0 a |x|}{x^2 + a^2}; \quad 7) \frac{\nu_0 x^2}{x^2 + a^2}; \quad 8) \frac{\nu_0 x^2}{x^2 + a^2} \operatorname{sign} x. \end{aligned}$$

5.106. Точечным источником постоянного тока J в $\mathbb{R}^3$ называется источник, из которого в единицу времени равномерно по направлениям поступает заряд J . Найти потенциал электрического поля источника и плотность тока в пространстве.

5.107. Точечным источником постоянного тока J в $\mathbb{R}^2$ называется источник, из которого в единицу времени равномерно по направлениям поступает заряд J . Найти потенциал электрического поля источника и плотность тока в пространстве.

5.108. В области $\Omega \in \mathbb{R}^3$ течет постоянный ток, плотность которого $\mathbf{j}(P)$. Показать, что векторный потенциал магнитного поля токов

$$\mathbf{A}(M) = \frac{1}{c} \int_{\Omega} \frac{\mathbf{j}(P) d\mathbf{r}}{r_{MP}}.$$

Представить векторный потенциал кругового тока J , радиус которого r_0 , в виде ряда по присоединенным функциям Лежандра.

5.109. Заряженный шар $\Omega = \{x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 < r_0^2\}$ вращается около оси Oz с постоянной угловой скоростью ω . Определить векторный потенциал магнитного поля, если плотность заряда шара $\rho(P)$ равна: 1) ρ_0 ; 2) $\rho_0 \frac{r}{r_0}$; 3) $\rho_0 \cos \theta$; 4) $\rho_0 \frac{z}{r_0}$.

5.110. По поверхности S течет постоянный ток, поверхностная плотность которого $\mathbf{i}(P)$. Показать, что векторный потенциал магнитного поля токов

$$\mathbf{A}(M) = \frac{1}{c} \int_S \frac{\mathbf{i}(P) ds}{r_{MP}}.$$

5.111. Тонкий диск $\{x, y, z: x^2 + y^2 \leq r_0^2, z = 0\}$ вращается с постоянной угловой скоростью ω около оси Oz . Найти векторный потенциал магнитного поля токов.

5.112. Сфера $S = \{x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 = r_0^2\}$ вращается около оси Oz с постоянной угловой скоростью ω . Определить векторный потенциал магнитного поля, если поверхностная плотность заряда $\rho(P)$ равна: 1) σ_0 ; 2) $\sigma_0 \cos \theta$.

5.113. Постоянный ток J течет по прямой $L = \{x, y, z: x = y = 0, -\infty < z < \infty\}$. Показать, что

$$\mathbf{A} = \frac{2J}{c} \ln \frac{1}{r} \mathbf{e}_z, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2},$$

является (с точностью до аддитивной постоянной) векторным потенциалом магнитного поля тока и найти магнитное поле.

5.114. По цилиндру $\Omega = \{x, y, z: (x, y) \in S, -\infty < z < \infty\}$ течет постоянный ток, плотность которого $\mathbf{j}(P) = j(P) \mathbf{e}_z$. Показать, что векторный потенциал (с точностью до аддитивной постоянной) магнитного поля

$$\mathbf{A}(M) = \frac{2J}{c} \int_S \mathbf{j}(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} ds \mathbf{e}_z.$$

5.115. По цилиндру $\Omega = \{x, y, z: x^2 + y^2 < r_0^2, -\infty < z < \infty\}$ течет ток $J \mathbf{e}_z$, объемная плотность которого постоянна. Найти векторный потенциал и магнитное поле тока.

5.116. По цилиндру $\Omega = \{x, y, z: x^2 + y^2 < r_0^2, -\infty < z < \infty\}$ вдоль оси Oz течет постоянный ток, объемная плотность которого: 1) $j_0 \frac{r}{r_0}$; 2) $j_0 \sin \varphi$; 3) $j_0 \frac{r}{r_0} \cos \varphi$. Найти векторный потенциал магнитного поля тока.

5.117. В цилиндре $\Omega = \{x, y, z: (x, y) \in S, -\infty < z < \infty\}$ течет постоянный ток, объемная плотность которого $\mathbf{j}(P) = j(x, y) \mathbf{e}_\tau$, где $\mathbf{e}_\tau \mathbf{e}_z = 0$, не зависит от z . Показать, что векторный потенциал (с точностью до аддитивной постоянной) магнитного поля

$$\mathbf{A}(M) = \frac{2J}{c} \int_S \mathbf{j}(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} ds.$$

5.118. Цилиндр $\Omega = \{x, y, z: x^2 + y^2 < r_0^2, -\infty < z < \infty\}$, плотность заряда которого: 1) ρ_0 ; 2) $\rho_0 \frac{r}{r_0}$, вращается с постоянной

угловой скоростью около оси Oz . Найти векторный потенциал магнитного поля.

5.119. По цилиндрической поверхности, образующая которой параллельна оси Oz , а поперечным сечением служит линия L , течет постоянный ток, поверхностная плотность которого $i(P)\mathbf{e}_\tau$, где $\mathbf{e}_\tau\mathbf{e}_z = 0$, не зависит от z . Показать, что векторный потенциал (с точностью до аддитивной постоянной) магнитного поля

$$\mathbf{A}(M) = \frac{2J}{c} \int_L \mathbf{i}(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} dl.$$

5.120. Плотность заряда цилиндрической поверхности $S = \{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, -\infty < z < \infty\}$ равна σ_0 . Поверхность вращается с постоянной угловой скоростью около оси Oz . Найти векторный потенциал и магнитное поле (соленоид).

5.121. Постоянный ток J течет по тонкому проводнику L (L — линия в $\mathbb{R}^3$.) Показать, что векторный потенциал магнитного поля тока

$$\mathbf{A}(M) = \frac{1}{c} \int_L \frac{\mathbf{J}(P) dl}{r_{MP}}.$$

5.122. По тонкому кольцу $L = \{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, z = 0\}$ течет постоянный ток J . Векторный потенциал магнитного поля тока: 1) представить в виде ряда по присоединенным функциям Лежандра; 2) выразить через эллиптические интегралы.

5.123. Равномерно заряженный цилиндрический слой ограничен двумя подобными эллиптическими цилиндрами с общей осью. Доказать, что потенциал электростатического поля во внутренней полости постоянен.

5.124. Найти плотность заряда на поверхности проводящего эллиптического цилиндра

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (5.17)$$

заряд единицы длины которого q .

5.125. Определить плотность заряда на тонкой проводящей полосе, ширина которой $2a$, заряд единицы длины q .

5.126. В ограниченной области $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ диаметром d расположены точечные заряды q_k , координаты которых $\mathbf{r}_k(x_{k1}; x_{k2}; x_{k3})$, где $k = 1, 2, \dots, n$; полный заряд Q и дипольный момент $\mathbf{p}$

системы зарядов равны нулю. Показать, что при $|\mathbf{r}(x_1; x_2; x_3)| \gg d$ потенциал этой системы

$$u(\mathbf{r}) = \sum_{i,j=1}^3 \frac{D_{ij}x_i x_j}{r^5} + o\left(\frac{1}{r^3}\right), \quad r \rightarrow \infty,$$

где $D_{ij} = \sum_{k=1}^n q_k(3x_{ki}x_{kj} - r_k^2)$ — симметричный тензор, называемый квадрупольным моментом системы зарядов; проверить, что $\sum_{j=1}^3 D_{jj} = 0$.

5.127. Объемная плотность заряда области $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ с диаметром d есть ограниченная интегрируемая функция $\rho(\mathbf{r})$; полный заряд области Q , дипольный момент $\mathbf{p}$. Получить асимптотическое разложение потенциала

$$u(\mathbf{r}) = \frac{Q}{r} - \mathbf{p} \nabla \frac{1}{r} + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^3 \frac{D_{ij}x_i x_j}{r^5} + o\left(\frac{1}{r^3}\right), \quad r \rightarrow \infty,$$

где $Q = \int_{\Omega} \rho(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$, $\mathbf{p} = \int_{\Omega} \rho(\mathbf{r}) \mathbf{r} d\mathbf{r}$, $D_{ij} = \int_{\Omega} \rho(\mathbf{r})(3x_i x_j - r^2 \delta_{ij}) d\mathbf{r}$.

5.128. Симметричный тензор D_{ij} можно привести к главным осям. Если система зарядов аксиально симметрична относительно оси Oz , то эта ось является главной, а две другие, взаимно перпендикулярные, произвольным образом расположены в плоскости xOy . Показать, что в этом случае (см. задачу 5.129)

$$D_{xx} = D_{yy} = -\frac{1}{2}D_{zz}, \quad D_{xy} = D_{yz} = D_{zx} = 0, \\ u_3(\mathbf{r}) = \frac{D_{zz}}{2} \frac{P_2(\cos \theta)}{r^3}, \quad \cos \theta = (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_z).$$

Пример 5.8. Внутри полого, проводящего заземленного цилиндра, поперечным сечением которого является эллипс (5.17), параллельно его оси расположена бесконечная нить, координаты которой (т.е. координаты ее следа P на плоскости xOy) $x = d$, $y = 0$, $0 \leq d < c$, $c = \sqrt{a^2 - b^2}$. Определить потенциал внутри цилиндра, если линейная плотность заряда нити q (рис. 5.8). Потенциал $u(x, y)$ является решением задачи Дирихле

$$\Delta u = -4\pi q \delta(x - d) \cdot \delta(y), \quad (x, y) \in \Omega, \\ u|_S = 0, \quad (5.18)$$

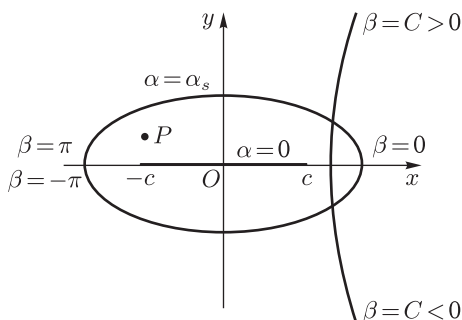


Рис. 5.8

для уравнения Пуассона в области Ω , ограниченной эллипсом $S = \partial\Omega$. Геометрия задачи обуславливает применение эллиптических координат, которые вводятся с помощью функции

$$F(\mathbf{r}, s) = \frac{x^2}{a^2 + s} + \frac{y^2}{b^2 + s} - 1, \quad 0 < b < a, \quad \mathbf{r} = x\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y.$$

При фиксированном $\mathbf{r}$ эта функция зависит от одного аргумента s ; ее график пересекает ось Os в двух точках $s = \xi$ и $s = \eta$ (рис. 5.9). Числа ξ, η называются эллиптическими координатами

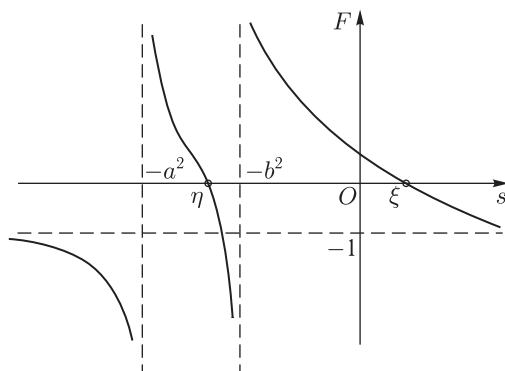


Рис. 5.9

точки $\mathbf{r}$. Уравнения $\xi(x, y) = \xi_0$ и $\eta(x, y) = \eta_0$ задают семейства софокусных эллипсов и гипербол соответственно. Из уравнений $F(\mathbf{r}, \xi) = 0$ и $F(\mathbf{r}, \eta) = 0$ следует, что

$$x^2 = \frac{(\xi + a^2)(\eta + a^2)}{a^2 - b^2}, \quad y^2 = \frac{(\xi + b^2)(\eta + b^2)}{b^2 - a^2}. \quad (5.19)$$

Используются также безразмерные эллиптические координаты (α, β) , связанные с (ξ, η) соотношениями

$$\xi + a^2 = c^2 \operatorname{ch}^2 \alpha, \quad \eta + b^2 = -c^2 \sin^2 \beta,$$

где $c^2 = a^2 - b^2$. Подстановка ξ и η в выражения (5.19) преобразует их к виду

$$x = c \operatorname{ch} \alpha \cos \beta, \quad y = c \operatorname{sh} \alpha \sin \beta, \quad 0 \leq \alpha, \quad |\beta| < \pi. \quad (5.20)$$

Координатные линии $\alpha(x, y) = C_1$ и $\beta(x, y) = C_2$ представляют собой семейства софокусных эллипсов и гипербол, образующих ортогональную сетку. Ортогональность вытекает из соотношений (5.20), записанных в форме $x + iy = c \operatorname{ch}(\alpha + i\beta)$. Так как $\gamma = \alpha + i\beta$ — аналитическая функция переменной $z = x + iy$, то согласно условиям Коши–Римана

$$(\nabla \alpha, \nabla \beta) = \alpha_x \beta_x + \alpha_y \beta_y = \alpha_x \beta_y + (-\beta_x) \alpha_y = 0.$$

Следовательно, $dl^2 = dx^2 + dy^2 = h_\alpha^2 d\alpha^2 + h_\beta^2 d\beta^2$, откуда для коэффициентов Ламе и оператора Лапласа получаются выражения

$$h_\alpha = \sqrt{x_\alpha^2 + y_\alpha^2} = c \sqrt{\operatorname{ch}^2 \alpha - \cos^2 \beta}, \quad h_\beta = \sqrt{x_\beta^2 + y_\beta^2} = h_\alpha.$$

$$\Delta = \frac{1}{c^2(\operatorname{ch}^2 \alpha - \cos^2 \beta)} \left(\frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \right).$$

Эллиптические координаты (α, β) трансформируются в полярные (r, β) при $c \rightarrow 0$, $\alpha \rightarrow \infty$, $c \operatorname{ch} \alpha \rightarrow r$.

Переход к координатам (α, β) преобразует задачу (5.18) к виду (см. (10.36))

$$u_{\alpha\alpha} + u_{\beta\beta} = -4\pi q \delta(\alpha) \cdot \delta(\beta - \beta_0), \quad 0 < \alpha < \alpha_S, \quad |\beta| < \pi, \quad (5.21)$$

$$u(\alpha_S, \beta) = 0, \quad u(\alpha, -\pi) = u(\alpha, \pi), \quad u_\beta|_{\beta=-\pi} = u_\beta|_{\beta=\pi}, \quad (5.22)$$

где $\alpha = \alpha_S$, $-\pi < \beta \leq \pi$ — уравнение эллипса (5.17) с полуосями $a = c \operatorname{ch} \alpha_S$ и $b = c \operatorname{sh} \alpha_S$, $(0, \beta_0)$ — координаты точки P , $c \cos \beta_0 = d$. Условия при $\beta = \pm\pi$ вытекают из непрерывности функции u и ее производной.

Построение решения $u(\alpha, \beta)$ осуществляется методом Фурье по схеме, изложенной в примере 2.17. Источником собственных функций служит задача Штурма–Лиувилля

$$Y''(\beta) + \lambda Y(\beta) = 0, \quad -\pi < \beta < \pi, \quad (5.23)$$

$$Y(-\pi) = Y(\pi), \quad Y'(-\pi) = Y'(\pi),$$

которая получается в результате подстановки $u = X(\alpha)Y(\beta)$ в однородное уравнение, соответствующее уравнению (5.21), и в граничные условия (5.22) при $\beta = \pm\pi$. Эта задача при $\lambda_n = n^2$ имеет нетривиальные решения

$$Y_n(\beta) = A_n \cos n\beta + B_n \sin n\beta, \quad n \in \mathbb{N}_0.$$

Результат достигается быстрее, если учесть, что потенциал есть четная функция y , поэтому $u_y(x, 0) = 0$ при $x \neq d$, или

$$\left. \frac{\partial u}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} = 0, \quad \beta \neq \beta_0, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial \beta} \right|_{\beta=0; \pm\pi} = 0, \quad 0 < \alpha < \alpha_S.$$

Итак, неоднородность в уравнении (5.21) нужно разложить в ряд по собственным функциям:

$$-4\pi q \delta(\alpha) \cdot \delta(\beta - \beta_0) = -4\pi q \delta(\alpha) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Y_n(\beta) Y_n(\beta_0)}{\|Y_n\|^2}$$

и отыскивать решение задачи также в форме ряда

$$u(\alpha, \beta) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n(\alpha) Y_n(\beta). \quad (5.24)$$

Таким образом, коэффициенты $u_n(\alpha)$ определяются условиями

$$\begin{aligned} u_n'' - n^2 u_n &= -4\pi \frac{Y_n(\beta_0)}{\|Y_n\|^2} \delta(\alpha), \quad 0 < \alpha < \alpha_S, \\ u_n(\alpha_S) &= 0, \quad \left. \frac{\partial u_n}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} = 0. \end{aligned}$$

Из эквивалентной формы этой задачи (см. гл. 10, § 2)

$$\begin{aligned} u_n'' - n^2 u_n &= 0, \quad 0 < \alpha < \alpha_S, \\ u_n(\alpha_S) &= 0, \quad \left. \frac{\partial u_n}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} = -4\pi q \frac{Y_n(\beta_0)}{\|Y_n\|^2} \end{aligned}$$

следует, что

$$u_0(\alpha) = 2q(\alpha_S - \alpha), \quad u_n(\alpha) = 4q \frac{\operatorname{sh} n(\alpha_S - \alpha) \cos n\beta_0}{n \operatorname{ch} n\alpha_S}, \quad n \in \mathbb{N}.$$

Решение задачи получается подстановкой $u_0(\alpha)$ и $u_n(\alpha)$ в (5.24):

$$u(\alpha, \beta) = 2q \left(\alpha_S - \alpha + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\operatorname{sh} n(\alpha_S - \alpha) \cos n\beta_0 \cos n\beta}{n \operatorname{ch} n\alpha_S} \right).$$

Иной подход к задаче (5.21)–(5.22) состоит в выделении частного решения уравнения Пуассона в виде потенциала нити

$$u = v + 2q \ln \frac{1}{r_{MP}},$$

где r_{MP} — расстояние между точками M и P , а v — решение задачи Дирихле для уравнения Лапласа

$$\Delta v(\alpha, \beta) = 0, \quad \alpha < \alpha_S, \quad -\pi < \beta < \pi, \quad (5.25)$$

$$v(\alpha_S, \beta) = -2q \ln \frac{1}{r_{MP}} \Big|_{M \in S}. \quad (5.26)$$

После подстановки $v = X(\alpha)Y(\beta)$ в уравнение (5.25) и определения собственных функций $Y_n(\beta)$ для $X_n(\alpha)$ получается уравнение $X_n'' - n^2 X_n = 0$, общее решение которого

$$X_0(\alpha) = A_0 + B_0\alpha, \quad X_n(\alpha) = A_n \operatorname{ch} n\alpha + B_n \operatorname{sh} n\alpha, \quad n \in \mathbb{N}.$$

Четное относительно β решение задачи (5.25)–(5.26) будет

$$v(\alpha, \beta) = A_0 + B_0\alpha + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \operatorname{ch} n\alpha + B_n \operatorname{sh} n\alpha) \cos n\beta. \quad (5.27)$$

Производные

$$v_x = v_\alpha \alpha_x + v_\beta \beta_x = \frac{1}{c(\operatorname{ch}^2 \alpha - \cos^2 \beta)} (\operatorname{sh} \alpha \cos \beta v_\alpha - \operatorname{ch} \alpha \sin \beta v_\beta),$$

$$v_y = v_\alpha \alpha_y + v_\beta \beta_y = \frac{1}{c(\operatorname{ch}^2 \alpha - \cos^2 \beta)} (\operatorname{ch} \alpha \sin \beta v_\alpha + \operatorname{sh} \alpha \cos \beta v_\beta)$$

должны быть ограничены в Ω (поле $\mathbf{E}_\sigma = -\nabla v$ зарядов, индуцированных на проводнике ограничено), поэтому $B_n = 0$ при $n \in \mathbb{N}_0$. Для определения коэффициентов A_n проще всего воспользоваться разложением в ряд по собственным функциям логарифмической функции, входящей в (5.26). Так как

$$\begin{aligned} \frac{1}{c^2} r_{MP}^2 &= \frac{1}{c^2} [(x-d)^2 + y^2] = \\ &= (\operatorname{ch} \alpha \cos \beta - \cos \beta_0)^2 + \operatorname{sh}^2 \alpha \sin^2 \beta = \\ &= \operatorname{ch}^2 \alpha - 2 \operatorname{ch} \alpha \cos \beta \cos \beta_0 + \cos^2 \beta_0 - \sin^2 \beta = \\ &= (\operatorname{ch} \alpha - \cos(\beta + \beta_0))(\operatorname{ch} \alpha - \cos(\beta - \beta_0)) = \\ &= \frac{e^{2\alpha}}{4} [1 - 2e^{-\alpha} \cos(\beta + \beta_0) + e^{-2\alpha}] \times \\ &\quad \times [1 - 2e^{-\alpha} \cos(\beta - \beta_0) + e^{-2\alpha}], \end{aligned}$$

то на основании формулы (5.16) получается разложение

$$\begin{aligned} \ln \frac{1}{r_{MP}} &= \ln \frac{2e^{-\alpha}}{c} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n(\beta + \beta_0) + \cos n(\beta - \beta_0)}{n} e^{-n\alpha} = \\ &= \ln \frac{2}{c} - \alpha + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n\alpha} \frac{\cos n\beta \cos n\beta_0}{n}. \end{aligned} \quad (5.28)$$

Для определения A_n достаточно сравнить ряды (5.27) и (5.28) при условии (5.26). В итоге

$$u(\alpha, \beta) = 2q \left(\ln \frac{c}{2r_{MP}} + \alpha_S - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-n\alpha_S} \operatorname{ch} n\alpha \cos n\beta_0 \cos n\beta}{n \operatorname{ch} n\alpha_S} \right).$$

5.129. Определить потенциал вне проводящего эллиптического цилиндра (5.17), заряд единицы длины которого q , и получить для плотности заряда формулу (5.54).

5.130. Проводящий эллиптический цилиндр (5.17) внесен в однородное электрическое поле $\mathbf{E}_0$, перпендикулярное оси цилиндра и направленное под углом φ к оси Ox . Определить потенциал результирующего поля и плотность заряда на цилиндре.

5.131. Эллиптический цилиндр (5.17), диэлектрическая проницаемость которого ε , помещен в однородное электрическое поле $\mathbf{E}_0$, перпендикулярное оси цилиндра и направленное под углом φ к оси Ox . Определить поле внутри цилиндра.

5.132. Найти потенциал эллиптического цилиндра (5.17), объемная плотность заряда которого ρ_0 , и определить нормальную E_n и тангенциальную E_τ компоненты поля на поверхности цилиндра.

5.133. Эллиптическая пластинка (полуоси эллипса a и b), толщина которой d , изготовлена из материала с проводимостью σ . Постоянный ток J втекает и вытекает через образующие $x = -a$, $y = 0$ и $x = a$, $y = 0$ соответственно, вдоль которых плотность тока постоянна. Найти потенциал электрического поля и объемную плотность тока в пластинке.

5.134. Получить решение предыдущей задачи, если теперь ток втекает через образующую $x = 0$, $y = -b$ и вытекает через образующую $x = 0$, $y = b$.

5.135. Пусть (α, β) и (α_0, β_0) — эллиптические координаты точек M и P соответственно. Доказать, что

$$\ln \frac{1}{r_{MP}} = \begin{cases} \ln \frac{2}{c} - \alpha_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-n\alpha_0}}{n} f_n(\alpha), & \alpha < \alpha_0, \\ \ln \frac{2}{c} - \alpha + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-n\alpha}}{n} f_n(\alpha_0), & \alpha > \alpha_0, \end{cases} \quad (5.29)$$

где $f_n(\alpha) = \operatorname{ch} n\alpha \cos n\beta_0 \cos n\beta + \operatorname{sh} n\alpha \sin n\beta_0 \sin n\beta$.

5.136. Внутри проводящего заземленного цилиндра (5.17) параллельно оси расположена нить с зарядом q на единицу длины. Определить плотность заряда на цилиндре, если координаты нити $x_0 = d$, $y_0 = 0$, $0 < d < c$ (см. рис. 5.8).

5.137. Найти силу, действующую на единицу длины нити, при условиях предыдущей задачи.

5.138. Найти силу, действующую на единицу длины нити (см. задачу 5.136), если ее координаты $x_0 = 0$, $y_0 = d$, $0 < d < b$.

5.139. Бесконечно длинная нить, заряд единицы длины которой q , расположена вне проводящего заземленного цилиндра (5.17) параллельно его оси. Найти потенциал вне цилиндра, плотность заряда, индуцированного на поверхности цилиндра, а также силу, действующую на единицу длины нити, если ее координаты $x_0 = d > a$, $y_0 = 0$.

5.140. Решить предыдущую задачу для нити, расположенной вне цилиндра; координаты нити $x_0 = 0$, $y_0 = d > b$.

5.141. Нить, координаты которой $x_0 = d > 0$, $y_0 = 0$, имеет заряд q на единицу длины и расположена вне проводящего, незаземленного незаряженного цилиндра (5.17) параллельно его оси. Определить потенциал электростатического поля вне цилиндра, плотность заряда, индуцированного на поверхности цилиндра, и силу, действующую на единицу длины нити.

5.142. Решить предыдущую задачу для нити, координаты которой $x_0 = 0$, $y_0 = d > b$.

5.143. Бесконечная нить расположена параллельно проводящей заземленной полосе ($|x| < a$, $y = 0$, $-\infty < z < \infty$). Найти плотность заряда, индуцированного на полосе, и силу, действующую

на единицу длины нити, если линейная плотность заряда нити q , а ее координаты $x_0 = d > a$, $y_0 = 0$.

5.144. Решить предыдущую задачу для бесконечной нити, координаты которой $x_0 = 0$, $y_0 = d > 0$.

5.145. Бесконечная нить расположена параллельно проводящей незаземленной полосе ($|x| < a$, $y = 0$, $-\infty < z < \infty$). Найти плотность заряда, индуцированного на полосе, и силу, действующую на единицу длины нити, если линейная плотность заряда нити q , а ее координаты $x_0 = d > a$, $y_0 = 0$.

5.146. Решить предыдущую задачу для нити, координаты которой $x_0 = 0$, $y_0 = d > 0$.

5.147. В среде с диэлектрической проницаемостью ε имеется полость в форме эллиптического цилиндра (5.17), внутри которой параллельно оси цилиндра расположена бесконечная нить с зарядом q на единицу длины. Какова линейная плотность силы, действующей на нить, если координаты нити $x_0 = 0$, $y_0 = d$, $0 < d < b$?

5.148. Слой из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε , ограниченный двумя эллиптическими цилиндрами

$$\frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{b_1^2} = 1, \quad \frac{x^2}{a_2^2} + \frac{y^2}{b_2^2} = 1,$$

где $a_1 < a_2$, $b_1 < b_2$, $a_1^2 - b_1^2 = a_2^2 - b_2^2 = c^2$, внесен в однородное электрическое поле $E_0 \mathbf{e}_z$. Определить поле в слое.

5.149. Параллельно оси эллиптического цилиндра (5.17), магнитная проницаемость которого μ , расположен прямой ток $J \mathbf{e}_z$. Определить магнитное поле в пространстве, если координаты тока $x_0 = d > a$, $y_0 = 0$.

5.150. Прямой ток $J \mathbf{e}_z$ расположен вне эллиптического цилиндра (5.17), магнитная проницаемость которого $\mu \gg 1$. Найти силу, действующую на единицу длины тока, если его координаты: 1) $x_0 = d$, $y_0 = 0$; 2) $x_0 = 0$, $y_0 = d$.

5.151. Слой, ограниченный двумя подобными эллипсоидами с общим центром, называется гомеоидом. Доказать, что во внутренней полости равномерно заряженного гомеоида потенциал электрического поля постоянен.

5.152. Пусть S — поверхность эллипсоида

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (5.30)$$

(S, dp) — бесконечно тонкий гомеоид, внутренняя поверхность которого S , толщина dp , а внешняя поверхность получена из S преобразованием подобия с коэффициентом $1 + dk$. Показать, что: 1) длина перпендикуляра, опущенного из центра эллипсоида на касательную плоскость к поверхности S в точке (x, y, z) , равна

$$p = \left(\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4} + \frac{z^2}{c^4} \right)^{-\frac{1}{2}};$$

2) толщина гомеоида

$$dp = p dk; \quad (5.31)$$

3) объем гомеоида

$$dV = 4\pi abc dk. \quad (5.32)$$

5.153. Показать, что плотность заряда на поверхности проводящего эллипсоида (5.30), заряд которого Q ,

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi abc \sqrt{\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4} + \frac{z^2}{c^4}}}. \quad (5.33)$$

5.154. Найти плотность заряда на тонком проводящем эллиптическом диске (5.17), заряд которого Q .

Пример 5.9. Для решения задач, связанных с эллипсоидом, используются эллипсоидальные координаты. Они вводятся с помощью дробно-рациональной функции

$$F(\mathbf{r}, s) = \frac{x^2}{a^2 + s} + \frac{y^2}{b^2 + s} + \frac{z^2}{c^2 + s} - 1, \quad 0 < c < b < a,$$

знаменатель которой

$$R^2(s) = (a^2 + s)(b^2 + s)(c^2 + s).$$

При каждом фиксированном значении $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y, z)$, $xyz \neq 0$, функция $F(\mathbf{r}, s)$ имеет три вещественных нуля ξ, η, ζ (рис. 5.10). Числа ξ, η, ζ называются эллипсоидальными координатами точки $\mathbf{r}$. Уравнения $\xi(\mathbf{r}) = C_1$, $\eta(\mathbf{r}) = C_2$, $\zeta(\mathbf{r}) = C_3$ описывают

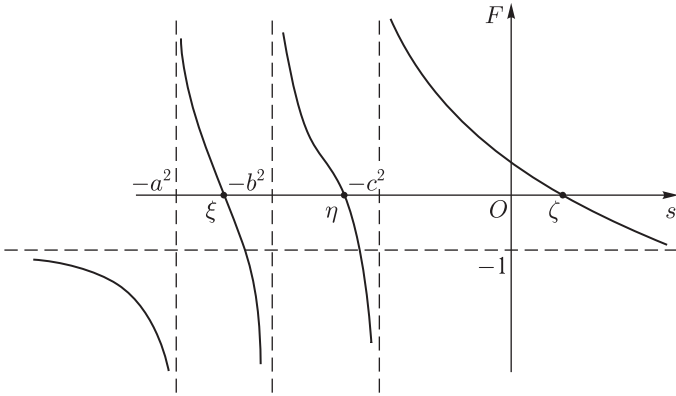


Рис. 5.10

семейства эллипсоидов, однополостных и двуполостных гиперболюидов, софокусных базисному эллипсоиду

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad 0 < c < b < a, \quad (5.34)$$

уравнение которого в эллипсоидальных координатах $\xi(\mathbf{r}) = 0$. Через каждую точку пространства проходит по одной поверхности из каждого семейства, и эти поверхности взаимно ортогональны (см задачу 5.155). Результатом совместного решения уравнений $F(\mathbf{r}, \xi) = 0$, $F(\mathbf{r}, \eta) = 0$, $F(\mathbf{r}, \zeta) = 0$ являются формулы, связывающие декартовы и эллипсоидальные координаты:

$$\begin{aligned} x^2 &= \frac{(\xi + a^2)(\eta + a^2)(\zeta + a^2)}{(b^2 - a^2)(c^2 - a^2)}, \\ y^2 &= \frac{(\xi + b^2)(\eta + b^2)(\zeta + b^2)}{(c^2 - b^2)(a^2 - b^2)}, \\ z^2 &= \frac{(\xi + c^2)(\eta + c^2)(\zeta + c^2)}{(a^2 - c^2)(b^2 - c^2)}. \end{aligned} \quad (5.35)$$

В прикладных задачах теории потенциала встречается интеграл

$$M_0(\xi) = \frac{abc}{2} \int_{\xi}^{\infty} \frac{ds}{R(s)}. \quad (5.36)$$

В частности, через $M_0(0) = M_0$ выражается потенциал $u(\mathbf{r})$ в центре $\mathbf{r} = 0$ равномерно заряженного эллипсоида Ω , который

определен уравнением (5.34). В сферических координатах потенциал в центре

$$\begin{aligned}
 u(0) &= \int_{\Omega} \rho_0 \frac{d\mathbf{r}}{r} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta \int_0^{r(\theta, \varphi)} \rho_0 r dr = \\
 &= 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho_0 \sin \theta r^2(\theta, \varphi) d\theta = 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta d\theta \times \\
 &\times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\rho_0 d\varphi}{\left(\frac{\sin^2 \theta}{a^2} + \frac{\cos^2 \theta}{c^2} \right) \cos^2 \varphi + \left(\frac{\sin^2 \theta}{b^2} + \frac{\cos^2 \theta}{c^2} \right) \sin^2 \varphi} = \\
 &= 2\pi \rho_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \theta d\theta}{\sqrt{\left(\frac{\sin^2 \theta}{a^2} + \frac{\cos^2 \theta}{c^2} \right) \left(\frac{\sin^2 \theta}{b^2} + \frac{\cos^2 \theta}{c^2} \right)}}.
 \end{aligned}$$

Подстановка $s = c^2 \operatorname{tg}^2 \theta$ преобразует интеграл к виду

$$u(0) = \pi abc \rho_0 \int_0^{\infty} \frac{ds}{R(s)} = 2\pi \rho_0 M_0.$$

5.155. Выразить M_0 через эллиптический интеграл:

$$M_0 = \frac{abc}{\sqrt{a^2 - c^2}} F(\varphi, k), \quad \cos \varphi = \frac{c}{a}, \quad k = \sqrt{\frac{a^2 - c^2}{a^2 - b^2}}.$$

5.156. Определить потенциал во внутренней полости равномерно заряженного: 1) гомеоида (см. задачу 5.151), ограниченного эллипсоидами с полуосями a, b, c и ka, kb, kc , $k > 0$, заряд которого Q ; 2) бесконечно тонкого гомеоида, заряд которого dQ .

5.157. Доказать ортогональность эллипсоидальных координат и получить следующие выражения для коэффициентов Ламе и оператора Лапласа:

$$h_{\xi} = \frac{\sqrt{(\xi - \eta)(\xi - \zeta)}}{2R(\xi)}, \quad h_{\eta} = \frac{\sqrt{(\eta - \zeta)(\eta - \xi)}}{2R(\eta)}, \quad h_{\zeta} = \frac{\sqrt{(\zeta - \xi)(\zeta - \eta)}}{2R(\zeta)};$$

$$\Delta = \frac{4}{(\xi - \eta)(\eta - \zeta)(\zeta - \xi)} \left[(\eta - \zeta)R(\xi) \frac{\partial}{\partial \xi} \left(R(\xi) \frac{\partial}{\partial \xi} \right) + \right. \\ \left. + (\zeta - \xi)R(\eta) \frac{\partial}{\partial \eta} \left(R(\eta) \frac{\partial}{\partial \eta} \right) + (\xi - \eta)R(\zeta) \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(R(\zeta) \frac{\partial}{\partial \zeta} \right) \right].$$

5.158. Определить потенциал вне проводящего эллипсоида (5.30), заряд которого Q , и получить формулу (5.33).

5.159. Внешними потенциальными факторами называются интегралы

$$M_{lmn}(\xi) = (-1)^{l+m+n} \left(\frac{\partial}{\partial a} \frac{1}{a} \right)^l \left(\frac{\partial}{\partial b} \frac{1}{b} \right)^m \left(\frac{\partial}{\partial c} \frac{1}{c} \right)^n M_0(\xi), \quad (5.37)$$

где $M_0(\xi) = M_{000}(\xi)$ — интеграл (5.36). Доказать, что

$$M_{100}(\xi) + M_{010}(\xi) + M_{001}(\xi) = \frac{abc}{R(\xi)}, \quad (5.38)$$

$$a^2 M_{100}(\xi) + b^2 M_{010}(\xi) + c^2 M_{001}(\xi) = M_0(\xi) - \frac{abc}{R(\xi)} \xi. \quad (5.39)$$

5.160. Внутренними потенциальными факторами называются интегралы (5.37) при $\xi = 0$. Если $l + m + n = 1$, то три величины $M_{lmn}(0)$ называются также коэффициентами размагничивания (или коэффициентами деполяризации) и обозначаются символами $M_{100}(0) = M_a$, $M_{010}(0) = M_b$, $M_{001}(0) = M_c$. Показать, что коэффициенты деполяризации выражаются через эллиптические интегралы следующим образом:

$$M_a = \frac{abc}{(a^2 - b^2)\sqrt{a^2 - c^2}} [F(\varphi, k) - E(\varphi, k)], \\ M_b = -\frac{abc}{(a^2 - b^2)\sqrt{a^2 - c^2}} F(\varphi, k) + \frac{abc\sqrt{a^2 - c^2}}{(a^2 - b^2)(b^2 - c^2)} E(\varphi, k) - \frac{c^2}{b^2 - c^2}, \\ M_c = -\frac{abc}{(b^2 - c^2)\sqrt{a^2 - c^2}} E(\varphi, k) + \frac{b^2}{b^2 - c^2},$$

где $F(\varphi, k)$ и $E(\varphi, k)$ — эллиптические интегралы, соответственно, первого и второго рода, $\varphi = \arccos \frac{c}{a}$, $k = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2 - c^2}}$.

5.161. Вычислить внешние потенциальные факторы $M_{lmn}(\xi)$, определенные в (5.37), при $l + m + n \leq 1$, если: 1) $a > b = c$; 2) $a = b > c$.

5.162. Решить задачу 5.158 для вытянутого эллипсоида вращения с полуосями $a > b = c$.

5.163. Найти потенциал и линейную плотность заряда металлической иглы, полный заряд которой Q . Игла занимает отрезок $[-a, a]$ оси Oz .

5.164. Решить задачу 5.158 для сплюснутого эллипсоида вращения с полуосями $a = b > c$.

5.165. Найти потенциал металлического диска, радиус которого r_0 , заряд Q . Диск расположен на плоскости $z = 0$, его центр находится в начале координат.

5.166. Проводящий эллипсоид (5.30) помещен в однородное электрическое поле $E_0 \mathbf{e}_x$. Определить потенциал вне эллипсоида.

5.167. Определить плотность заряда, индуцированного на поверхности проводящего эллипсоида (5.30), помещенного в однородное электростатическое поле $\mathbf{E}_0 = E_{0x} \mathbf{e}_x + E_{0y} \mathbf{e}_y + E_{0z} \mathbf{e}_z$.

5.168. Тонкий проводящий эллиптический диск (полуоси эллипса a и b , $a > b$) находится в однородном электрическом поле $\mathbf{E}_0$, направленном: 1) по большой оси; 2) по малой оси диска. Найти плотность заряда на диске.

5.169. Круглый тонкий проводящий диск, радиус которого r_0 , находится в продольном электрическом поле $\mathbf{E}$. Определить плотность заряда на диске.

5.170. Проводящий, вытянутый (вдоль оси Ox) эллипсоид с полуосями $a > b = c$ находится в однородном электрическом поле $\mathbf{E}_0$. Найти потенциал вне эллипсоида и плотность заряда на его поверхности, если: 1) $\mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{e}_x$; 2) $\mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{e}_z$.

5.171. Проводящий, сплюснутый (вдоль оси Oz) эллипсоид с полуосями $a = b > c$ находится в однородном электрическом поле $\mathbf{E}_0$. Определить плотность заряда на эллипсоиде в следующих случаях: 1) $\mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{e}_x$; 2) $\mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{e}_z$.

5.172. Эллипсоид (5.30) находится в однородном магнитном поле $\mathbf{H}_0 = H_{0x} \mathbf{e}_x + H_{0y} \mathbf{e}_y + H_{0z} \mathbf{e}_z$. Определить поле $\mathbf{H}$ внутри эллипсоида, если его магнитная проницаемость μ .

5.173. Вытянутый (вдоль оси Ox) эллипсоид вращения с полуосями $a > b = c$ помещен в однородное электрическое поле $E_0 \mathbf{e}_z$. Определить поле $\mathbf{E}$ внутри эллипсоида, если его диэлектрическая проницаемость ε .

5.174. Сплюснутый (вдоль оси Oz) эллипсоид вращения с полуосями $a = b > c$, магнитная проницаемость которого μ , находится в однородном магнитном поле $H_0 \mathbf{e}_z$. Найти поле $\mathbf{H}$ внутри эллипсоида.

5.175. Точки $\mathbf{r}$ и $\mathbf{r}'$, принадлежащие эллипсоидам S и S' , уравнения которых, соответственно,

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1; \quad \frac{x^2}{a'^2} + \frac{y^2}{b'^2} + \frac{z^2}{c'^2} = 1,$$

называются взаимными, если

$$\frac{x}{a} = \frac{x'}{a'}, \quad \frac{y}{b} = \frac{y'}{b'}, \quad \frac{z}{c} = \frac{z'}{c'}. \quad (5.40)$$

1) Пусть dp и dp' — толщины, $\Delta V = dp \Delta S$ и $\Delta V' = dp' \Delta S'$ — элементарные объемы, dV и dV' — объемы бесконечно тонких гомеоидов (см. задачу 5.151) (S, dp) и (S', dp') (см. задачу 5.152). Доказать, что если границы элементарных площадок ΔS и $\Delta S'$ состоят из взаимных точек, то

$$\frac{\Delta V}{\Delta V'} = \frac{dV}{dV'}. \quad (5.41)$$

2) Пусть $\mathbf{r}, \mathbf{r}'$ и $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}'_1$ — две пары взаимных точек на эллипсоидах S и S' . Доказать, что если эллипсоиды софокусны, то

$$|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_1| = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}_1|. \quad (5.42)$$

5.176. Пусть (S, dp) и (S', dp') — софокусные гомеоиды (см. задачу 5.151), объемы которых dV и dV' , плотности заряда $\rho(\mathbf{r})$ и $\rho'(\mathbf{r}')$, потенциалы $du(\mathbf{r})$ и $du'(\mathbf{r}')$ соответственно. Доказать следующее свойство потенциалов (теорема взаимности): если $dV = dV'$, $\rho(\mathbf{r}) = \rho'(\mathbf{r}')$, где $\mathbf{r}$ и $\mathbf{r}'$ — взаимные точки, то

$$du(\mathbf{r}') = du'(\mathbf{r}). \quad (5.43)$$

5.177. 1) Определить потенциал внешнего поля равномерно заряженного гомеоида (S, dp) (см. задачу 5.151), полный заряд которого dQ . 2) Получить формулу (5.57). 3) Показать, что эквипотенциальными поверхностями внешнего поля равномерно заряженного гомеоида (S, dp) являются софокусные с S эллипсоиды. 4) Доказать, что внешние поля двух равномерно заряженных софокусных гомеоидов (S_1, dp_1) и (S_2, dp_2) с одинаковыми зарядами равны.

5.178. Определить потенциал и напряженность электростатического поля вне и внутри равномерно заряженного эллипсоида

с полуосями a, b, c ($a > b > c$), объемная плотность заряда которого равна ρ_0 .

5.179. Найти квадрупольный момент равномерно заряженного эллипсоида с полуосями a, b, c , заряд которого Q .

5.180. Если базисный эллипсоид (5.34) представляет собой тело вращения относительно оси Oz ($a = b > c$), то координата ζ (пример 5.9) вырождается в константу $-a^2$. Вместо ζ вводят полярный угол φ в плоскости xOy , полагая

$$\cos^2 \varphi = \frac{\zeta + a^2}{a^2 - b^2},$$

(так как $-a^2 < \zeta < -b^2$, то $0 < \zeta + a^2 < a^2 - b^2$). Значения $\cos \varphi$ при $b \rightarrow a$ определяются характером стремления величины ζ к $-a^2$. Числа (ξ, η, φ) называются сплюснутыми сфероидальными координатами точки $\mathbf{r}$. Связь между декартовыми координатами (x, y, z) и сфероидальными координатами (ξ, η, φ) устанавливается формулами (5.35):

$$x = \rho \cos \varphi, \quad y = \rho \sin \varphi, \quad z^2 = \frac{(\xi + c^2)(\eta + c^2)}{c^2 - a^2}, \quad (5.44)$$

где $\rho = \left[\frac{(\xi + a^2)(\eta + a^2)}{a^2 - c^2} \right]^{\frac{1}{2}}$. Переход к безразмерным сфероидальным координатам (α, β, φ) по формулам

$$\xi = d^2 \operatorname{ch}^2 \alpha - a^2, \quad \eta = -d^2 \cos^2 \beta - c^2, \quad d^2 = a^2 - c^2$$

преобразует соотношения (5.44) к виду

$$x = d \operatorname{ch} \alpha \sin \beta \cos \varphi, \quad y = d \operatorname{ch} \alpha \sin \beta \sin \varphi, \quad z = d \operatorname{sh} \alpha \cos \beta, \\ 0 \leq \alpha < \infty, \quad 0 \leq \beta \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi < 2\pi.$$

Показать, что: 1) система координат (α, β, φ) ортогональна; 2) координатные поверхности $\alpha = \alpha_0$ — сплюснутые эллипсоиды вращения, а поверхности $\beta = \beta_0$ — однополостные гиперboloиды вращения, поверхности $\varphi = \varphi_0$ — плоскости (рис. 5.11); 3) коэффициенты Ламе и оператор Лапласа имеют вид

$$h_\alpha = h_\beta = d \sqrt{\operatorname{ch}^2 \alpha - \sin^2 \beta}, \quad h_\varphi = d \operatorname{ch} \alpha \sin \beta, \\ \Delta = \frac{1}{h_\alpha h_\beta} \left[\frac{1}{\operatorname{ch} \alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} \operatorname{ch} \alpha \frac{\partial}{\partial \alpha} + \frac{1}{\sin \beta} \frac{\partial}{\partial \beta} \sin \beta \frac{\partial}{\partial \beta} + \left(\frac{1}{\sin^2 \beta} - \frac{1}{\operatorname{ch}^2 \alpha} \right) \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right].$$

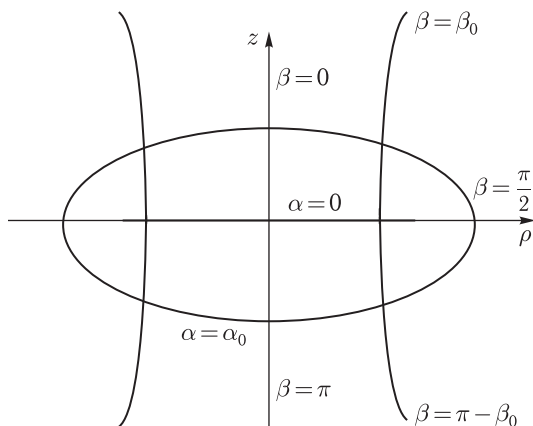


Рис. 5.11

5.181. Потенциал поверхности сплюснутого эллипсоида вращения является аксиально симметричной функцией относительно оси вращения. Определить потенциал внутри и вне эллипсоида.

5.182. Решить предыдущую задачу, если потенциал поверхности равен: u_1 при $z < 0$, u_2 при $z > 0$.

5.183. Решить задачу 5.181 для проводящего эллипсоида, потенциал которого u_0 ; определить плотность заряда на поверхности эллипсоида и его емкость.

5.184. Тонкий металлический диск, радиус которого r_0 , заряжен до потенциала u_0 . Определить плотность заряда и емкость диска.

5.185. Постоянный ток J втекает в полупространство $z > 0$, проводимость которого σ , через проводник в форме сплюснутого полуэллипсоида вращения $\left(\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, z < 0, a > c\right)$. Определить потенциал электрического поля в полупространстве, плотность тока на поверхности S проводника, сопротивление проводника.

5.186. Если $a > b = c$, то эллипсоидальные координаты (ξ, η, ζ) (см. пример 5.9) вырождаются. Показать, что:

1) можно ввести, так называемые, вытянутые сфероидальные координаты (α, β, φ) , которые связаны с декартовыми координатами (x, y, z) соотношениями (см. задачу 5.180)

$$x = d \operatorname{sh} \alpha \sin \beta \cos \varphi, \quad y = d \operatorname{sh} \alpha \sin \beta \sin \varphi, \quad z = d \operatorname{ch} \alpha \cos \beta, \\ 0 \leq \alpha < \infty, \quad 0 \leq \beta \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi < 2\pi,$$

где $d = \sqrt{a^2 - b^2}$, и представляют собой ортогональную координатную систему;

2) координатными поверхностями являются вытянутые (вдоль оси Oz) эллипсоиды вращения ($\alpha = \alpha_0$), двуполостные гиперboloиды вращения ($\beta = \beta_0$), плоскости ($\varphi = \varphi_0$), проходящие через ось Oz (рис. 5.12); 3) коэффициенты Ламе и оператор Лапласа

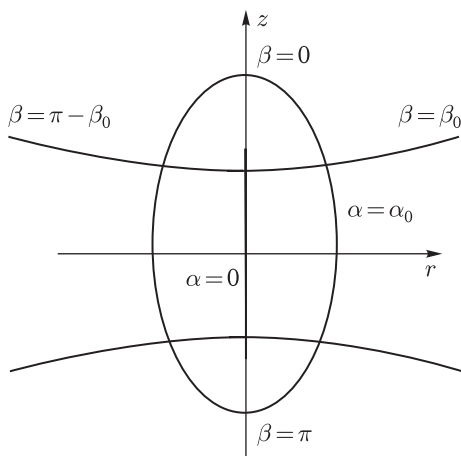


Рис. 5.12

имеют вид

$$h_\alpha = h_\beta = d \sqrt{\text{sh}^2 \alpha + \sin^2 \beta}, \quad h_\varphi = d \text{sh} \alpha \sin \beta,$$

$$\Delta = \frac{1}{h_\alpha h_\beta} \left[\frac{1}{\text{sh} \alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} \text{sh} \alpha \frac{\partial}{\partial \alpha} + \frac{1}{\sin \beta} \frac{\partial}{\partial \beta} \sin \beta \frac{\partial}{\partial \beta} + \left(\frac{1}{\text{sh}^2 \alpha} + \frac{1}{\sin^2 \beta} \right) \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right].$$

5.187. Потенциал поверхности вытянутого эллипсоида вращения — аксиально симметричная функция относительно оси вращения. Определить потенциал электростатического поля внутри и вне эллипсоида.

5.188. Решить предыдущую задачу для проводящего эллипсоида, потенциал которого u_0 . Каковы плотность заряда и емкость эллипсоида?

5.189. Решить задачу 5.185 для проводника, имеющего форму вытянутого полуэллипсоида вращения

$$\left\{ x, y, z: \frac{x^2 + y^2}{b^2} + \frac{z^2}{a^2} = 1, z > 0 \right\}.$$

5.2. Решение задач методом потенциалов

Одно из приложений потенциалов — сведение задач Дирихле и Неймана к интегральному уравнению Фредгольма второго рода; в первом случае применяется потенциал двойного слоя, во втором — простого слоя.

Пример 5.10. Решить задачу Дирихле для уравнения Лапласа в шаре

$$\begin{aligned}\Delta u(M) &= 0, \quad M \in B(r_0), \\ u|_{S(r_0)} &= f(M), \\ u(M) &\in C^2(B(r_0)) \cap C(\overline{B}(r_0)), \quad f(M) \in C(S).\end{aligned}$$

Потенциал двойного слоя

$$u(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}^2} ds,$$

где $S = \partial B$, является гармонической функцией в шаре и может служить решением задачи Дирихле. При стремлении M к точке на S непрерывная в $\overline{B}$ функция $u \rightarrow f$; соотношение (5.7) приводит к интегральному уравнению

$$\nu(M) = \frac{1}{2\pi} \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}^2} ds - \frac{1}{2\pi} f(M), \quad M \in S,$$

для неизвестной плотности $\nu(P)$. Так как (рис. 5.13, а)

$$r_{MP} = 2r_0 \cos(\pi - \varphi_{PM}), \quad r_{MP}^2 = 2r_0^2(1 - \cos \gamma),$$

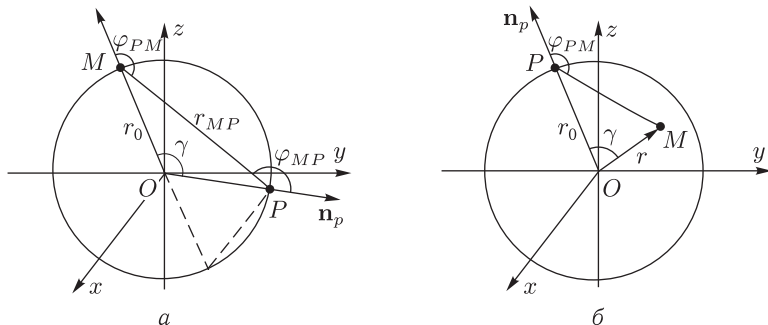


Рис. 5.13

то интегральное уравнение преобразуется к виду

$$\nu(\theta, \varphi) = -\frac{1}{4\sqrt{2}\pi r_0^2} \int_S \frac{\nu(\theta', \varphi') ds'}{\sqrt{1 - \cos \gamma}} - \frac{u_0}{2\pi} \cos \theta.$$

Отсюда (задача 3.393)

$$\nu = -\frac{3u_0 \cos \theta}{8\pi},$$

следовательно, решение задачи Дирихле в шаре

$$u(M) = -\frac{3u_0}{8\pi} \int_{S_1} \frac{\cos \theta' \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}^2} r_0^2 ds'.$$

Координаты точек: $P(r_0, \theta', \varphi') \in S$ и $M(r, \theta, \varphi) \in B$, связаны соотношениями (см. рис. 5.13, б)

$$r \cos \gamma + r_{MP} \cos(\pi - \varphi_{PM}) = r_0, \quad r_{MP}^2 = r_0^2 + r^2 - 2r r_0 \cos \gamma,$$

поэтому при $\frac{r}{r_0} = t < 1$

$$\begin{aligned} \frac{r_0^2 \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}^2} &= \frac{t \cos \gamma - 1}{(1 + t^2 - 2t \cos \gamma)^{\frac{3}{2}}} = \\ &= -\frac{d}{dt} \frac{t}{\sqrt{1 + t^2 - 2t \cos \gamma}} = -\sum_{n=0}^{\infty} (n+1) t^n P_n(\cos \gamma). \end{aligned} \quad (5.45)$$

Таким образом,

$$u(M) = \frac{3u_0}{8\pi} \int_{S_1} \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) t^n P_n(\cos \gamma) \cos \theta' ds'.$$

Ряд под интегралом равномерно сходится на S_1 , и его можно почленно интегрировать. Этим оправдано применение формулы (5.15), на основании которой

$$u = \frac{u_0 r}{r_0} \cos \theta.$$

5.190. Решить внутреннюю задачу Дирихле для шара, радиус которого r_0 , если функция $u(r_0, \theta, \varphi)$ равна:

1) u_0 ; 2) $u_0 \sin \theta \sin \varphi$; 3) $u_0 \cos 3\theta$; 4) $u_0 \sin^3 \theta \sin 3\varphi$.

5.191. Решить внутреннюю задачу Дирихле для шара, радиус которого r_0 , если $u(r_0, \theta, \varphi) = f(\theta, \varphi)$.

5.192. 1) Преобразованием инверсии (или преобразованием обратных радиусов-векторов) относительно сферы $S(r_0) \in \mathbb{R}^3$ называется отображение, при котором каждой точке $M(\mathbf{r})$, $r \neq 0$, ставится в соответствие точка $M'(\mathbf{R})$ по закону

$$\mathbf{R} = \frac{r_0^2}{r^2} \mathbf{r}.$$

Показать, что преобразование инверсии взаимно однозначно отображает внешность шара $B(r_0)$ на область $B(r_0) \setminus \{O\}$, точки M и M' , называемые сопряженными (или симметричными) относительно сферы $S(r_0)$, лежат на одном луче с началом O в центре сферы, а произведение их расстояний до точки O равно квадрату радиуса сферы, т. е. $rR = r_0^2$.

2) Преобразованием Кельвина функции $u(\mathbf{r})$, гармонической вне шара $B(r_0)$, называется функция

$$U(\mathbf{R}) = \frac{r_0^2}{R} u\left(\frac{r_0^2}{R^2} \mathbf{R}\right).$$

Доказать, что $U(\mathbf{R})$ — гармоническая функция в $B(r_0) \setminus \{O\}$ (теорема Кельвина).

3) Если функция $u(\mathbf{r})$ — гармоническая вне шара $B(r_0)$ и $u(\infty) = 0$, то

$$u(\mathbf{r}) = O\left(\frac{1}{r}\right), \quad \nabla u(\mathbf{r}) = O\left(\frac{1}{r^2}\right), \quad r \rightarrow \infty.$$

Доказать это утверждение.

5.193. Показать, что решение внешней задачи Дирихле

$$\begin{aligned} \Delta u(M) &= 0, \quad M \in \Omega = \mathbb{R}^3 \setminus \overline{B}(r_0), \\ u|_{r=r_0} &= f(M), \quad M \in S = \partial B(r_0), \quad \lim_{M \rightarrow \infty} u(M) = 0, \\ u(M) &\in C^2(\Omega) \cap C(\overline{\Omega}), \quad f(M) \in C(S), \end{aligned}$$

определяется интегралом

$$\begin{aligned} u(r, \theta, \varphi) &= \frac{r_0}{4\pi} \int_{S_1} \frac{(r^2 - r_0^2) f(\theta', \varphi') \sin \theta' d\theta' d\varphi'}{(r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \gamma)^{\frac{3}{2}}}, \\ \cos \gamma &= \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos(\varphi - \varphi'). \end{aligned}$$

5.194. Найти решение внешней задачи Дирихле для шара, радиус которого r_0 , если $u(r_0, \theta, \varphi)$ равна:

- 1) u_0 ; 2) $\sin^2 \theta \cos 2\varphi$; 3) $u_0 \sin \theta \cos^3 \theta \sin \varphi$; 4) $\sin 2\theta \cos \varphi$.

5.195. Решить задачу Неймана в шаре

$$\Delta u(M) = 0, \quad M \in B(r_0) \in \mathbb{R}^3,$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{S(r_0)} = f(M), \quad \int_{S(r_0)} f(P) \, ds = 0,$$

$$u(M) \in C^2(B(r_0)) \cap C^1(\overline{B}(r_0)), \quad f(M) \in C(S(r_0)),$$

где $\mathbf{n}$ — внешняя нормаль к $S(r_0)$.

5.196. Решить задачу Неймана в шаре, радиус которого r_0 (см. предыдущую задачу), если: 1) $f(\theta, \varphi) = q_0 \sin \theta \cos \varphi$; 2) $f(\theta, \varphi) = q_0 Y_n^m(\theta, \varphi)$.

5.197. Решить внешнюю задачу Неймана для шара

$$\Delta u(M) = 0, \quad M \in \Omega = \mathbb{R}^3 \setminus \overline{B}(r_0),$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{S(r=r_0)} = f(M), \quad \lim_{M \rightarrow \infty} u(M) = 0,$$

$$u(M) \in C^2(\Omega) \cap C^1(\overline{\Omega}), \quad f(M) \in C(S),$$

где $\mathbf{n}$ — внешняя нормаль к $\partial\Omega$.

5.198. В однородном шаре $\{x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 = r_0^2\}$ течет постоянный ток J , координаты точек входа и выхода которого соответственно равны $x = y = 0, z = -r_0$ и $x = y = 0, z = r_0$. Найти электростатический потенциал внутри шара, если проводимость шара σ .

5.199. Решить задачу Неймана вне шара, радиус которого r_0 (см. предыдущую задачу), если: 1) $f(\theta, \varphi) = q_0$, 2) $f(\theta, \varphi) = q_0 Y_n^m(\theta, \varphi)$.

5.200. На поверхности шара, радиус которого r_0 , происходит теплообмен по закону Ньютона с внешней средой, температура которой $f(\theta, \varphi)$. Найти стационарное распределение температуры в шаре. Рассмотреть частный случай $f(\theta, \varphi) = u_0 Y_n^m(\theta, \varphi)$.

5.201. В неограниченной среде имеется сферическая полость, радиус которой r_0 ; температура полости $f(\theta, \varphi)$. Определить стационарную температуру среды, если на границе с полостью происходит теплообмен по закону Ньютона. Рассмотреть частный случай $f(\theta, \varphi) = u_0 Y_n^m(\theta, \varphi)$.

Пример 5.11. Решить задачу Дирихле для уравнения Лапласа в полупространстве $z > 0$ при условии $u(x, y, 0) = f(x, y)$.

Решение задачи

$$\begin{aligned}\Delta u(x, y, z) &= 0, \\ M(x, y, z) \in \Omega &= \{x, y, z: -\infty < x, y < \infty, 0 < z\}, \\ u(x, y, 0) &= f(x, y)\end{aligned}$$

можно представить в виде потенциала двойного слоя

$$u(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM} ds}{r_{PM}},$$

лапласиан которого равен нулю. Неизвестную функцию нужно выбрать так, чтобы было выполнено граничное условие при $z = 0$. Свойство (5.7) потенциала двойного слоя

$$u_-(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}^2} ds - 2\pi\nu(M), \quad M \in S,$$

где $u_-(M_0) = \lim_{\substack{M \rightarrow M_0 \in S \\ M \in \Omega}} u(M) = f(M_0)$,

представляет собой интегральное уравнение Фредгольма второго рода с неизвестной функцией $\nu(P)$:

$$\nu(M_0) = -\frac{1}{2\pi} \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM_0}}{r_{M_0P}^2} ds - \frac{1}{2\pi} f(M_0), \quad M_0 \in S.$$

Так как точка $M_0 \in S$, то в данном случае

угол $\varphi_{PM_0} = \frac{\pi}{2}$ (рис. 5.14), $\cos \varphi_{PM_0} = 0$,

$\nu(M) = -\frac{1}{2\pi} f(M)$ — решение интегрального уравнения, так что

$$u(M) = -\frac{1}{2\pi} \int_S \frac{f(P) \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}^2} ds, \quad M \in \Omega.$$

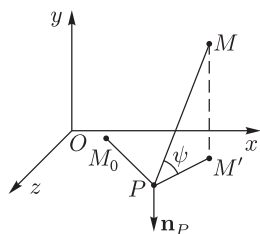


Рис. 5.14

В треугольнике MPM' , где M' — проекция точки M на плоскость S , угол $\varphi_{PM} = \frac{\pi}{2} + \psi$, поэтому

$$-\cos \varphi_{PM} = -\cos \left(\frac{\pi}{2} + \psi \right) = \sin \psi = \frac{z}{r_{MP}}.$$

Гипотенуза прямоугольного треугольника MPM' равна $r_{PM} = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z^2}$, стало быть, решение задачи

Дирихле

$$u(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{zf(\xi, \eta)d\xi d\eta}{[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}}. \quad (5.46)$$

Плоскость $z = 0$ не является поверхностью Ляпунова, поэтому нужно показать, что функция $u(x, y, z)$, определенная формулой (5.46), удовлетворяет условиям задачи Дирихле. Справедливо утверждение:

если $f(x, y)$ — ограниченная кусочно-непрерывная функция, то на множестве ограниченных функций решение задачи Дирихле в полупространстве существует, единственно и определяется формулой (5.46) (см. [83], лекция XIII).

Доказательство существования решения. Итак, по условию есть такая константа $A > 0$, что $|f(x, y)| < A$. Прежде всего нужно установить, что производные функции $u(x, y, z)$ по x, y, z могут быть вычислены дифференцированием под знаком интеграла. Пусть M и M' — точки с координатами x, y, z и $x' = x + \Delta x, y, z$ соответственно, где $z > 0$. Приращение функции $u(M)$

$$\Delta u(M) = u(M') - u(M) = \frac{1}{2\pi} \int_S z f(P) \left(\frac{1}{r_{M'P}^3} - \frac{1}{r_{MP}^3} \right) ds$$

после применения формулы Тейлора с остаточным членом в форме Лагранжа к разности

$$\frac{1}{r_{M'P}^3} - \frac{1}{r_{MP}^3} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{1}{r_{PM}^3} \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{r_{P\overline{M}}^3} \Delta x^2,$$

где $\overline{M}$ — точка с координатами $\overline{x} = x + \theta \Delta x, y, z$, $0 < \theta < 1$, приобретает вид

$$\Delta u(M) = \left[\frac{1}{2\pi} \int_S z f(P) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{1}{r_{PM}^3} ds + \frac{z}{4\pi} \int_S f(P) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{1}{r_{P\overline{M}}^3} ds \Delta x \right] \Delta x.$$

Таким образом,

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{1}{2\pi} \int_S z f(P) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{1}{r_{PM}^3} ds + \frac{z}{4\pi} \int_S f(P) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{1}{r_{P\overline{M}}^3} ds \Delta x.$$

Производная u_x — результат перехода к пределу при $\Delta x \rightarrow 0$. Первое слагаемое от Δx не зависит, так что остается оценить второй интеграл. Поскольку

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{1}{r_{PM}^3} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{1}{r_{PM}^3} \Big|_{M=\bar{M}} = \frac{3}{r_{PM}^5} \left(-1 + \frac{5(\xi - x)^2}{r_{PM}^2} \right),$$

то

$$\left| \frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{1}{r_{PM}^3} \right| \leq \frac{3}{r_{PM}^5} \left(1 + \frac{5(\xi - \bar{x})^2}{r_{PM}^2} \right) \leq \frac{18}{r_{PM}^5}.$$

Для второго интеграла получается оценка, при выводе которой сделана замена $\xi - \bar{x} = r \cos \varphi$, $\eta - y = r \sin \varphi$,

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{4\pi} \int_S z f(P) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{1}{r_{PM}^3} ds \right| &\leq \frac{9zA}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{d\xi d\eta}{[(\xi - \bar{x})^2 + (\eta - y)^2 + z^2]^{\frac{5}{2}}} = \\ &= \frac{9zA}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\infty} \frac{r dr}{(r^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} = \frac{3A}{2z}. \end{aligned}$$

Это неравенство выполняется равномерно по Δx в некоторой окрестности $\Delta x = 0$, следовательно, интеграл во втором слагаемом равномерно сходится (относительно Δx) и имеет конечный предел при $\Delta x \rightarrow 0$. В итоге

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2\pi} \int_S z f(P) \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{r_{PM}^3} ds.$$

Доказательство этого свойства для других производных проводится аналогично.

Следствием полученных результатов являются свойства:

$$\begin{aligned} \forall z > 0: |u(M)| &\leq C, \quad |u_r(M)| \leq C; \\ \forall z > 0: u(M) &= O\left(\frac{1}{r}\right), \quad u_r(M) = O\left(\frac{1}{r^2}\right) \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (5.47)$$

Доказательство:

$$\begin{aligned} |u(M)| &\leq \frac{A}{2\pi} \iint_S \frac{dS}{r_{MP}^3} = A, \\ |u_x(M)| &\leq \frac{3Az}{2\pi} \iint_S \frac{|\xi - x| dS}{r_{MP}^5} \leq \iint_S \frac{dS}{r_{MP}^2} = \frac{3C_1 A}{2\pi z}. \end{aligned}$$

Для u_y имеет место аналогичная оценка, следовательно, она верна и для $u_r = u_x x_r + u_y y_r$. Вывод асимптотики решения при $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \rightarrow \infty$ достаточно провести (ввиду симметрии интеграла (5.46) по x и y) при $y = 0$. Пусть

$$\frac{\xi}{R} = s, \quad \frac{\eta}{R} = t, \quad \frac{x}{R} = k, \quad |k| < 1,$$

тогда

$$\begin{aligned} r_{MP}^2 &= (\xi - x)^2 + \eta^2 + z^2 = \\ &= R^2(s^2 - 2sk + 1 + t^2) = R^2((s - k)^2 + t^2 + 1 - k^2). \end{aligned}$$

Справедливы оценки

$$|u(M)| \leq \frac{Az}{2\pi} \iint_S \frac{dS}{r_{MP}^3} = \frac{Az}{2\pi R} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{ds dt}{((s - k)^2 + t^2 + 1 - k^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{C}{R},$$

$$|u_x(M)| \leq \frac{3A}{2\pi R^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{ds dt}{((s - k)^2 + t^2 + 1 - k^2)^2} = \frac{C}{R^2}.$$

Остается заметить, что $\frac{1}{R} = O\left(\frac{1}{r}\right)$, $r \rightarrow \infty$.

Интеграл в формуле (5.46) представляет собой потенциал двойного слоя с плотностью $\nu(P)$, и его можно записать в виде (см. задачу 5.58)

$$w(M) = \int_S \nu(P) \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r_{MP}} ds.$$

Дифференцирование по координатам точки M

$$\Delta_M u(M) = \Delta_M \int_S \nu(P) \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r_{MP}} ds = \int_S \nu(P) \frac{\partial}{\partial n} \Delta_M \frac{1}{r_{MP}} ds = 0$$

показывает, что функция $u(M)$ — решение уравнения Лапласа.

Проверка выполнения граничного условия состоит в доказательстве того, что в точке непрерывности функции $f(x, y)$

$$\lim_{z \rightarrow +0} [f(x, y) - u(x, y, z)] = 0.$$

Так как интеграл, в котором в процессе вычисления проведена замена $\xi - x = r \cos \varphi$, $\eta - y = r \sin \varphi$,

$$\frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{zf(\xi, \eta) d\xi d\eta}{[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{r dr d\varphi}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \frac{dr^2}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = 1,$$

то последнее условие можно представить в форме

$$\lim_{z \rightarrow +0} \left[\frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{z(f(x, y) - f(\xi, \eta)) d\xi d\eta}{r_{PM}^3} \right] = 0.$$

Если (x, y) — точка непрерывности функции $f(x, y)$, то для любого $\varepsilon > 0$ существует число $r_0 > 0$ такое, что в круге $\{x, y: (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 < r_0^2\}$ справедливо неравенство

$$|f(x, y) - f(\xi, \eta)| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{z(f(x, y) - f(\xi, \eta)) d\xi d\eta}{r_{PM}^3} \right| &\leq \\ &\leq \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{z\varepsilon r dr d\varphi}{2(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{2Az}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{\infty} \frac{r dr d\varphi}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \leq \\ &\leq \frac{z\varepsilon}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{r dr d\varphi}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} + 2Az \int_{r_0}^{\infty} \frac{r dr}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\varepsilon}{2} + \frac{2Az}{\sqrt{r_0^2 + z^2}} < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{2Az}{r_0} < \varepsilon, \end{aligned}$$

где $z < \frac{\varepsilon r_0}{2A}$. Существование решения установлено.

Доказательство единственности решения. Если задача Дирихле имеет два решения $u_1(M)$ и $u_2(M)$, то функция $v(M) = u_1(M) - u_2(M)$ ограничена, $|v| = |u_1 - u_2| \leq |u_1 + u_2| \leq 2A$, что следует из неравенства

$$\begin{aligned} |u| &\leq \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{z|f(\xi, \eta)| d\xi d\eta}{[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \leq \\ &\leq A \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{z d\xi d\eta}{[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} = A, \end{aligned}$$

и удовлетворяет условиям

$$\begin{aligned} \Delta v(x, y, z) &= 0, \quad M(x, y, z) \in \Omega, \\ v|_{z=0} &= 0. \end{aligned}$$

Какой бы ни была точка $M \in \Omega$ существует шар B с центром на плоскости $z = 0$, ограниченный сферой S , которому принадлежит эта точка. Пусть $V(M)$ — решение задачи

$$\Delta V(M) = 0, \quad M \in \mathbb{R}^3, \\ V|_S = \begin{cases} v|_S, & z \geq 0, \\ -v|_S, & z < 0. \end{cases}$$

Функция $V(M')$, где $M' = M(x, y, -z)$, — также решение этой задачи; при этом ввиду нечетности граничных условий по z сумма $V(M')|_S + V(M)|_S = 0$. Это значит, что гармоническая функция $V(M') + V(M)$ равна нулю на поверхности шара B . Тогда по принципу максимума для гармонической функции $V(x, y, z) + V(x, y, -z) = 0$ в шаре. Отсюда следует, что $V(x, y, 0) = -V(x, y, 0)$, т. е. $V(x, y, 0) = 0$. На границе полшара, соответствующего $z > 0$, функции $V(M)$ и $v(M)$ принимают одинаковые значения

$$V|_S = v|_S, \quad V|_{z=0} = v|_{z=0} = 0,$$

так что $V(M) = v(M)$ в полушаре. Функция $V(M)$ — гармоническая во всем пространстве и ограничена:

$$|V(x, y, -z)| = |-V(x, y, z)| = |v(x, y, z)| \leq 2A, \quad \text{где } z \geq 0,$$

следовательно, по теореме Лиувилля $V(M) = C$, где $C = 0$, так как $V(x, y, 0) = 0$. Поскольку $V(M) = v(M)$ в Ω , то $u_1(M) = u_2(M)$, что доказывает единственность.

З а м е ч а н и е 1. Нечетное продолжение гармонической в полупространстве $z > 0$ функции, равной нулю при $z = 0$, есть гармоническая функция во всем пространстве.

З а м е ч а н и е 2. Свойства 1, 2, 4, потенциала двойного слоя, приведенные в начале главы, верны и для полупространства.

5.202. Найти стационарную температуру в полупространстве $z > 0$, если на границе $z = 0$ решение равно $f(x, y)$. Рассмотреть случаи:

- 1) $f(x, y) = u_0 \eta(x) \eta(y)$; 4) $f(x, y) = u_0 \operatorname{sign} x \eta(y)$;
- 2) $f(x, y) = u_0 \eta(xy)$; 5) $f(x, y) = u_0 \operatorname{sign} x \eta(y) \eta(b - y)$;
- 3) $f(x, y) = u_0 \eta(y - kx)$; 6) $f(x, y) = u_0 \cos(\alpha x + \beta y)$.

5.203. Решить задачу Дирихле в полупространстве $z > 0$, если на части S_0 границы решение равно u_0 , а вне S_0 равно нулю, где:

- 1) $S_0 = \{x, y: 0 < x < \infty, 0 < y < b\}$;

$$2) S_0 = \{x, y: 0 < x < \infty, 0 < y < kx\}, k > 0;$$

$$3) S_0 = \{x, y: 0 < x < \infty, -\infty < 0 < kx\}, k > 0;$$

$$4) S_0 = \{x, y: -a < x < a, -b < y < b\};$$

$$5) S_0 = \left\{x, y: 0 < x < a, 0 < y < b\left(1 - \frac{x}{a}\right)\right\}, a > 0, b > 0.$$

5.204. Найти стационарное распределение температуры двугранного угла ($0 < x, 0 < y$), если температура грани $x = 0$ равна $-u_0\eta(-z)$, а температура грани $y = 0$ равна $u_0\eta(z)$.

5.205. Найти стационарное распределение температуры внутри двугранного угла ($0 < x, 0 < y$), грань $x = 0$ которого теплоизолирована, а температура грани $y = 0$ равна $u_0\eta(a - x)\eta(z)$, $a > 0$.

5.206. Найти стационарное распределение температуры внутри двугранного угла ($0 < x, 0 < y, -\infty < z < \infty$), грань $x = 0$ которого имеет нулевую температуру, а грань $y = 0$ — температуру $u_0 \operatorname{sign} z$.

5.207. Грань $z = 0$ октанта ($0 < x, 0 < y, 0 < z$) имеет температуру u_2 , а грани $x = 0$ и $y = 0$ — температуру u_1 . Найти стационарную температуру октанта.

5.208. Найти стационарное распределение температуры в октанте ($0 < x, 0 < y, 0 < z$), если грань $x = 0$ имеет нулевую температуру, грань $y = 0$ теплоизолирована, а температура грани $z = 0$ равна $u_0 \eta(b - y)$, $b > 0$.

5.209. Доказать, что на множестве функций, стремящихся к нулю на бесконечности, задача Неймана в полупространстве

$$\Delta u(x, y, z) = 0, \quad M(x, y, z) \in \Omega = \{x, y, z: -\infty < x, y < \infty, 0 < z\},$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial n} \right|_S = f(x, y), \quad S = \partial\Omega,$$

где $f(x, y)$ — кусочно-непрерывная функция, удовлетворяющая неравенству $|f(x, y)| \leq \frac{A}{r^{1+\alpha}}$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $0 < \alpha$, имеет решение; это решение единственно, ограничено, стремится к нулю при $r \rightarrow \infty$ и определяется формулой

$$u(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z^2}}. \quad (5.48)$$

Показать также, что формула для решения задачи Неймана применима, если $f(x, y) = A\delta(x)\delta(y)$.

5.210. В однородное полупространство ($z > 0$), проводимость которого σ_0 , через точки $M_1(-a, 0, 0)$ и $M_2(a, 0, 0)$ втекают постоянные токи J_1 и J_2 соответственно. Найти потенциал электрического поля токов, если: 1) $J_1 = J_2 = J$, 2) $-J_1 = J_2 = J$.

5.211. Постоянный ток J втекает в однородное полупространство ($z > 0$), проводимость которого σ_0 , через отрезок $[-l, l]$ оси Ox . Определить плотность тока в полупространстве, если вдоль отрезка он распределен равномерно.

5.212. В однородное полупространство ($z > 0$), проводимость которого σ_0 , втекает постоянный ток J , равномерно распределенный по окружности $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, z = 0\}$. Определить плотность тока в полупространстве.

5.213. Идеальная несжимаемая жидкость втекает в полупространство ($z > 0$) через отверстие $S = \{x, y, z: |x| \leq a, |y| \leq a, z = 0\}$. Найти стационарное распределение скоростей $\mathbf{v} = v_x \mathbf{e}_x + v_y \mathbf{e}_y + v_z \mathbf{e}_z$ жидкости при $z > 0$, если $v_z(x, y, 0) = v_0 \eta(a - |x|) \eta(a - |y|)$.

5.214. Решить внутреннюю задачу Дирихле для круга

$$\Delta u(M) = 0, \quad M \in B(r_0),$$

$$u|_{S(r_0)} = f(M),$$

$$u(M) \in C^2(B(r_0)) \cap C(\overline{B}(r_0)), \quad f(M) \in C(S).$$

5.215. Решить внутреннюю задачу Дирихле для круга, радиус которого r_0 , если на границе круга решение равно:

$$\begin{aligned} &1) u_0 \sin m\varphi, m \in \mathbb{N}; \quad 2) u_0 \sin^2 \varphi \cos \varphi; \quad 3) \frac{u_0}{13 + 5 \sin \varphi}; \\ &4) \frac{u_0}{25 - 24 \cos \varphi}; \quad 5) \frac{u_0 \sin \varphi}{5 - 3 \sin \varphi}; \quad 6) \frac{u_0 \cos \varphi}{13 + 12 \sin \varphi}; \\ &7) \frac{u_0 \cos \varphi}{17 + 15 \cos \varphi}; \quad 8) \frac{u_0 \sin \varphi}{25 - 7 \cos \varphi}; \quad 9) \begin{cases} u_0, & 0 < \varphi < \pi, \\ -u_0, & \pi < \varphi < 2\pi. \end{cases} \end{aligned}$$

5.216. 1) В $\mathbb{R}^2$ преобразование инверсии относительно окружности $S(r_0)$ определяется такой же формулой, что и в $\mathbb{R}^3$ (задача 5.192); $\mathbf{r}$ и $\mathbf{R}$ — двумерные векторы, r_0 — радиус окружности. Преобразованием Кельвина гармонической функции $u(\mathbf{r})$ называется функция

$$U(\mathbf{R}) = u\left(\frac{r_0}{R^2} \mathbf{R}\right).$$

Показать, что $U(\mathbf{R})$ — гармоническая функция.

2) Доказать теорему о стирании особенностей гармонической функции: если функция $u(M)$ гармонична в области Ω , кроме точки $P \in \Omega$, в окрестности которой

$$u(M) = o\left(\ln \frac{1}{r_{MP}}\right), \quad M \rightarrow P,$$

т. е. растет не быстрее, чем $\ln \frac{1}{r_{MP}}$, то $u(M)$ гармонически продолжается в точку P .

3) Если гармоническая вне круга $B(r_0)$ функция $u(\mathbf{r})$ ограничена, то существует конечный предел

$$\lim_{r \rightarrow \infty} u = A \quad \text{и} \quad \nabla u(\mathbf{r}) = O\left(\frac{1}{r^2}\right), \quad r \rightarrow \infty.$$

Доказать это свойство.

5.217. Решить внешнюю задачу Дирихле для круга

$$\begin{aligned} \Delta u(M) &= 0, \quad M \in \Omega = \mathbf{R}^2 \setminus \overline{B}(r_0), \\ u|_S &= f(M), \quad M \in S = \partial B(r_0), \quad |u(M)| \leq A, \\ u(M) &\in C^2(\Omega) \cap C(\overline{\Omega}), \quad f(M) \in C(S). \end{aligned}$$

5.218. Решить внешнюю задачу Дирихле для круга, радиус которого r_0 , если на границе круга решение равно:

$$\begin{aligned} 1) & u_0 \cos^4 \varphi; & 2) & \frac{u_0}{2 + \sqrt{3} \cos \varphi}; & 3) & \frac{u_0}{3 - 2\sqrt{2} \sin \varphi}; \\ 4) & \frac{u_0 \sin \varphi}{3 + \sqrt{5} \cos \varphi}; & 5) & \frac{u_0 \cos \varphi}{5 - \sqrt{21} \sin \varphi}; & 6) & \frac{u_0 \sin \varphi}{4 - \sqrt{7} \sin \varphi}; \\ 7) & \frac{u_0 \cos \varphi}{7 + \sqrt{13} \cos \varphi}; & 8) & \begin{cases} u_0, & 0 < \varphi < \pi, \\ 0, & \pi < \varphi < 2\pi. \end{cases} \end{aligned}$$

Пример 5.12. Через круглую пластинку ($r < r_0$, $0 \leq \varphi < 2\pi$, $|z| < h$), проводимость которой σ , протекает постоянный ток J . Ток втекает через образующую A ($r = r_0$, $\varphi = \pi$, $|z| < h$), вытекает через образующую B ($r = r_0$, $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $|z| < h$), вдоль которых он распределен равномерно. Найти объемную плотность тока в пластинке.

Плотность тока не зависит от z . Действительно, пластинку можно считать частью бесконечного цилиндра, в котором течет ток, распределенный равномерно вдоль образующих A и B . Плотность тока $\mathbf{j}$ и потенциал связаны соотношением $\mathbf{j} = -\sigma \nabla u$;

так как $\operatorname{div} \mathbf{j} = 0$, то u — решение внутренней задачи Неймана для уравнения Лапласа в круге B

$$\Delta u(r, \varphi) = 0, \quad (r, \varphi) \in B,$$

$$|u| < \infty, \quad u_r(r_0, \varphi) = -\frac{J}{hr_0\sigma} \left[\delta(\varphi - \frac{\pi}{2}) - \delta(\varphi - \pi) \right] \equiv f(\varphi).$$

Если решение представить в виде потенциала простого слоя

$$u(M) = \int_S \sigma(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} ds, \quad S = \partial B,$$

который является гармонической функцией в круге, то из свойства (5.11) нормальной производной вытекает интегральное уравнение

$$f(M) = \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP}}{r_{MP}} ds + \pi \sigma(M), \quad M \in S.$$

Решение этого уравнения имеет вид (см. задачу 4.359, п. 2)

$$\sigma(\varphi) = C + \frac{1}{\pi} f(\varphi),$$

следовательно,

$$u = Cr_0 \int_0^{2\pi} \ln \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\varphi - \psi)}} d\psi -$$

$$- \frac{J}{\pi\sigma h} \int_0^{2\pi} \left[\delta(\psi - \frac{\pi}{2}) - \delta(\psi - \pi) \right] \ln \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\varphi - \psi)}} d\psi.$$

Интеграл в первом слагаемом равен $-2\pi \ln r_0$ (для его вычисления следует употребить разложение (5.16)), так что

$$u(r, \varphi) = C_1 + \frac{J}{2\pi\sigma h} \ln \frac{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \sin \varphi}{r^2 + r_0^2 + 2rr_0 \cos \varphi}.$$

5.219. Через круглую пластинку ($r < r_0$, $0 \leq \varphi < 2\pi$, $|z| < h$), проводимость которой σ , протекает постоянный ток J . Ток втекает через образующую A ($r = r_0$, $\varphi = \pi$, $|z| < h$), вытекает через образующую B ($r = r_0$, $\varphi = 0$, $|z| < h$), вдоль которых он распределен равномерно. Найти объемную плотность тока в пластинке.

5.220. Решить внутреннюю задачу Неймана в круге

$$\begin{aligned}\Delta u(M) &= 0, \quad M \in B(r_0), \\ \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{S(r_0)} &= f(M), \quad \int_{S(r_0)} f(P) ds = 0. \\ u(M) &\in C^2(\Omega) \cap C^1(\overline{\Omega}), \quad f(M) \in C(S),\end{aligned}$$

где $\mathbf{n}$ — внешняя нормаль к $S(r_0)$.

5.221. Найти стационарную концентрацию газа, диффундирующего в длинном цилиндре, радиус которого r_0 , если плотность потока газа на поверхности цилиндра равна $-q_0 \sin 2\varphi \mathbf{e}_r$.

5.222. Решить внутреннюю задачу Неймана для круга, радиус которого r_0 (см. задачу 5.220), если $f(\varphi)$ равна:

$$\begin{aligned}1) \quad & \frac{q_0 \sin \varphi}{(5 - 3 \cos \varphi)^2}; & 2) \quad & \frac{q_0 \sin \varphi}{(7 + 4\sqrt{3} \cos \varphi)^2}; \\ 3) \quad & \frac{q_0 \cos \varphi}{(25 - 24 \sin \varphi)^2}; & 4) \quad & \frac{q_0 \cos \varphi}{(6 + \sqrt{11} \sin \varphi)^2}.\end{aligned}$$

5.223. Решить задачу Неймана вне круга

$$\begin{aligned}\Delta u(M) &= 0, \quad M \in \Omega = \mathbf{R}^2 \setminus \overline{B}(r_0), \\ \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{S(r_0)} &= f(M), \quad \int_{S(r_0)} f(P) ds = 0, \quad |u(M)| \leq A, \\ u(M) &\in C^2(\Omega) \cap C^1(\overline{\Omega}), \quad f(M) \in C(S),\end{aligned}$$

где $\mathbf{n}$ — внешняя нормаль к $\partial\Omega$.

5.224. Найти стационарную температуру вне бесконечного цилиндра, радиус которого r_0 , если плотность теплового потока, поступающего через поверхность цилиндра во внешнее пространство, равна $q_0 \cos \varphi$.

5.225. Решить внешнюю задачу Неймана для круга, радиус которого r_0 (см. задачу 5.223), если $f(\varphi)$ равна:

$$\begin{aligned}1) \quad & \frac{q_0 \sin \varphi}{(5 + 4 \cos \varphi)^2}; & 2) \quad & \frac{q_0 \sin \varphi}{(7 - 2\sqrt{6} \cos \varphi)^2}; \\ 3) \quad & \frac{q_0 \cos \varphi}{(17 - 8 \sin \varphi)^2}; & 4) \quad & \frac{q_0 \cos \varphi}{(9 + 4\sqrt{2} \sin \varphi)^2}.\end{aligned}$$

5.226. Показать, что на множестве ограниченных функций задача Дирихле для уравнения Лапласа в полуплоскости

$$\Delta u(x, y) = 0, \quad M(x, y) \in \Omega = \{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y\}, \\ u(x, 0) = f(x),$$

где $f(x, y)$ — ограниченная кусочно-непрерывная функция, имеет решение; это решение единственно, ограничено и определяется формулой

$$u(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y f(\xi, \eta) d\xi d\eta}{(\xi - x)^2 + y^2}.$$

5.227. Найти решение задачи Дирихле для уравнения Лапласа в полуплоскости (см. предыдущую задачу) если функция $u(x, 0)$ равна:

$$\begin{array}{llll} 1) u_0 \eta(x); & 2) u_0 \operatorname{sign} x; & 3) \frac{u_0 l \eta(-x)}{|x| + |a|}; & 4) \frac{u_0 l \operatorname{sign} x}{|x| + |a|}; \\ 5) \frac{u_0 x}{|x| + |a|}; & 6) \frac{u_0 |x|}{|x| + |a|}; & 7) \frac{u_0 l^2 \eta(-x)}{(|x| + |a|)^2}; & 8) \frac{u_0 l x \eta(-x)}{(|x| + |a|)^2}; \\ 9) \frac{u_0 l x}{x^2 + a^2}; & 10) \frac{u_0 l |x|}{x^2 + a^2}; & 11) \frac{u_0 x^2}{x^2 + a^2}; & 12) \frac{u_0 x^2 \eta(x)}{x^2 + a^2}; \\ 13) \frac{u_0 x |x|}{x^2 + a^2}; & 14) u_0 \cos \alpha x; & 15) \frac{u_0 l^2 \sin \alpha x}{x^2 + a^2}; & 16) \frac{u_0 l x \cos \alpha x}{x^2 + a^2}. \end{array}$$

5.228. Найти стационарное распределение температуры внутри двугранного угла ($0 < x, 0 < y$), если грань $y = 0$ имеет температуру u_1 , а грань $x = 0$ — температуру u_2 .

5.229. Найти стационарное распределение температуры внутри двугранного угла ($0 < x, 0 < y$), если грань $y = 0$ имеет температуру $u_0 \eta(l - x)$, а грань $x = 0$ — температуру $u_0 \eta(l - y)$.

5.230. Найти стационарное распределение температуры внутри двугранного угла ($0 < \varphi < \alpha$), грань $\varphi = 0$ которого поддерживается при температуре $u_0 \eta(l - r)$, а грань $\varphi = \alpha$ — при нулевой температуре.

5.231. Показать, что задача Неймана в полуплоскости

$$\Delta u(x, y) = 0, \quad (x, y) \in \Omega = \{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y\},$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{y=0} = f(x), \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{\partial u}{\partial r} r d\varphi = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) d\xi,$$

где $\mathbf{n}$ — внешняя нормаль, а $f(x, y)$ — кусочно-непрерывная функция, удовлетворяющая условию $f(x) = O(|x|^{-1-\alpha})$, $|x| \rightarrow \infty$, $\alpha > 0$, имеет на классе функций $u(x, y) = O(\ln r)$, $r = \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty$ решение; это решение единственно с точностью до аддитивной постоянной и определяется формулой

$$u(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \ln \frac{1}{\sqrt{(\xi - x)^2 + y^2}} d\xi.$$

5.232. В однородное полупространство ($y > 0$) с проводимостью σ через линию $L_1 = \{x, y, z: x = -a, y = 0, -\infty < z < \infty\}$ втекает постоянный ток, линейная плотность которого J_1 , а через линию $L_2 = \{x, y, z: x = a, y = 0, -\infty < z < \infty\}$ вытекает постоянный ток, линейная плотность которого J_2 . Найти потенциал электрического поля и эквипотенциальные поверхности, если: 1) — $J_1 = J_2 = J$; 2) $J_1 = J_2 = J$.

5.233. В однородное полупространство ($y > 0$), проводимость которого σ , через каждую единицу площади неограниченной полосы $S = \{x, y, z: -a \leq x \leq a, y = 0, -\infty < z < \infty\}$ втекает постоянный ток J . Найти потенциал электрического поля.

5.234. В полупространство ($y > 0$) втекает постоянный ток через полосу $S_1 = \{x, y, z: -a \leq x \leq 0, y = 0, -\infty < z < \infty\}$, а через полосу $S_2 = \{x, y, z: 0 \leq x \leq a, y = 0, -\infty < z < \infty\}$ вытекает. Ток через единицу площади границы ($y = 0$) равен J , проводимость постоянна. Определить объемную плотность тока $\mathbf{j} = j_x \mathbf{e}_x + j_y \mathbf{e}_y$ в полупространстве.

5.235. Идеальная несжимаемая жидкость втекает через щель $S = \{x, y, z: -a \leq x \leq a, y = 0, -\infty < z < \infty\}$ в полупространство $y > 0$ со скоростью $\mathbf{v} = v_0 \mathbf{e}_y$. Определить скорость $\mathbf{v} = v_x \mathbf{e}_x + v_y \mathbf{e}_y$ жидкости в полупространстве.

5.236. Решить задачу Неймана для полуплоскости (см. задачу 5.231), если функция $f(x)$ равна:

$$1) \frac{f_0 l^3 x}{(x^2 + a^2)^2}; \quad 2) \frac{f_0 l^3 |x|}{(x^2 + a^2)^2}; \quad 3) \frac{f_0 l^3 x \operatorname{sign} x}{(x^2 + a^2)^2}; \quad 4) \frac{f_0 l^2}{(|x| + |a|)^2}; \quad 5) \frac{f_0 l^2 \eta(-x)}{(|x| + |a|)^2}.$$

5.237. С помощью потенциала свести краевую задачу для уравнения Пуассона в области Ω с границей S

$$\Delta u(M) = F(M), \quad M \in \Omega, \\ \left(\alpha u + \beta \frac{\partial u}{\partial n} \right) \Big|_S = f$$

к краевой задаче для уравнения Лапласа, если Ω принадлежит пространству: 1) $\mathbb{R}^2$; 2) $\mathbb{R}^3$.

5.238. В однородном неограниченном цилиндре, радиус которого r_0 , проводимость σ , течет постоянный ток. Источники тока расположены на оси цилиндра, с единицы длины которой в единицу времени выделяется заряд J ; плотность тока через поверхность цилиндра $\mathbf{j} = A \cos^2 \varphi \mathbf{e}_r$, где A — константа. Найти плотность тока в цилиндре и указать условия разрешимости задачи.

5.239. На оси полого заземленного цилиндра ($r < r_0$) находится нить, несущая диполи, линейная плотность момента которых $\mathbf{p}$, где $\mathbf{p}$ — постоянный вектор, перпендикулярный нити. Определить потенциал внутри цилиндра и плотность заряда на его поверхности.

5.240. В центре однородного шара $B(r_0)$ находится точечный источник тепла, мощность которого Q_0 ; плотность теплового потока через поверхность шара $\mathbf{q} = A \cos^2 \theta \mathbf{e}_r$, где A — константа. Решить стационарную задачу теплопроводности и указать условия ее разрешимости.

5.241. В центре проводящей заземленной сферы, радиус которой r_0 , расположен точечный диполь с моментом p . Определить потенциал внутри сферы и плотность заряда на ней.

Пример 5.13. Применение потенциалов для вычисления плотности заряда на проводниках. ¹⁾ Проводник, занимающий область $\Omega \in \mathbb{R}^3$ с гладкой границей S , внесен в электростатическое поле $\mathbf{E}$, потенциал которого u_E . Определить плотность заряда на проводнике. Решить задачу для проводящего заземленного шара $B(r_0)$.

¹⁾ Ряд задач на эту тему взят из [51], глава VIII.

Под действием поля на поверхности проводника индуцируется заряд, плотность которого $\sigma(M)$, а потенциал

$$u_\sigma = \int_S \frac{\sigma(P) ds}{r_{MP}}.$$

По свойству (5.4)

$$\left(\frac{\partial u_\sigma(M)}{\partial n} \right)_- = \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP}}{r_{MP}^2} ds + 2\pi\sigma(M), \quad M \in S.$$

Поле в проводнике равно нулю; с другой стороны, оно является суперпозицией внешнего поля $\mathbf{E}$ и поля $\mathbf{E}_\sigma = -\nabla u_\sigma$ зарядов на проводнике. Следовательно,

$$\left[E_n - \left(\frac{\partial u_\sigma(M)}{\partial n} \right)_- \right] \Big|_S = 0.$$

Таким образом, функция $\sigma(P)$ является решением интегрального уравнения Фредгольма второго рода

$$\sigma(M) = \frac{E_n(M)}{2\pi} - \frac{1}{2\pi} \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP}}{r_{MP}^2} ds, \quad M \in S. \quad (5.49)$$

В случае шара применение соотношения $2r_0 \cos(\pi - \varphi_{MP}) = r_{MP}$ (см. рис.5.13, б) преобразует уравнение (5.49) к виду

$$\sigma(M) = \frac{E_n(M)}{2\pi} + \frac{1}{4\pi r_0} \int_S \frac{\sigma(P) ds}{r_{MP}}, \quad M \in S.$$

Поскольку потенциал проводника $u_S = u_\sigma + u_E$, то

$$\sigma(M) = \frac{E_n(M)}{2\pi} + \frac{u_S - u_E}{4\pi r_0}. \quad (5.50)$$

Если шар заземлен, то $u_S = 0$, следовательно,

$$\sigma(M) = \frac{E_n(M)}{2\pi} - \frac{u_E}{4\pi r_0}.$$

5.242. Изолированная проводящая сфера $S(r_0)$ помещена в электростатическое поле $\mathbf{E}$, потенциал которого u_E . Определить плотность заряда на сфере, если она не заземлена и имеет заряд Q_0 .

5.243. Определить плотность заряда на проводящей заземленной сфере, помещенной в однородное электрическое поле E_0 .

5.244. Проводящая незаземленная сфера $S(r_0)$, заряд которой Q_0 , помещена в однородное поле E_0 . Какова плотность заряда на сфере?

5.245. Найти плотность заряда на проводящей заземленной сфере $S(r_0)$, на расстоянии $d > r_0$ от центра которой находится точечный заряд Q .

5.246. Точечный заряд Q расположен на расстоянии $d > r_0$ от центра незаземленной проводящей сферы $S(r_0)$, заряд которой Q_0 . Найти плотность заряда на сфере.

5.247. Вне проводящей сферы, радиус которой r_0 , на расстоянии d от центра расположен точечный диполь с моментом $\mathbf{P} = P \frac{\mathbf{d}}{d}$. Найти плотность заряда на сфере, если она: 1) заземлена; 2) не заземлена и имеет заряд Q_0 .

5.248. Вне проводящей сферы, радиус которой r_0 , на расстоянии d от ее центра O в точке M расположен диполь с моментом P , перпендикулярным вектору $\overrightarrow{OM}$. Найти плотность заряда на сфере, если она: 1) заземлена; 2) не заземлена и имеет заряд Q .

5.249. Незаземленная проводящая сфера $S(r_0)$, заряд которой Q , находится в поле бесконечной нити, заряд единицы длины которой q . Определить плотность заряда на сфере, если ее центр отстоит от нити на расстоянии $d > r_0$.

5.250. Проводящая поверхность S — часть поверхности Ляпунова $S_0 \in \mathbb{R}^3$. Сторона S_1 поверхности S принадлежит внутренней стороне S_0 , сторона S_2 — внешней стороне S_0 , $\mathbf{n}$ — внешняя нормаль к S_0 . В электрическом поле $\mathbf{E}(M)$ на поверхности S индуцируются заряды. Показать, что плотности заряда σ_1 на S_1 и σ_2 на S_2 удовлетворяют системе интегральных уравнений

$$\begin{cases} u_E(M) + \int_S \frac{\sigma(P) ds}{r_{MP}} = u(M), & M \in S, \end{cases} \quad (5.51)$$

$$\begin{cases} \sigma_2(M) - \sigma_1(M) = \frac{E_n}{2\pi} - \frac{1}{2\pi} \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP} ds}{r_{MP}^2}, & M \in S, \end{cases} \quad (5.52)$$

где $u(M)$ — потенциал результирующего поля, $\sigma(M) = \sigma_1(M) + \sigma_2(M)$ — плотность заряда на S .

5.251. Внутри проводящей сферы $S(r_0)$ имеются источники электростатического поля, напряженность которого $\mathbf{E}(M)$. Показать,

что плотности зарядов $\sigma_1(M)$ на внутренней и $\sigma_2(M)$ на внешней сторонах сферы удовлетворяют системе интегральных уравнений

$$\begin{cases} \int_S \frac{\sigma(P)ds}{r_{MP}} = u(M) - u_E(M), & M \in S, \\ \sigma_2(M) - \sigma_1(M) = \frac{E_n}{2\pi} + \frac{u(M) - u_E(M)}{4\pi r_0}, & M \in S. \end{cases}$$

Обозначения те же, что в задаче 5.250.

5.252. Найти плотность заряда на сфере (см. задачу 5.251) при условии, что сфера заземлена.

5.253. Найти плотность заряда на проводящей заземленной сфере $S(r_0)$, на расстоянии $d < r_0$ от центра которой находится точечный заряд Q .

5.254. Внутри проводящей заземленной сферы, радиус которой r_0 , на расстоянии d от центра O в точке M расположен диполь с моментом P , направленным по вектору $\overrightarrow{OM}$. Найти плотность заряда на сфере.

5.255. Внутри проводящей заземленной сферы, радиус которой r_0 , на расстоянии d от центра O в точке M расположен диполь с моментом P , перпендикулярным вектору $\overrightarrow{OM}$. Найти плотность заряда на сфере.

5.256. Внутри проводящей незаземленной сферы $S(r_0)$ расположены заряды, сумма которых равна Q , их поле $\mathbf{E}$, заряд сферы равен Q_0 . Определить плотность заряда на сфере.

5.257. Найти плотность заряда на проводящей незаземленной сфере $S(r_0)$, на расстоянии $d < r_0$ от центра которой находится точечный заряд Q , заряд сферы равен Q_0 .

5.258. Внутри проводящей сферы, радиус которой r_0 , на расстоянии d от центра расположен точечный диполь с моментом $\mathbf{P} = P \frac{\mathbf{d}}{d}$. Найти плотность заряда на сфере, если она не заземлена и имеет заряд Q_0 .

5.259. Внутри проводящей сферы, радиус которой r_0 , на расстоянии d от ее центра O в точке M расположен диполь с моментом P , перпендикулярным вектору $\overrightarrow{OM}$. Найти плотность заряда на сфере, если она не заземлена и имеет заряд Q .

5.260. Решить задачу, рассмотренную в примере 5.13, если Ω — полупространство $z > 0$.

5.261. Точечный заряд Q расположен на расстоянии h от проводящей плоскости. Найти плотность заряда, индуцированного на плоскости.

5.262. Отрезок M_1M_2 с зарядом q на единицу длины расположен над проводящей плоскостью $z = 0$. Найти плотность заряда на плоскости, если:

1) $M_1 = (0, 0, l_1)$, $M_2 = (0, 0, l_2)$, $0 < l_1 < l_2$;

2) $M_1 = (-l_1, 0, l_2)$, $M_2 = (l_1, 0, l_2)$, $0 < l_2$.

5.263. На расстоянии h от проводящей плоскости расположен точечный диполь с моментом P , параллельным плоскости. Определить плотность заряда на плоскости.

5.264. Тонкий проводящий диск $S = \{x, y, z: x^2 + y^2 \leq r_0^2, z = 0\}$ внесен в аксиально симметричное поле $\mathbf{E}(r) = E(r)\mathbf{e}_z$, где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Показать, что плотности заряда σ_1 на стороне $z = -0$ и σ_2 на стороне $z = +0$ удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{cases} 4 \int_0^{r_0} \frac{\sigma(R)R}{R+r} K\left(\frac{2\sqrt{rR}}{R+r}\right) dR = u - u_E(r), & 0 \leq r \leq r_0, \\ \sigma_2(r) - \sigma_1(r) = \frac{E_z(r)}{2\pi}, & 0 \leq r \leq r_0. \end{cases}$$

5.265. Определить плотности заряда на сторонах тонкого проводящего диска, радиус которого r_0 , заряд Q_0 . Какова емкость диска?

5.266. Найти плотности заряда на сторонах тонкого проводящего диска ($r < r_0$), на оси которого на расстоянии h от центра находится точечный заряд Q .

5.267. Проводящая поверхность $\{x, y, z: x^2 + y^2 \geq r_0^2, z = 0\}$ находится в аксиально симметричном поле $\mathbf{E}(r) = E(r)\mathbf{e}_z$. Найти плотности заряда σ_1 на стороне $z = -0$ и σ_2 на стороне $z = +0$.

5.268. Решить предыдущую задачу, если $\mathbf{E}(r)$ — поле заряда Q , расположенного в точке $(0, 0, h)$.

5.269. Проводящий сегмент $S = \{r, \theta, \varphi: r = r_0, 0 \leq \theta \leq \alpha < \pi, 0 \leq \varphi < 2\pi\}$ сферической поверхности внесен в аксиально

симметричное поле напряженностью $\mathbf{E} = E\mathbf{e}_z$. Показать, что плотности заряда σ_1 на внутренней стороне и σ_2 на внешней стороне сегмента удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{cases} 2r_0 \int_0^\alpha \frac{\sigma(\theta') \sin \theta'}{\sin \frac{\theta + \theta'}{2}} K\left(\frac{2\sqrt{\sin \theta \sin \theta'}}{\sin \frac{\theta + \theta'}{2}}\right) d\theta' = u - u_E(\theta), & 0 \leq \theta \leq \alpha, \\ \sigma_2(\theta) - \sigma_1(\theta) = \frac{E_n(\theta)}{2\pi} + \frac{u - u_E(\theta)}{4\pi r_0}, & 0 \leq \theta \leq \alpha. \end{cases}$$

5.270. Определить плотности заряда на внутренней и внешней сторонах сферического сегмента, помещенного в аксиально симметричное поле $\mathbf{E}(r) = E(r)\mathbf{e}_z$ (задача 5.269).

5.271. Проводящий заземленный сферический сегмент находится в однородном электрическом поле $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = E_0\mathbf{e}_z$ (задача 5.269). Вычислить плотности заряда, индуцированного на внутренней и внешней сторонах сегмента. Из полученного результата извлечь решение задачи 5.243.

5.272. Заряд проводящего сферического сегмента равен Q_0 (задача 5.269). Вычислить плотности заряда на внутренней и внешней сторонах сегмента. Какова емкость сегмента? Из полученного результата извлечь решение задачи 5.243.

5.273. Проводящий заземленный сферический сегмент находится в электрическом поле точечного заряда Q , координаты которого: 1) $x = y = z = 0$; 2) $x = y = 0, z = -r_0$ (задача 5.269). Вычислить плотности заряда на внутренней и внешней сторонах сегмента.

5.274. Проводящий заземленный сферический сегмент находится в электрическом поле точечного диполя $\mathbf{P} = P\mathbf{e}_z$, координаты которого: 1) $x = y = z = 0$; 2) $x = y = 0, z = -r_0$ (задача 5.269). Вычислить плотности заряда на внутренней и внешней сторонах сегмента.

5.275. Проводящая цилиндрическая поверхность, поперечным сечением которой является линия Ляпунова S , параллельна оси Oz . Показать, что плотность заряда σ , индуцированного на поверхности электрическим полем $\mathbf{E}(x, y)$, удовлетворяет интегральному уравнению

$$\sigma(M) = \frac{E_n(M)}{2\pi} - \frac{1}{\pi} \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP}}{r_{MP}} ds, \quad M \in S,$$

$\mathbf{n}$ — внешняя нормаль к поверхности.

5.276. Определить плотность заряда на поверхности проводящего незаземленного цилиндра, радиус которого r_0 , внесенного в плоское поле $\mathbf{E}(x, y)$, перпендикулярное оси цилиндра.

5.277. Проводящий цилиндр, радиус которого r_0 , внесен в однородное поле E_0 , перпендикулярное оси цилиндра. Найти плотность заряда на поверхности цилиндра.

5.278. Решить предыдущую задачу, если цилиндр имеет собственный заряд q_0 на единицу длины.

5.279. Вне проводящего заземленного неограниченного цилиндра $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, -\infty < z < \infty\}$ расположены линейные заряды, параллельные оси Oz , суммарный заряд единицы длины которых q , их поле $\mathbf{E}$. Какова плотность заряда на цилиндре?

5.280. Вне проводящего заземленного цилиндра на расстоянии d от оси параллельно ей расположена нить, заряд единицы длины которой равен q (задача 5.279). Определить плотность заряда на цилиндре.

5.281. Вне проводящего заземленного цилиндра на расстоянии d от оси параллельно ей расположена нить, дипольный момент единицы длины которой равен: 1) $\mathbf{p} = p\mathbf{e}_x$; 2) $\mathbf{p} = p\mathbf{e}_y$ (задача 5.279). Какова плотность заряда на цилиндре?

5.282. Решить задачу 5.279, если цилиндр не заземлен и его собственный заряд на единицу длины равен q_0 .

5.283. Решить задачу 5.280, если цилиндр не заземлен и его собственный заряд на единицу длины равен q_0 .

5.284. Решить задачу 5.281 п. 1 и п. 2, если цилиндр не заземлен и его собственный заряд на единицу длины равен q_0 .

5.285. Линия Ляпунова S_0 — поперечное сечение цилиндрической поверхности Σ_0 , параллельной оси Oz , линия $S \subset S_0$ — поперечное сечение цилиндрической поверхности $\Sigma \subset \Sigma_0$. Поверхность Σ внесена в электрическое поле $\mathbf{E}(x, y)$, перпендикулярное оси Oz . Показать, что плотности σ_1 и σ_2 зарядов на внутренней и внешней сторонах, соответственно, поверхности Σ удовлетворяют системе интегральных уравнений

$$\begin{cases} u(M) = u_E(M) + 2 \int_S \sigma(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} ds, & M \in S, \\ \sigma_2(M) - \sigma_1(M) = \frac{E_n(M)}{2\pi} - \frac{1}{\pi} \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP}}{r_{PM}} ds, & M \in S, \end{cases}$$

где $u(M)$ — потенциал поверхности Σ , $u_E(M)$ — потенциал поля $\mathbf{E}(M)$, $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$.

5.286. Внутри полого проводящего неограниченного цилиндра $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, -\infty < z < \infty\}$ расположены линейные заряды, параллельные оси Oz , суммарный заряд единицы длины которых q , их поле $\mathbf{E}$. Найти плотность заряда на цилиндре.

5.287. Решить задачу 5.286, если на расстоянии d от оси цилиндра параллельно ей расположена нить, заряд единицы длины которой равен q .

5.288. Решить задачу 5.286, если на расстоянии d от оси цилиндра параллельно ей расположена нить, дипольный момент единицы длины которой равен: 1) $\mathbf{p} = p\mathbf{e}_x$; 2) $\mathbf{p} = p\mathbf{e}_y$.

5.289. Внутри полого проводящего неограниченного цилиндра $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, -\infty < z < \infty\}$ расположены линейные заряды, параллельные оси Oz , суммарный заряд единицы длины которых q , их поле $\mathbf{E}$. Найти плотность заряда на цилиндре, если его собственный заряд на единицу длины равен q_0 .

5.290. Внутри полого проводящего цилиндра на расстоянии d от оси параллельно ей расположена нить, линейная плотность заряда которой q . Найти плотность заряда на цилиндре, если его собственный заряд на единицу длины равен q_0 .

5.291. Внутри полого проводящего цилиндра на расстоянии d от оси параллельно ей расположена нить, дипольный момент единицы длины которой равен: 1) $\mathbf{p} = p\mathbf{e}_x$; 2) $\mathbf{p} = p\mathbf{e}_y$ (задача 5.289). Найти плотность заряда на цилиндре, если его собственный заряд на единицу длины равен q_0 .

5.292. Проводник, заполняющий полупространство $y < 0$, находится в электрическом поле, напряженность которого в отсутствии проводника $\mathbf{E}(x, y) = E_x(x, y)\mathbf{e}_x + E_y(x, y)\mathbf{e}_y$. Определить плотность заряда на плоскости $y = 0$.

5.293. Параллельно проводящей заземленной плоскости на расстоянии h от нее расположена бесконечная нить, дипольный момент единицы длины которой: 1) $\mathbf{p} = p\mathbf{e}_x$; 2) $\mathbf{p} = p\mathbf{e}_y$. Определить плотность заряда на плоскости.

5.294. Между проводящими плоскостями $y = \pm h$ на одинаковом расстоянии от них расположена заряженная нить с линейной плотностью заряда q . Найти плотность заряда, индуцированного на плоскостях.

5.295. Двугранный угол ($0 < r$, $0 < \varphi < 3\pi/2$, $-\infty < z < \infty$) образован двумя проводящими полуплоскостями. Параллельно ребру угла расположена нить, координаты которой $r = r_0$, $\varphi = 3\pi/4$, заряд единицы длины q . Найти плотность заряда на гранях угла.

5.296. Параллельно краю проводящей заземленной полуплоскости ($x > 0$, $y = 0$, $-\infty < z < \infty$) помещена равномерно заряженная нить, координаты которой $x = -d$, $d > 0$, $y = 0$, заряд единицы длины q . Найти плотность заряда, индуцированного на полуплоскости.

5.3. Ответы

$$5.2. 1) u(r) = 4\pi\rho_0 r_0^2 \cdot \begin{cases} \frac{1}{\alpha+2} \left[1 - \frac{1}{\alpha+3} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\alpha+2} \right], & r \leq r_0, \\ \frac{r_0}{(\alpha+3)r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$2) u(r) = 4\pi \frac{\rho_0 r_0^2}{\alpha^2} \cdot \begin{cases} \alpha - 1 - \frac{\alpha r}{2r_0} + \frac{r_0}{\alpha r} \ln \left(1 + \frac{\alpha r}{r_0} \right) - \ln \frac{1+\alpha}{1+\frac{\alpha r}{r_0}}, & r \leq r_0, \\ \frac{r_0}{r} \left(\frac{\alpha}{2} - 1 + \frac{\ln(1+\alpha)}{\alpha} \right), & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$3) u(r) = 4\pi \frac{\rho_0 r_0^3}{r \alpha^2} \cdot \begin{cases} \frac{r}{r_0} - \frac{\operatorname{arctg} \frac{\alpha r}{r_0}}{\alpha} + \frac{r}{2r_0} \ln \frac{1+\alpha^2}{1+\frac{\alpha^2 r^2}{r_0^2}}, & r \leq r_0, \\ 1 - \frac{\operatorname{arctg} \alpha}{\alpha}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$4) u(r) = \frac{2\pi r_0^3 \rho_0}{\alpha^2 r} \cdot \begin{cases} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\alpha^2 r^2}{r_0^2} \right)}{\alpha^2} + \frac{2r}{r_0} \left(1 - \frac{r}{r_0} \right) - \\ - \frac{2r}{\alpha r_0} \operatorname{arctg} \frac{\alpha(r_0 - r)}{r_0 + \alpha^2 r}, & r \leq r_0, \\ 1 - \frac{\ln(1+\alpha^2)}{\alpha^2}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$5) u(r) = \frac{8\pi r_0^3 \rho_0}{\alpha^2 r} \cdot \begin{cases} \alpha \frac{r}{r_0} - \sqrt{\frac{r}{r_0}} - \frac{2}{3} \alpha \frac{r}{r_0} \sqrt{\frac{r}{r_0}} + \frac{\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\alpha r}{r_0}}}{\sqrt{\alpha}} - \\ - \sqrt{\alpha} \frac{r}{r_0} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\alpha}(\sqrt{r_0} - \sqrt{r})}{\sqrt{r_0} + \alpha \sqrt{r}}, & r \leq r_0, \\ \frac{\alpha}{3} - 1 + \frac{\operatorname{arctg} \sqrt{\alpha}}{\sqrt{\alpha}}, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

$$5.3. 1) u(r) = 4\pi\rho_0 r_0^2 \cdot \begin{cases} \frac{1}{\alpha^2} \left[\frac{2r_0}{\alpha r} \left(1 - e^{-\frac{\alpha r}{r_0}} \right) - e^{-\frac{\alpha r}{r_0}} - (1+\alpha)e^{-\alpha} \right], & r \leq r_0, \\ \frac{2r_0}{\alpha^3 r} \left[1 - \left(1 + \alpha + \frac{1}{2}\alpha^2 \right) e^{-\alpha} \right], & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$2) u(r) = \frac{4\pi\rho_0 r_0^3}{\alpha^3 r} \cdot \begin{cases} 2 \operatorname{ch} \frac{\alpha r}{r_0} - \frac{\alpha r}{r_0} \operatorname{sh} \frac{\alpha r}{r_0} - 2 + \frac{\alpha r}{r_0} (\alpha \operatorname{ch} \alpha - \operatorname{sh} \alpha), & 0 \leq r \leq r_0, \\ \alpha^2 \operatorname{ch} \alpha - 2\alpha \operatorname{sh} \alpha + 2 \operatorname{ch} \alpha - 2, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$3) u(r) = \frac{2\pi\rho_0 r_0^3}{\alpha^3 r} \cdot \begin{cases} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erf} \frac{\alpha r}{r_0} - \frac{\alpha r}{r_0} e^{-\alpha^2}, & 0 \leq r \leq r_0, \\ \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erf} \alpha - \alpha e^{-\alpha^2}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$4) u(r) = \frac{2\pi\rho_0 r_0^3}{\alpha^2 r} \cdot \begin{cases} \frac{3r^2}{2r_0^2} + \frac{(1-2\alpha)r}{\alpha r_0} + \frac{2(1+\alpha)r}{\alpha r_0} \ln(1+\alpha) - \\ - \frac{1}{\alpha^2} \left(1 + \frac{\alpha r}{r_0}\right)^2 \ln\left(1 + \frac{\alpha r}{r_0}\right), & 0 \leq r \leq r_0, \\ (\alpha^2 - 1) \ln(1+\alpha) + \frac{\alpha(2-\alpha)}{2}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$5) u(r) = \frac{4\pi\rho_0 r_0^3}{\alpha^3 r} \cdot \begin{cases} \frac{\alpha r}{2r_0} \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha^2 r^2}{3r_0^2}\right) \operatorname{erf} \frac{\alpha r}{r_0} + \frac{1}{3\sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{\alpha^2 r^2}{2r_0^2}\right) e^{-\frac{\alpha^2 r^2}{r_0^2}} + \\ + \frac{\alpha r}{2r_0} \left(\alpha^2 - \frac{1}{2}\right) \operatorname{erf} \alpha + \frac{\alpha^2 r}{2r_0 \sqrt{\pi}} e^{-\alpha^2} - \frac{1}{3\sqrt{\pi}}, & 0 \leq r \leq r_0, \\ \frac{\alpha^3}{3} \operatorname{erf} \alpha + \frac{\alpha^2 + 1}{3\sqrt{\pi}} e^{-\alpha^2} - \frac{1}{3\sqrt{\pi}}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$6) u(r) = \frac{2\pi\rho_0 r_0^3}{r} \cdot \begin{cases} \frac{2r}{r_0} \operatorname{erf} \alpha - \left(\frac{r^2}{r_0^2} + \frac{1}{2\alpha^2}\right) \operatorname{erf} \frac{\alpha r}{r_0} - \\ - \frac{r}{\alpha r_0 \sqrt{\pi}} e^{-\frac{\alpha^2 r^2}{r_0^2}} + \frac{2r}{\alpha r_0 \sqrt{\pi}} e^{-\alpha^2}, & 0 \leq r \leq r_0, \\ \left(1 - \frac{1}{2\alpha^2}\right) \operatorname{erf} \alpha + \frac{1}{\alpha \sqrt{\pi}} e^{-\alpha^2}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$7) u(r) = \frac{4\pi\rho_0 r_0^3}{\alpha^{\beta+3} r} \cdot \begin{cases} \left(\beta + 2 - \frac{\alpha r}{r_0}\right) \gamma\left(\beta + 2, \frac{\alpha r}{r_0}\right) + \\ + \frac{\alpha r}{r_0} \gamma(\beta + 2, \alpha) - \left(\frac{\alpha r}{r_0}\right)^{\beta+2} e^{-\frac{\alpha r}{r_0}}, & 0 \leq r \leq r_0, \\ (\beta + 2) \gamma(\beta + 2, \alpha) - \alpha^{\beta+2} e^{-\alpha}. & r_0 \leq r. \end{cases}$$

$$5.4. 1) u(r) = \frac{4\pi\rho_0 r_0^3}{\alpha^3 r} \cdot \begin{cases} \frac{\alpha r}{r_0} \left(\cos \frac{\alpha r}{r_0} + \alpha \sin \alpha + \cos \alpha\right) - 2 \sin \frac{\alpha r}{r_0}, & r \leq r_0, \\ \alpha^2 \sin \alpha + 2\alpha \cos \alpha - 2 \sin \alpha, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$2) u(r) = \frac{4\pi\rho_0 r_0^3}{\alpha^2 r} \cdot \begin{cases} \sin \frac{\alpha r}{r_0} - \frac{\alpha r}{r_0} \cos \alpha, & 0 \leq r \leq r_0, \\ \sin \alpha - \alpha \cos \alpha, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$3) u(r) = \frac{4\pi\rho_0 r_0^3}{\alpha r} \cdot \begin{cases} \cos \frac{\alpha r}{r_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha r}{r_0}\right)^2 + \alpha^2 \frac{r}{r_0} \left(1 - \frac{r}{r_0}\right) - \\ - 1 - \frac{\alpha r}{r_0} \left[\operatorname{Si}(\alpha) - \operatorname{Si}\left(\frac{\alpha r}{r_0}\right)\right], & 0 \leq r \leq r_0, \\ \frac{\alpha^2}{2} + \cos \alpha - 1, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$4) u(r) = \frac{4\pi\rho_0 r_0^3}{\alpha r} \cdot \begin{cases} \alpha - \sin \frac{\alpha r}{r_0} + \frac{\alpha r}{r_0} \left[\ln \frac{r_0}{r} + \operatorname{Ci}(\alpha) - \operatorname{Ci}\left(\frac{\alpha r}{r_0}\right)\right], & 0 \leq r \leq r_0; \\ \alpha - \sin \alpha. \end{cases}$$

$$5) u(r) = \frac{4\pi\rho_0 r_0^3}{r\alpha\sqrt{\alpha}} \cdot \begin{cases} -\sqrt{\frac{\alpha r}{r_0}} \cos \frac{\alpha r}{r_0} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} C(\sqrt{\alpha}) + \frac{\alpha r}{r_0} \left[S(\alpha) - S\left(\frac{\alpha r}{r_0}\right) \right], & 0 \leq r \leq r_0, \\ -\sqrt{\alpha} \cos \alpha + \sqrt{\frac{\pi}{2}} C(\sqrt{\alpha}). & r_0 \leq r. \end{cases}$$

5.5. 1) $k = \frac{3}{4}$, $u(r) = 4\pi\rho_0(2r + r_0)(r_0 - r)^2\eta(r_0 - r)$; 2) k — корень уравнения $\operatorname{tg} k = \frac{2k}{2 - k^2}$, $u(r) = \frac{4\pi\rho_0 r^2}{k^2} \left(\cos \frac{kr}{r_0} - \frac{2r_0}{kr} + \frac{k^2 + 2}{2k} \sin k \right) \eta(r_0 - r)$; 3) k — корень уравнения $\operatorname{tg} k = k$, $u(r) = \frac{4\pi\rho_0 r^3}{k^2 r} \left(\sin \frac{kr}{r_0} - \frac{r}{r_0} \cos k \right) \eta(r_0 - r)$; 4) k — корень любого из уравнений $\operatorname{tg} \frac{k}{2} = \frac{k}{2 \pm k}$, $u(r) = \frac{4\pi\rho_0 r^3}{k^3 r} \left(2 \cos \frac{kr}{r_0} + \frac{kr}{r_0} \sin \frac{kr}{r_0} + \frac{kr}{r_0} \sin k - \frac{k^2 r}{r_0} \cos k - 2 \right) \eta(r_0 - r)$; 5) $k \in \emptyset$.

$$5.6. u(r) = 2\pi\rho_0 \cdot \begin{cases} r_2^2 - r_1^2, & 0 \leq r \leq r_1, \\ r_2^2 - \frac{1}{3} \left(r^2 + \frac{2r_1^3}{r} \right), & r_1 \leq r \leq r_2, \\ \frac{2}{3r} (r_2^3 - r_1^3), & r_2 \leq r. \end{cases}$$

$$5.7. r_1 = 2r_0, u(r) = 4\pi\rho_0 \cdot \begin{cases} -\frac{r_0^2}{2}, & 0 \leq r \leq r_0, \\ -\frac{3r^2}{2} + 7rr_0 - 10r_0^2 + \frac{4r_0^3}{r}, & r_0 \leq r \leq 2r_0, \\ 0, & 2r_0 \leq r. \end{cases}$$

$$5.8. F = \begin{cases} \frac{Q_1 Q_2 r}{r_0^3} \left(1 - \frac{9r}{16r_0} + \frac{r^3}{32r_0^3} \right), & r \leq 2r_0, \\ \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, & 2r_0 \leq r, \end{cases}$$

где r — расстояние между центрами шаров.

5.9. У к а з а н и е. Если $M \in \mathbb{R}^3/\overline{\Omega}$, то интеграл собственный и его можно дифференцировать по параметру.

5.10. Р е ш е н и е. Пусть d — диаметр шара, содержащего область Ω , и $|\rho(M)| \leq C$. С помощью тождества (рис. 5.15)

$$\frac{1}{r_{MP}} = \frac{1}{r_{MP}} - \frac{1}{r_{OM}} + \frac{1}{r_{OM}} = \frac{1}{r_{OM}} + \frac{r_{OM} - r_{MP}}{r_{MP}r_{OM}}$$

объемному потенциалу можно придать форму

$$u(M) = \frac{1}{r_{OM}} + \int_{\Omega} \frac{r_{OM} - r_{MP}}{r_{MP}r_{OM}} \rho(P) dr.$$

Нужно доказать, что второе слагаемое есть $O\left(\frac{1}{r_{OM}^2}\right)$, т. е. существуют положительные числа $A > 0$ и $R > 0$ такие, что второе слагаемое по абсолютной величине меньше или равно $\frac{A}{r_{OM}^2}$ при условии $r_{OM} \geq R$. Из неравенства треугольника $|r_{OM} - r_{MP}| \leq r_{OP} \leq d$ следует оценка

$$\left| \frac{r_{MP}}{r_{OM}} - 1 \right| \leq \frac{l}{r_{OM}} \leq \frac{1}{2}, \text{ если } r_{OM} \geq 2d,$$

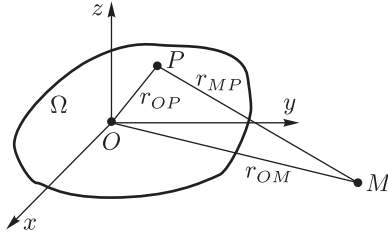


Рис. 5.15

откуда

$$-\frac{1}{2} \leq \frac{r_{MP}}{r_{OM}} - 1 \leq \frac{1}{2} \implies \frac{r_{MP}}{r_{OM}} \geq \frac{1}{2} \implies \frac{1}{r_{MP}} \leq \frac{2}{r_{OM}}.$$

Таким образом,

$$\left| \int_{\Omega} \frac{r_{OM} - r_{MP}}{r_{MP} r_{OM}} \rho(P) d\mathbf{r} \right| \leq \int_{\Omega} \left| \frac{r_{OM} - r_{MP}}{r_{MP} r_{OM}} \right| |\rho(P)| d\mathbf{r} \leq \int_{\Omega} \frac{2dC}{r_{OM}} d\mathbf{r} \leq \frac{A}{r_{OM}},$$

если $r_{OM} \geq 2d$.

$$\mathbf{5.11.} \quad 1) u(r, \theta) = \pi \rho_0 r_0^2 \cdot \begin{cases} \left(\frac{4}{3} - \frac{r}{r_0} \right) \frac{r}{r_0} \cos \theta, & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^2}{3r^2} \cos \theta, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$2) u(r, \theta, \varphi) = 2\pi \rho_0 r_0^2 \cdot \begin{cases} \left(\frac{1}{3} - \frac{r^2}{5r_0^2} \right) \frac{r}{r_0} \sin \theta \cos \varphi, & r \leq r_0, \\ \frac{4\pi \rho_0 r_0^4}{15r^2} \sin \theta \cos \varphi, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$3) u(r, \theta, \varphi) = \frac{4\pi \rho_0}{105} \cdot \begin{cases} \frac{r^3}{r_0} \left(\frac{1}{7} + \ln \frac{r}{r_0} \right) \sin^2 \theta \cos \theta \sin 2\varphi, & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^6}{7r^4} \sin^2 \theta \cos \theta \sin 2\varphi, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$4) u(r, \theta, \varphi) = \frac{4\pi \rho_0}{3} \cdot \begin{cases} \left[\frac{r^4}{2r_0^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{3r^2}{11r_0^2} \right) \sin^2 2\theta + \right. \\ \left. + r^2 \left(\frac{r^4}{33r_0^4} - \frac{2r^2}{21r_0^2} + \frac{3}{35} \right) \sin^2 \theta \right] \cos 2\varphi, & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^5}{r^3} \left[\frac{r_0^2}{33r^2} \sin^2 2\theta + \frac{4}{21} \left(\frac{1}{5} - \frac{r_0^2}{3r^2} \sin^2 \theta \right) \sin^2 \theta \right] \cos 2\varphi, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

$$\mathbf{5.12.} \quad 1) u(r, \theta) = 2\pi \rho_0 \cdot \begin{cases} \left(\frac{r_0^2}{3} - \frac{r^3}{5r_0} \right) \cos \theta, & r \leq r_0, \\ \frac{2r_0^4}{15r^2} \cos \theta, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$2) u(r, \theta, \varphi) = \frac{2\pi \rho_0}{3} \cdot \begin{cases} 3r^2 \left(\frac{1}{5} - \frac{r^2}{7r_0^2} \right) \cos^2 \theta + r_0^2 \left(1 - \frac{r^2}{5r_0^2} - \frac{2r^4}{35r_0^4} \right), & r \leq r_0, \\ \frac{6r_0^5}{35r^3} \cos^2 \theta + \frac{2r_0^3}{5r} \left(2 - \frac{r_0^2}{7r^2} \right), & r_0 \leq r. \end{cases}$$

$$5.13. u(z) = \frac{\pi\rho_0}{3z} \left[2(z^2 + r_0^2)^{\frac{3}{2}} - (z^2 + r_0^2 - 2zh)^{\frac{3}{2}} + 3z(z-h)|z-h| - z^2|z| \right].$$

$$5.14. u(z) = \pi\rho_0 \left\{ \sin \alpha \left[\left(\frac{h}{\sin \alpha} - r_1 \cos \alpha - z \sin \alpha \right) f(z) + \right. \right. \\ \left. \left. + (r_1 \cos \alpha + z \sin \alpha) \sqrt{z^2 + r_1^2} + (r_1 \sin \alpha - z \cos \alpha)^2 \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \ln \left| \frac{\frac{h}{\sin \alpha} - r_1 \cos \alpha - z \sin \alpha + f(z)}{r_1 \cos \alpha + z \sin \alpha - \sqrt{z^2 + r_1^2}} \right| \right] + (z-h)|z-h| - z|z| \right\},$$

$$f(z) = \sqrt{(r_1 - h \operatorname{ctg} \alpha)^2 + (z-h)^2}.$$

$$5.15. 1) u(z) = \frac{\pi\rho_0}{3z} \left[2(z^2 + r_0^2)^{\frac{3}{2}} + (z+2r_0)(z-r_0)|z-r_0| - 3z^2|z| \right];$$

$$2) u(z) = \pi\rho_0 \left[\frac{(z^2 + r_0^2 - h^2)^{\frac{3}{2}} - |z-r_0+h|^3}{3(z+h)} + \frac{(z-r_0-h)|z-r_0-h|}{2} - \frac{z|z|}{2} \right];$$

$$3) u(z) = \frac{\pi\rho_0}{3z} \left[2f^3(z) + 3z^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha \ln \left| \frac{r_0 - z \cos \alpha + f(z)}{r_0 + |z| - z \cos \alpha} \right| + \right. \\ \left. + 3z \cos \alpha (r_0 - z \cos \alpha) f(z) - 3z^2|z| \sin^2 \alpha + (z+2r_0)(z-r_0)|z-r_0| \right], \\ f(z) = \sqrt{z^2 - 2r_0z \cos \alpha + r_0^2};$$

$$4) u(z) = \pi\rho_0 \left[(z+h) \sqrt{(z+h)^2 + r_0^2} - (z-h) \sqrt{(z-h)^2 + r_0^2} + \right. \\ \left. + r_0^2 \ln \left| \frac{\sqrt{(z-h)^2 + r_0^2} - z + h}{\sqrt{(z+h)^2 + r_0^2} - z - h} \right| - (z+l)|z+l| + (z-l)|z-l| \right];$$

$$5) u(z) = \pi\rho_0 \left\{ \frac{1}{\cos \alpha} \left[z^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \ln \left| \frac{h - z \cos^2 \alpha + f(z)}{(|z| - z \cos \alpha) \cos \alpha} \right| + (h - z \cos^2 \alpha) f(z) \right] + \right. \\ \left. + (z-h)|z-h| - z|z| \sin^2 \alpha \right\}, \quad f(z) = \sqrt{h^2 - 2hz \cos^2 \alpha + z^2 \cos^2 \alpha};$$

$$6) u(z) = \pi\rho_0 [(h+p-z)f(z) - p|z| + \\ + p(2z-p) \ln \frac{h+p-z+f(z)}{p+|z|-z} + (z-h)|z-h|], \quad f(z) = \sqrt{(z-h)^2 + 2hp};$$

$$7) u(z) = \frac{\pi\rho_0}{2} \left[\frac{z^2 - 2a^2}{\sqrt{2}} \ln \left| \frac{2h - z + \sqrt{2}f(z)}{2a - z + \sqrt{2}|z-a|} \right| + \right. \\ \left. + (z-h)f(z) + 2(z-h)|z-h| - z|z-a| \right], \quad f(z) = \sqrt{(z-h)^2 + h^2 - a^2};$$

$$8) u(z) = \pi\rho_0 \left\{ \frac{b}{c} \left[\frac{bz + c^2}{c} |z-b| - \frac{bz - c^2}{c} |z+b| + \frac{a^2(z^2 + c^2)}{c^2} + \frac{a^2(z^2 + c^2)}{c^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\arcsin \frac{bz + c^2}{a\sqrt{z^2 + c^2}} - \arcsin \frac{bz - c^2}{a\sqrt{z^2 + c^2}} \right) \right] + \right. \\ \left. + (z-b)|z-b| - (z+b)|z+b| \right\}, \quad c = \sqrt{a^2 - b^2};$$

$$9) u(z) = \pi\rho_0 \left\{ \frac{b}{c} \left[\frac{bz + c^2}{c} |z+b| - \frac{bz - c^2}{c} |z-b| + \frac{a^2(z^2 + c^2)}{c^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \ln \left| \frac{c^2 - bz + c|b-z|}{c^2 + bz - c|b+z|} \right| \right] + (z-b)|z-b| - (z+b)|z+b| \right\}, \quad c = \sqrt{b^2 - a^2};$$

$$u(r) = 2\pi\rho_0 \cdot \begin{cases} (r_2^2 - r_1^2), & r \leq r_1, \\ \left(r_2^2 - \frac{1}{3}r^2 - \frac{2}{3}\frac{r_1^3}{r}\right), & r_1 \leq r \leq r_2, \\ \frac{2}{3}(r_2^3 - r_1^3)\frac{1}{r}, & r_2 \leq r. \end{cases}$$

$$5.17. u(z) = \frac{\pi\rho_0}{3z} \left[2(r_0^2 + z^2)^{\frac{3}{2}} + (z + 2r_0)(z - r_0)|z - r_0| - |z|^3 \right].$$

$$5.18. u(r) = \frac{4\pi\rho_0}{15r_0z^2} \left[(z^2 + r_0^2)^{\frac{5}{2}} - |z|^5 - r_0^2 \left(\frac{5}{2}z^3 - r_0^3 \right) \text{sign}(z - r_0) \right]; u(0) = 2\pi\rho_0r_0.$$

$$5.19. u(r) = \frac{\pi\rho_0r_0}{6z^2} \left[\left(\frac{5}{2}z^2 + r_0^2 \right) \sqrt{z^2 + r_0^2} + \frac{3z^4}{2r_0} \ln \frac{r_0 + \sqrt{z^2 + r_0^2}}{|z|} - \right. \\ \left. - (4z^3 - r_0^3) \text{sign}(z - r_0) \right]; u(0) = 2\pi\rho_0r_0^2.$$

$$5.20. u(r) = 2\pi\rho_0\sqrt{r_0} \left[\sqrt{r_0 - h} (|z + h - r_0| - \frac{2}{3}(3z + h - r_0) \text{sign}(z + h - r_0)) \right] + \\ + 2\pi\rho_0\sqrt{r_0} \frac{z^2 + r_0^2 - h^2}{\sqrt{2|z + h|}} \cdot \begin{cases} \text{arctg} \frac{|z + h - r_0|}{\sqrt{2|z + h|(r_0 - h)}}, & z + h \geq 0, \\ \ln \frac{|z + h - r_0| - \sqrt{2|z + h|(r_0 - h)}}{|z + h - r_0| + \sqrt{2|z + h|(r_0 - h)}}, & z + h \leq 0. \end{cases}$$

$$5.21. 1) u(0) = \frac{\pi\rho_0}{\alpha r_0} \left(r_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} e^{\alpha r_0^2} \text{Erf}(\sqrt{\alpha} r_0) \right); 2) 0; 3) \frac{1}{2}u(0).$$

$$5.22. u(0) = \frac{4\pi\rho_0(a + r_0)}{3a} [(a - r_0)^2 \mathbf{K}(k) - (a^2 - r_0^2) \mathbf{E}(k)], k = \frac{2\sqrt{ar_0}}{a + r_0}.$$

$$5.23. \mathbf{E}(0) = -2\pi\rho_0 \left(h - \frac{\sqrt{a^2b^2 + (a^2 + b^2)h^2} - ab}{a^2 + b^2} b \right) \mathbf{e}_z.$$

$$5.24. 1) u(0) = \frac{4\pi\rho_0r_0^2}{3}, \mathbf{E}(0) = -2\pi\rho_0r_0\mathbf{e}_r; 2) u(0) = 0, \mathbf{E}(0) = -\frac{\pi^2r_0}{4}\mathbf{e}_y.$$

$$5.25. 1) u(0) = \frac{\pi\rho_0}{3p} \left[(h^2 + 4p^2)^{\frac{3}{2}} - 8p^3 - 3ph^2 \right],$$

$$\mathbf{E}(0) = -2\pi\rho_0 \left(h - 2p \ln \frac{h + \sqrt{h^2 + 4p^2}}{2p} \right) \mathbf{e}_z;$$

$$2) u(0) = 0, \mathbf{E}(0) = \frac{\pi\rho_0}{4r_0} \left(\frac{h^2 + 4p^2}{2p} \sqrt{h^2 + 4p^2} - 16p^2 - 3h^2 \right) \mathbf{e}_y.$$

$$5.26. -q\pi\rho_0\sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \text{erf}(\sqrt{\alpha}r)\mathbf{e}_z.$$

$$5.27. u(0) = \frac{2\pi\rho_0abc}{\sqrt{a^2 - c^2}} F(\alpha, k), \alpha = \arcsin \frac{\sqrt{a^2 - c^2}}{a}, k = \sqrt{\frac{a^2 - c^2}{a^2 - b^2}}.$$

Решение (фрагменты). В сферической системе координат с началом в центре эллипсоида и с осью Oz , направленной по наибольшей полуоси,

$$u(0) = \rho_0 \int_{\Omega} \frac{d\mathbf{r}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = 8\rho_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\theta d\theta \int_0^{r(\theta, \varphi)} r dr,$$

где $r(\theta, \varphi) = \left(\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \varphi}{b^2} + \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \varphi}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$. После интегрирования по r и φ остается интеграл,

$$u(0) = 2\pi\rho_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \theta d\theta}{\sqrt{\left(\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right) \left(\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{c^2} \right)}},$$

который заменаи $\frac{\sqrt{a^2 - c^2}}{a} \cos \theta = t$ и $t = \sin \alpha$ сводится к эллиптическому интегралу первого рода.

5.28. 1) $\mathbf{F} = -\frac{2\pi q\rho_0 ab}{a+b} \mathbf{e}_z$; 2) $\mathbf{F} = -\frac{\pi q\rho_0 b}{2\sqrt{2}k^2} [K(k) - E(k)] (\mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y)$;

3) $\mathbf{F} = -\frac{3\pi q\rho_0 b}{4k^2} [K(k) - E(k)] \mathbf{e}_x$, $k^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$.

5.29. 1) $\mathbf{F} = -\frac{\pi q\rho_0 a}{k^2} [(k^2 - 1)K(k) + E(k)] \mathbf{e}_y$;

2) $\mathbf{F} = -\frac{\pi q\rho_0 a}{4k^2} [(k^2 - 1)K(k) + E(k)] \mathbf{e}_x$; 3) $\mathbf{F} = -\frac{\pi q\rho_0 ab}{a+b} \mathbf{e}_z$, $k^2 = \frac{b^2 - a^2}{b^2}$.

5.30. Решение (см. [59], гл. 18, § 1). Шар $B(M, d)$, где $M \in S$, содержит часть S_d поверхности, которая в общем случае не является связным множеством. Если бы существовало число d , при котором условие 2) было выполнено, то положительное $d' < d$ обладало бы таким же свойством. Поэтому можно считать, что $Ad^\lambda < 1$. Пусть $\gamma = \gamma(\mathbf{n}_M, \mathbf{n}_P)$ — угол между единичными нормальными $\mathbf{n}_M$ и $\mathbf{n}_P$. Для любой точки $P \in S_d$

$$|\mathbf{n}_M - \mathbf{n}_P| \leq Ar_{MP}^\lambda \leq Ad^\lambda < 1 \Rightarrow \sqrt{\mathbf{n}_M^2 + \mathbf{n}_P^2 - 2|\mathbf{n}_M||\mathbf{n}_P|\cos \gamma} < 1,$$

откуда $2 - \cos \gamma < 1 \Rightarrow \cos \gamma > \frac{1}{2}$. Итак, для любой точки $P \in S_d$ угол $\gamma(\mathbf{n}_M, \mathbf{n}_P) < \frac{\pi}{3}$.

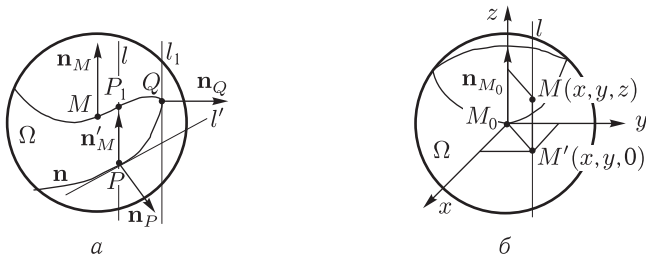


Рис. 5.16

Если допустить, что в случае $\mathbb{R}^2$ существует прямая l , пересекающая S_d в двух точках P и P_1 , где P — точка входа прямой l в область Ω (рис. 5.16, а), то нормаль $\mathbf{n}_P$ и вектор $\mathbf{n}'_M$ будут расположены по разные стороны от касательной l' к линии S_d в точке P . Это значит, что угол $\gamma(\mathbf{n}_M, \mathbf{n}_P) > \frac{\pi}{2}$, что невозможно. Если прямая l_1 касается S_d в точке Q , то угол $\gamma(\mathbf{n}_M, \mathbf{n}_P) = \frac{\pi}{2}$,

что также невозможно. В случае $\mathbb{R}^3$ все элементы доказательства остаются теми же самыми.

5.31. Решение. Пусть $f(x)$, $x \in \mathbb{R}^n$, определена на компакте X_f (компакт — замкнутое ограниченное множество). Запись $f(x) \in C_\lambda$ будет означать, что $f(x)$ непрерывна по Гельдеру. Если функция $f(x)$, определенная на ограниченном промежутке $[a; b]$, непрерывна по Гельдеру, т.е.

$$\exists A > 0, \lambda \in (0; 1] \quad \forall x_1, x_2 \in [a; b] : |f(x_1) - f(x_2)| \leq |x_1 - x_2|^\lambda,$$

то $f(x)$ непрерывна на $[a; b]$. Действительно,

$$\lim_{x_2 \rightarrow x_1} |f(x_1) - f(x_2)| \leq A \lim_{x_2 \rightarrow x_1} |x_1 - x_2|^\lambda = 0.$$

Обратное утверждение неверно. Примером является функция, непрерывная на $\left[0; \frac{1}{2}\right]$,

$$f(x) = \begin{cases} -\frac{1}{\ln x}, & x \in \left(0; \frac{1}{2}\right], \\ 0, & x = 0. \end{cases}$$

Действительно, если бы $f(x) \in C_\lambda$, то при $x_1 = 0$, $x_2 = x \in \left[0; \frac{1}{2}\right]$ выполнялось бы неравенство

$$\left|\frac{1}{\ln x}\right| < A x^\lambda \implies \frac{1}{|x^\lambda \ln x|} < A.$$

Однако таких чисел A и $\lambda \in (0; 1]$ не существует, так как $\lim_{x \rightarrow 0} |x^\lambda \ln x| = 0$.

С другой стороны, если $f(x) \in C^1[a; b]$, то существует такая константа $A > 0$, что $|f'(x)| \leq A$ для любого $x \in [a; b]$. Из формулы Лагранжа

$$f(x_1) - f(x_2) = f'(\xi)(x_1 - x_2), \quad \xi \in (a; b),$$

следует неравенство $|f(x_1) - f(x_2)| \leq A|x_1 - x_2|$, т.е. $f(x)$ непрерывна по Гельдеру при $\lambda = 1$. Обратное неверно: функция $f(x) = |x|$, $-1 \leq x \leq 1$ непрерывна по Гельдеру, что следует из неравенства

$$|x_1 - x_2| \geq ||x_1| - |x_2|| \implies |f(x_1) - f(x_2)| \leq A|x_1 - x_2|^\lambda, \quad A = 1, \lambda = 1,$$

но не имеет производной на $[-1; 1]$. Таким образом, $C^1 \subset C_\lambda \subset C^2$, т.е.: если $f \in C^1$, то $f \in C_\lambda$, если $f \in C_\lambda$, то $f \in C$.

Пусть S — поверхность Ляпунова, $M_0 \in S$ — произвольная точка, с которой связана локальная прямоугольная система координат с центром в точке M_0 , с осью M_0z , направленной по внешней нормали $\mathbf{n}_{M_0}$ (рис. 5.16, б). Согласно п. 2 определения поверхности Ляпунова прямая l , параллельная нормали $\mathbf{n}_{M_0}$ может пересечь часть поверхности S внутри сферы $S(M_0, d)$ только в одной точке. Таким образом, каждой точке $M(x, y, z) \in S_d$ ставится в соответствие ее проекция $M'(x, y, 0)$ на плоскости xM_0z . Это соответствие задает однозначную функцию $z = f(x, y)$, которая определяет уравнение поверхности S в окрестности $S(M_0, d)$. В каждой точке $M \in S_d$ существует касательная плоскость, следовательно, определен нормальный вектор $\mathbf{n}_M$, координаты которого пропорциональны частным производным функции $f(x, y) - z$. Итак, $z = f(x, y)$ обладает частными производными f_x и f_y . Поскольку вектор $\mathbf{n}_M$, а также его координаты как функции точки M непрерывны по Гельдеру, то это свойство присуще частным производным f_x и f_y . Следовательно, поверхность Ляпунова принадлежит классу гладкости C^1 . Если же ограниченная замкнутая поверхность принадлежит классу гладкости C^2 , то в некоторой окрестности каждой точки она описывается уравнением $z = f(x, y)$ (возможно неявным

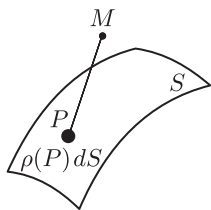


Рис. 5.17

образом), при этом $f \in C^2$. Отсюда следует, что частные производные f_x и f_y непрерывны по Гельдеру и S есть поверхность Ляпунова.

5.32. Потенциал в точке M равен сумме потенциалов $\frac{\rho(p)ds}{r_{MP}}$ «точечных» зарядов $\rho(P)ds$, распределенных с плотностью $\rho(P)$ на поверхности S (рис. 5.17).

5.33. См. указание к решению задачи 5.9.

5.34. См. решение задачи 5.10.

$$\mathbf{5.35.} \quad 1) v(r) = 4\pi\sigma_0 r_0 \cdot \begin{cases} 1, & r \leq r_0, \\ \frac{r_0}{r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$2) v(r, \theta) = \frac{4\pi\sigma_0 r_0}{3} \cdot \begin{cases} \frac{r}{r_0} \sin \theta \sin \varphi, & r < r_0, \\ \frac{r_0^2}{r^2} \sin \theta \sin \varphi, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$3) v(r, \theta, \varphi) = \frac{4\pi\sigma_0 r_0}{7} \cdot \begin{cases} \frac{r^3}{r_0^3} \sin^3 \theta \cos 3\varphi, & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^4}{r^4} \sin^3 \theta \cos 3\varphi, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$4) u(r, \theta) = 2\pi\sigma_0 r_0 \cdot \begin{cases} C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \left(\frac{r}{r_0}\right)^n P_n(\cos \theta), & r \leq r_0, \\ C_0 \frac{r_0}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \left(\frac{r_0}{r}\right)^{n+1} P_n(\cos \theta), & r_0 \leq r, \end{cases}$$

$$\text{где } C_0 = 1 - \cos \theta_0, \quad C_n = \frac{P_{n-1}(\cos \theta_0) - P_{n+1}(\cos \theta_0)}{2n+1}.$$

$$\mathbf{5.36.} \quad v(r, \theta, \varphi) = 4\pi \cdot \begin{cases} \sigma_1 r_1 + \frac{\sigma_2 r}{3} \sin \theta \sin \varphi, & 0 \leq r \leq r_1, \\ \frac{\sigma_1 r_1^2}{r} + \frac{\sigma_2 r}{3} \sin \theta \sin \varphi, & r_1 \leq r \leq r_2, \\ \frac{\sigma_1 r_1^2}{r} + \frac{\sigma_2 r_2^3}{3r^2} \sin \theta \sin \varphi, & r_2 \leq r. \end{cases}$$

$$\mathbf{5.37.} \quad u(z) = 2\pi r_0 \sigma_0 \ln \left| \frac{\sqrt{(z-h)^2 + r_0^2} - z + h}{\sqrt{(z-h)^2 + r_0^2} - h + z} \right|.$$

$$\mathbf{5.38.} \quad u(z) = \frac{2\pi\sigma_0 r_0}{z} \left(\sqrt{z^2 + r_0^2 - 2zr_0 \cos \alpha} - |z - r_0| \right).$$

$$\mathbf{5.39.} \quad u(z) = 2\pi\sigma_0 \sin \alpha \left(\sqrt{z^2 - 2zh + l^2} - |z| + z \cos \alpha \ln \left| \frac{l - z \cos \alpha + \sqrt{z^2 - 2zh + l^2}}{|z| - z \cos \alpha} \right| \right),$$

$$l \cos \alpha = h.$$

$$\mathbf{5.40.} \quad 1) \mathbf{E}(z) = -2\pi\sigma_0 \left(\frac{1}{\sqrt{z^2 + r_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{(z-h)^2 + r_0^2}} \right) \mathbf{e}_z;$$

$$2) \mathbf{E}(z) = \pi\sigma_0 r_0 \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + r_0^2}} - \frac{h-z}{\sqrt{(z-h)^2 + r_0^2}} \right) \mathbf{e}_x;$$

$$3) \mathbf{E}(z) = -\pi\sigma_0 \left(\frac{1}{\sqrt{z^2 + r_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{(z-h)^2 + r_0^2}} \right) \mathbf{e}_z.$$

$$5.41. \mathbf{F} = -2\pi q\sigma_0 \left(1 - \sqrt{\pi\alpha} r_0 e^{\alpha r_0^2} \operatorname{Erf}(\sqrt{\alpha} r_0) \right) \mathbf{e}_z.$$

$$5.42. 1) \mathbf{F} = \frac{\pi\sigma_0 q}{6} [\sin^3 \alpha \mathbf{e}_x - 2(1 - \cos^3 \alpha) \mathbf{e}_z];$$

$$2) \mathbf{F} = -\frac{\pi\sigma_0 q}{6} [(2 - 3 \cos \alpha + \cos^3 \alpha) \mathbf{e}_x - 2 \sin^3 \alpha \mathbf{e}_z].$$

$$5.43. 1) v(z) = \frac{\pi\sigma_0 r_0}{z} \left(-|z - r_0| + \frac{(z + r_0)^2}{2\sqrt{zr_0}} \arcsin \frac{2\sqrt{zr_0}}{z + r_0} \right), \quad z > 0,$$

$$v(z) = \frac{\pi\sigma_0 r_0}{|z|} \left(r_0 + |z| - \frac{(|z| - r_0)^2}{2\sqrt{|z|r_0}} \ln \frac{\sqrt{r_0} + \sqrt{|z|}}{|\sqrt{r_0} - \sqrt{|z|}|} \right), \quad z < 0;$$

$$2) v(z) = \frac{\pi\sigma_0 r_0}{z} \left(z + r_0 - \frac{(z - r_0)^2}{2\sqrt{zr_0}} \ln \frac{\sqrt{r_0} + \sqrt{z}}{|\sqrt{r_0} - \sqrt{z}|} \right), \quad z > 0,$$

$$v(z) = \frac{\pi\sigma_0 r_0}{|z|} \left(-||z| - r_0| + \frac{(|z| + r_0)^2}{2\sqrt{|z|r_0}} \arcsin \frac{2\sqrt{|z|r_0}}{|z| + r_0} \right), \quad z < 0;$$

$$3) v(z) = \frac{2\pi\sigma_0(|z| + r_0)}{3z^2} [(z^2 + r_0^2)E(k) - (|z| - r_0)^2 K(k)], \quad k = \frac{4|z|r_0}{(|z| + r_0)^2}.$$

$$5.44. 1) \mathbf{E} = \frac{\pi\sigma_0 r_0^2}{z} \left[\frac{1}{\sqrt{z^2 + r_0^2}} - \frac{z + r_0}{2zr_0} \left[\frac{z^2 + r_0^2}{(z + r_0)^2} \left(K(k) - F\left(\frac{\pi}{4}, k\right) \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + E\left(\frac{\pi}{4}, k\right) - E(k) \right] \right] \mathbf{e}_x, \quad k^2 = \frac{4zr_0}{(z + r_0)^2}, \quad 0 < z,$$

$$\mathbf{E} = \frac{\pi\sigma_0 r_0^2}{z} \left[\frac{1}{\sqrt{z^2 + r_0^2}} - \frac{r_0 - z}{zr_0} \left[\frac{z^2 + r_0^2}{(r_0 - z)^2} F\left(\frac{\pi}{4}, k\right) - E\left(\frac{\pi}{4}, k\right) \right] \right] \mathbf{e}_x,$$

$$k^2 = \frac{4|z|r_0}{(|z| + r_0)^2}, \quad z < 0;$$

$$2) \mathbf{E} = \frac{\pi\sigma_0 r_0^2}{z^2} \left[\frac{r_0}{\sqrt{z^2 + r_0^2}} + \operatorname{sign}(z - r_0) \right].$$

$$5.45. 1) v(z) = 2\pi\sigma_0 \left(\sqrt{r_2^2 + z^2} - \sqrt{r_1^2 + z^2} \right); \quad 2) v(z) = 2\pi\sigma_0 \ln \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + z^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + z^2}};$$

$$3) v(z) = \frac{2\pi\sigma_0}{|z|} \ln \frac{r_2(|z| + \sqrt{r_1^2 + z^2})}{r_1(|z| + \sqrt{r_2^2 + z^2})}. \quad \text{Частный случай: } v(z) = 2\pi\sigma_0 \sqrt{r_2^2 + z^2} - |z|.$$

$$5.46. \mathbf{E}(z) = 2\pi\sigma_0 z \left(\frac{1}{\sqrt{r_1^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{r_2^2 + z^2}} \right) \mathbf{e}_z.$$

$$5.47. v(0) = 4\pi\sigma_0 b K(k), \quad k^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = \varepsilon^2, \quad \varepsilon - \text{эксцентриситет эллипса.}$$

5.48. $\mathbf{F} = -\pi\sigma_0 \left[\frac{4b}{\pi r_0 k^2} (K(k) - E(k)) - 1 \right] \mathbf{e}_x$, $k^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = \varepsilon^2$, ε — эксцентриситет эллипса.

5.49.
$$u(r, \theta) = \frac{Q}{r_0} \cdot \begin{cases} -2 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2n} \frac{P_{2n}(0)P_{2n}(\cos \theta)}{2n-1} - 2 \frac{r}{r_0} |\cos \theta|, & r \leq r_0, \\ \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{2n+1} \frac{P_{2n}(0)P_{2n}(\cos \theta)}{n+1}, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

Решение (фрагменты). В сферических координатах потенциал $v(M)$, где $M(r, \theta, 0) = M(r, \mathbf{s})$ и $P\left(r', \frac{\pi}{2}, \varphi\right) = P(r', \mathbf{s}') \in S$, представляет собой интеграл

$$v(M) = \sigma_0 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r_0} \frac{r' dr'}{\sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \gamma}}, \quad \cos \gamma = (\mathbf{s}\mathbf{s}') = \sin \theta \cos \varphi.$$

Если $r > r_0$, то разложение производящей функции по полиномам Лежандра преобразует интеграл к виду

$$v(M) = \sigma_0 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r_0} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{r'}{r} \right)^{k+1} P_k(\cos \gamma) dr'.$$

Далее следует применение теоремы сложения для полиномов Лежандра:

$$P_k(\cos \gamma) = P_k(0)P_k(\cos \theta) + 2 \sum_{m=2}^{m=k} \frac{(k-m)!}{(k+m)!} P_k^m(0)P^m \cos m_k \cos m_\varphi.$$

В результате интегрирования для функции $v(r, \theta, \varphi)$ получается выражение:

$$\begin{aligned} v(r, \theta, \varphi) &= 2\pi\sigma_0 \int_0^{r_0} \left(\frac{r'}{r} \right)^{k+1} P_k(0)P_k(\cos \theta) = \\ &= 2\pi\sigma_0 r_0 \sum_{k=0}^{\infty} r \left(\frac{r_0}{r} \right)^{k+2} \frac{P_k(0)P_k(\cos \theta)}{k+2} = \frac{Q}{r_0} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{2n+1} \frac{P_{2n}(0)P_{2n}(\cos \theta)}{n+1}. \end{aligned}$$

Ряд, полученный при $r > r_0$, сходится и при $r = r_0$. В этом можно убедиться, применяя признак сходимости Абеля. Если представить ряд в виде

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{P_{2n}(0)P_{2n}(\cos \theta)}{n+1} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (2n)! P_{2n}(\cos \theta)}{2^{2n} (n!)^2 (n+1)} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n b_n,$$

где

$$a_n = \frac{(2n)! \sqrt[3]{n}}{2^{2n} (n!)^2}, \quad b_n = \frac{(-1)^n P_{2n}(\cos \theta)}{\sqrt[3]{n} (n+1)},$$

то выполняются оба условия сходимости: 1) ряд с общим членом b_n сходится,

$$\left| \sum_{n=0}^{\infty} b_n \right| \leq \sum_{n=0}^{\infty} \frac{|P_{2n}(\cos \theta)|}{\sqrt[3]{n} (n+1)} \leq \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt[3]{n} (n+1)},$$

2) последовательность, общий член которой a_n , монотонна и ограничена, так как

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{2n+1}{2\sqrt[3]{n(n+1)^2}} < 1, \quad n \geq 1.$$

Итак, получено решение задачи при $r \geq r_0$. Подобным образом проводится вычисление интеграла при $r < r_0$:

$$\begin{aligned} v(r, \theta, \varphi) &= -2\pi\sigma_0 r_0 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \frac{P_{2n}(0)P_{2n}(\cos \theta)}{2n-1} + \\ &\quad + 2\pi\sigma_0 r_0 r \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(4n+3)P_{2n}(0)P_{2n}(\cos \theta)}{2(2n+1)(2n-1)}. \end{aligned}$$

Первое слагаемое — гармоническая функция в шаре $r < r_0$, непрерывная в замкнутом шаре. Второй ряд можно просуммировать следующим образом. Сумма ряда представляет собой функцию $2\pi\sigma_0 r_0 r f(\theta)$, которая 1) удовлетворяет уравнению Лапласа при $\theta \neq \frac{\pi}{2}$; 2) $f(\theta) = f(\pi - \theta)$ (следует из структуры ряда); 3) непрерывна при $\theta = \frac{\pi}{2}$ (электрическое поле ограничено) и обеспечивает скачок нормальной составляющей электрического поля $E_n|_{\theta=\frac{\pi}{2}+0} - E_n|_{\theta=\frac{\pi}{2}-0} = 4\pi\sigma_0$. Из условия 1) следует, что

$$rf(\theta) = \begin{cases} Ar \cos \theta, & 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}, \\ Br \cos \theta, & \frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi. \end{cases}$$

Условие 2) имеет место при $A = -B$. Из условия 3) вытекает, что $A = -2\pi\sigma_0$. Сумма второго ряда равна $-2\pi\sigma_0 r |\cos \theta|$. Другой способ вычисления потенциала — решение краевой задачи

$$\Delta u = -\frac{4Q_0}{r_0^2} \frac{\eta(r_0 - r)}{r} \cdot \frac{\delta\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}{\sin \theta}, \quad 0 < r, \quad 0 < \theta < \pi, \quad 0 \leq \varphi < 2\pi, \\ |u| < \infty, \quad u|_{r=\infty} = 0.$$

- 5.50.** 1) $v(x, y) = -\sigma_0 \{ (l-x) \ln [(l-x)^2 + y^2] + (l+x) \ln [(l+x)^2 + y^2] \} -$
 $- 2\sigma_0 |y| \operatorname{arctg} \frac{x^2 + y^2 - l^2}{2|y|} + C;$
 2) $v(x, y) = -\sigma_0 \left[2x + \pi|y| + x \ln(x^2 + y^2) + 2y \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right] + C;$
 3) $u(y) = C - 2\pi\sigma_0 |y|.$

5.51. 1) $u(x, y, z) = q \ln \frac{\sqrt{r^2 + (l-z)^2} + l-z}{\sqrt{r^2 + (l+z)^2} - l-z};$

2) $u(x, y, z) = q \ln \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2} - z} + C;$ 3) $u(x, y, z) = 2q \ln \frac{1}{r} + C,$

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Указание к 1). Физический смысл имеет разность потенциалов в точках M_1 и M_2 . Так как поле аксиально симметрично, то точки M_1 и M_2 можно поместить в одной плоскости (рис. 5.18, а). Разность потенциалов равна

$$u(M_1) - u(M_2) = \lim_{A \rightarrow +\infty} q \left(\int_0^A \frac{dz}{\sqrt{(z-z_1)^2 + r_1^2}} - \int_0^A \frac{dz}{\sqrt{(z-z_2)^2 + r_2^2}} \right).$$

Решение 3). Физический смысл имеет разность потенциалов в точках M_1 и M_2 , которая в данном случае зависит лишь от расстояния от точки до прямой. В связи с этим, не уменьшая общности решения, можно расположить точки так, как показано на рис. 5.18, б. Таким образом,

$$u(M_1) - u(M_2) = \lim q \left(\int_{-A}^B \frac{dz}{\sqrt{z^2 + r_1^2}} - \int_{-A}^B \frac{dz}{\sqrt{z^2 + r_2^2}} \right).$$

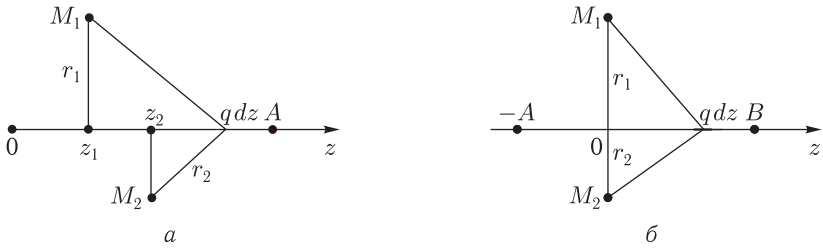


Рис. 5.18

Разность интегралов равна

$$\begin{aligned} \ln \frac{B + \sqrt{B^2 + r_1^2}}{|-A + \sqrt{A^2 + r_1^2}|} - \ln \frac{B + \sqrt{B^2 + r_2^2}}{|-A + \sqrt{A^2 + r_2^2}|} &= \ln \left(\frac{B + \sqrt{B^2 + r_1^2}}{B + \sqrt{B^2 + r_2^2}} \left| \frac{-A + \sqrt{a^2 + r_2^2}}{-A + \sqrt{-A^2 + r_1^2}} \right| \right) = \\ &= \ln \left(\frac{B + \sqrt{B^2 + r_1^2}}{B + \sqrt{B^2 + r_2^2}} \frac{A + \sqrt{A^2 + r_1^2}}{A + \sqrt{A^2 + r_2^2}} \frac{r_2^2}{r_1^2} \right) \xrightarrow{A, B \rightarrow +\infty} \ln \frac{r_2^2}{r_1^2}. \end{aligned}$$

Итак, при любых положениях точек M_1 и M_2

$$u(M_1) - 2q \ln \frac{1}{r_1} = u(M_2) - 2q \ln \frac{1}{r_2}.$$

При фиксированном значении r_1 левая часть постоянна, т. е.

$$u(M_1) = 2q \ln \frac{1}{r_1} + C.$$

Полученный результат допускает следующую формулировку: потенциал точечного заряда q в $\mathbb{R}^2$ равен $2q \ln \frac{1}{r} + C$, где r — расстояние до заряда.

$$5.52. v(z) = \frac{Q}{h} \ln \left| \frac{\sqrt{r_0^2 + (z-h)^2} + h - z}{\sqrt{r_0^2 + z^2} - z} \right|.$$

$$5.53. \mathbf{F} = -\frac{Q}{h} \left(\frac{1}{\sqrt{r_0^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{r_0^2 + (z-h)^2}} \right).$$

$$5.56. u(r, \varphi, z) = \frac{4q}{k} \sqrt{\frac{r_0}{r}} \sin \varphi \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k) - E(k) \right].$$

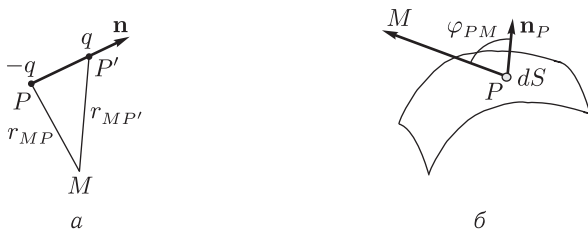


Рис. 5.19

5.57. Решение. Конечным электрическим диполем называется система из двух разноименных зарядов $-q$ и q , расстояние между которыми Δn ; вектор $\mathbf{p} = q\Delta\mathbf{n}$, направленный от отрицательного заряда к положительному, называется моментом диполя (рис. 5.19, а). Если $\Delta n \rightarrow 0$, а вектор $\mathbf{p} = q\Delta\mathbf{n}$ остается постоянным, то предельное положение этой системы называется точечным диполем с моментом $\mathbf{p}$. Потенциал электрического поля конечного диполя в точке M

$$w(M) = -\frac{q}{r_{MP}} + \frac{q}{r_{MP'}}.$$

По формуле Лагранжа

$$w(M) = q \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r_{MP}} \Delta n, \quad \mathbf{r}_{MP} = \mathbf{r}_{MP} + \theta \Delta \mathbf{n}, \quad \theta \in (0; 1), \quad |\mathbf{n}| = 1.$$

При $\Delta n \rightarrow 0$ и при условии постоянства вектора $\mathbf{p} = q\Delta\mathbf{n}$ получается потенциал точечного диполя

$$p \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r_{MP}} = \mathbf{p} \nabla_P \left(\frac{1}{n} \right) = -\frac{\mathbf{p} \mathbf{r}_{MP}}{r_{MP}^3} = \frac{\mathbf{p} \mathbf{r}_{PM}}{r_{MP}^3} = \frac{p \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}^2},$$

где индекс P у символа ∇ означает дифференцирование по координатам точки P , φ_{PM} — угол между векторами $\mathbf{n}_P$ и $\mathbf{r}_{PM}$, где точка P — начало вектора $\mathbf{r}_{PM}$.

5.58. Указание. Потенциал $w(M)$ — линейная суперпозиция «точечных» диполей $\nu(P) \mathbf{n}_P ds$ (рис. 5.19, б), выражения которых получены в решении предыдущей задачи.

5.59. Указание. Применить неравенства, полученные в решении задачи 5.10.

5.60. Указание. Воспользоваться выражением для потенциала двойного слоя (задача 5.58)

$$w(M) = \int_S \nu(P) \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r_{MP}} ds.$$

Интеграл продифференцировать по параметру (то есть, по координатам точки M), предварительно обосновав законность такой математической операции.

5.61. Решение. Пусть Ω — произвольная ограниченная область с кусочно-гладкой границей S . Если точка M не принадлежит замкнутой области $\overline{\Omega}$, то функция $\frac{1}{r_{MP}}$ как функция точки P гармоническая в области Ω и принадлежит классу $C^1(\overline{\Omega})$. Согласно свойству нормальной производной гармонической функции

$$\int_{\partial\Omega} \frac{\partial}{\partial n_P} \frac{1}{r_{MP}} ds_P = 0 \implies \int_{\partial\Omega} \frac{\cos \varphi_{PM}}{r_{PM}^2} ds_P = 0.$$

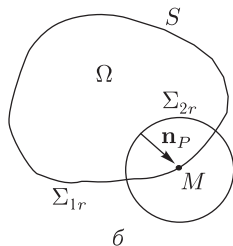
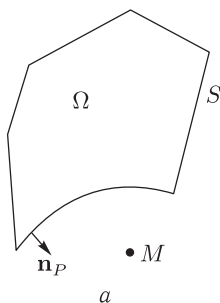


Рис. 5.20

Если точка M принадлежит области Ω с кусочно-гладкой границей S , то существует сфера $S(M, r)$ такая, что замкнутый шар $\overline{B}(M, r) \in \Omega$. Так как функция $\frac{1}{r_{MP}}$ (как функция точки P) гармоническая в $\Omega_1 = \Omega \setminus \overline{B}(M, r)$ и принадлежит $C^1(\overline{\Omega}_1)$, то

$$\int_S \frac{\cos \varphi_{PM}}{r_{PM}^2} ds_P + \int_{S_r} \frac{\cos \varphi_{PM}}{r_{PM}^2} ds_P = 0 \implies w_0(M) + 4\pi = 0,$$

т. е. $w_0(M) = -4\pi$.

Пусть наконец, точка $M \in S$, где S — поверхность Ляпунова, ограничивающая область Ω . Существует сфера $S(M, r)$ такая, что пересечение $\Sigma_{2r} = S \cap S(M, r)$ не пусто (рис. 5.20, б). Граница области $\Omega_1 = \Omega / \overline{B}(M, r)$ — кусочно-гладкая (объединение множеств Σ_{2r} и $\Sigma_{1r} = S / B(M, r)$), и (как уже доказано) справедливо равенство

$$\int_{\Sigma_{1r}} \frac{\cos \varphi_{PM}}{r_{PM}^2} ds_P + \int_{\Sigma_{2r}} \frac{\cos \varphi_{PM}}{r_{PM}^2} ds_P = 0.$$

При $r \rightarrow 0$ первый интеграл становится равным $w_0(M)$, а второй, равный телесному углу, под которым из точки M видна поверхность Σ_{2r} , стремится (в силу существования касательной плоскости к поверхности S в точке M) к 2π (оценки приведены в [82] гл. XV, §2), т. е. $w_0(M) = -2\pi$.

$$5.62. v(M) = \begin{cases} -4\pi(\nu_1 + \nu_2), & M \in \Omega_1, \\ -2\pi(\nu_1 + 2\nu_2), & M \in S_1, \\ -4\pi\nu_2, & M \in \Omega_2 / \overline{\Omega}_1, \\ -2\pi\nu_1, & M \in S_2, \\ 0, & M \in R^3 / \overline{\Omega}_2. \end{cases}$$

$$5.63. v(M) = \begin{cases} -4\pi\nu_0, & M \in \Omega \cup S, \quad \Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2, \\ -2\pi\nu_0, & M \in \Sigma_1 \cup \Sigma_2, \quad S_i = \Sigma_i \cup S, \quad i = 1, 2, \\ 0, & M \in R^3 / \overline{\Omega}. \end{cases}$$

$$\nu(P) = 0, \quad P \in S.$$

$$5.64. w(M) = -\pi \cdot \begin{cases} 0, & M \in \overline{\Omega}, \\ \frac{1}{2}, & M — одна из вершин, \\ 1, & M — на стороне без вершин, \\ 2, & M — на грани без периметра, \\ 4, & M \in \Omega. \end{cases}$$

5.65. Функция $w(M)$ — решение краевой задачи

$$\Delta u = 4\pi\nu(\theta, \varphi)\delta'(r - r_0),$$

$$|u| < \infty, \quad w \xrightarrow{r \rightarrow \infty} 0.$$

Ответ имеет ту же форму, что и в примере 5.3. Р е ш е н и е (фрагменты). Постановка задачи основана на выше указанных свойствах потенциала двойного слоя (см. также задачу 10.294) и равносильна задаче (см. 10.40)

$$\begin{aligned} \Delta v &= 0, & \Delta v &= 0, \\ 0 < r < r_0, & & r_0 < r, \\ |v| < \infty, & & v \xrightarrow{r \rightarrow \infty} 0, \\ v|_{r_0=0} - v|_{r_0=0}, & & \frac{\partial v}{\partial r}|_{r_0=0} - \frac{\partial v}{\partial r}|_{r_0=0} &= 4\pi\sigma_0 \cos \theta. \end{aligned}$$

Решения уравнений (см. пример 2.26), удовлетворяющие условиям в нуле и на бесконечности, имеют форму рядов

$$v(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \left(\frac{r}{r_0} \right)^n P_n(\cos \theta), \quad r < r_0,$$

$$v(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \left(\frac{r_0}{r} \right)^{n+1} P_n(\cos \theta), \quad r_0 < r.$$

При $r = r_0$ для определения коэффициентов A_n и B_n получается бесконечное множество систем линейных уравнений

$$\begin{cases} A_n - B_n = 0, \\ nA_n + (n+1)B_n = 4\pi\sigma_0 r_0 \delta_{n1}. \end{cases}$$

При $n \neq 1$ определитель каждой системы отличен от нуля, поэтому единственным решением будет $A_n = B_n = 0$. Если $n = 1$, то $A_1 = B_1 = \frac{4\pi\sigma_0 r_0}{3}$.

Аддитивная константа должна быть равна нулю. При подстановке найденных коэффициентов в выражения для $v(r, \theta)$ при $r < r_0$ и $r > r_0$ получается решение задачи.

$$\begin{aligned} 5.66. \quad 1) \quad w(r) &= -2\pi\nu_0 \cdot \begin{cases} 2, & r < r_0, \\ 1, & r = r_0, \\ 0, & r_0 < r; \end{cases} \\ 2) \quad w(r, \theta) &= \frac{2\pi\nu_0 \cos \theta}{3} \cdot \begin{cases} -\frac{4r}{r_0}, & r < r_0, \\ -\frac{1}{3}, & r = r_0, \\ \frac{2r_0^2}{r^2}, & r_0 < r; \end{cases} \\ 3) \quad w(r, \theta, \varphi) &= \frac{2\pi\nu_0 \sin 2\theta \cos \varphi}{5} \cdot \begin{cases} -\frac{6r^2}{r_0^2}, & r < r_0, \\ -1, & r = r_0, \\ \frac{4r_0^3}{r^3}, & r_0 < r; \end{cases} \\ 4) \quad w(r, \theta) &= 2\pi\nu_0 \cdot \begin{cases} -\sum_{n=0}^{\infty} C_n(n+1) \left(\frac{r}{r_0} \right)^n P_n(\cos \theta), & r < r_0, \\ -\frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} C_n P_n(\cos \theta), & r = r_0, \\ \sum_{n=1}^{\infty} C_n n P_n(\cos \theta), & r > r_0, \end{cases} \end{aligned}$$

$$\text{где } C_0 = 1 - \cos \theta_0, \quad C_n = \frac{P_{n-1}(\cos \theta_0) - P_{n+1}(\cos \theta_0)}{2n+1}.$$

$$5.67. \quad w(r, \theta) = 2\pi\nu_0 \cdot \begin{cases} -\sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2n+1} \frac{P'_{2n+1}(0) P_{2n+1}(\cos \theta)}{2n+1} + \text{sign}(\cos \theta), \\ 0, \\ \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{2n+2} \frac{P'_{2n+1}(0) P_{2n+1}(\cos \theta)}{n+1}, \end{cases}$$

где 1-я строка соответствует случаю $r < r_0$, 2-я — $r = r_0$, 3-я — $r > r_0$.

$$5.68. w(z) = -2\pi\nu_0 \left(\frac{h-z}{\sqrt{(h-z)^2 + r_0^2}} + \frac{z}{\sqrt{z^2 + r_0^2}} \right), \quad F\left(\frac{h}{2}\right) = 0.$$

У к а з а н и е. Потенциал двойного слоя можно получить не только интегрированием, но и геометрически (см. задачу 5.61). Точка $z \in [0; h]$ — вершина двух конусов, высоты которых z и $h-z$, углы в осевых сечениях (при вершине z) $2\alpha_1$ и $2\alpha_2$ соответственно. Если $\omega(S)$ — искомый угол, то

$$\omega(S) - 2\pi(1 - \cos \alpha_1) - 2\pi(1 - \cos \alpha_2) = -4\pi.$$

$$5.69. w(z) = -2\pi\nu_0 \left(\frac{z - r_0 \cos \alpha}{\sqrt{z^2 + r_0^2 - 2zr_0 \cos \alpha}} - \frac{z_0 - r_0}{|z_0 - r_0|} \right), \quad z \neq r_0,$$

$$w(z) = -2\pi\nu_0 \sin \frac{\alpha}{2}, \quad z = r_0, \quad \mathbf{E}(0) = -2 \frac{\pi\nu_0}{r_0} \sin^2 \alpha \mathbf{e}_z.$$

$$5.70. w(z) = -2\pi\nu_0 \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + r_1^2}} + \frac{h-z}{\sqrt{(h-z)^2 + r_2^2}} \right);$$

1) $z_1 = 0$, $z_2 = \frac{8}{3}h$; 2) $z_1 = \frac{7}{4}h$, $z_2 = \frac{1}{2}h$. При любых значениях $r_1 \neq r_2$, h существуют две различные точки на оси Oz , в которых напряженность поля равна нулю. См. также указание к задаче 5.67.

$$5.71. 1) 2\pi \operatorname{sign} z; 2) 2 \operatorname{arctg} \frac{-y}{|z|} \operatorname{sign} z; 3) 2 \operatorname{arctg} \frac{z^2 + y^2 - yh}{h|z|} \operatorname{sign} z;$$

$$4) \left(\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{x}{|z|} + \operatorname{arctg} \frac{y}{|z|} + \operatorname{arctg} \frac{xy}{|z|\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \operatorname{sign} z;$$

$$5) \left(\operatorname{arctg} \frac{b-y}{|z|} + \operatorname{arctg} \frac{(h-y)x}{|z|\sqrt{x^2 + (h-y)^2 + z^2}} + \operatorname{arctg} \frac{y}{|z|} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{xy}{|z|\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \operatorname{sign} z;$$

$$6) \left\{ \operatorname{arctg} \frac{[z^2 + (kx-y)x]\sqrt{k^2 z^2 + (kx-y)^2}}{|z|\sqrt{[kz^2 + (y-kx)x]^2 + y^2[(k^2+1)z^2 + (kx-y)^2]}} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{kx-y}{|z|\sqrt{k^2+1}} + \operatorname{arctg} \frac{y}{|z|} + \operatorname{arctg} \frac{xy}{|z|\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right\} \operatorname{sign} z;$$

$$7) \left[\operatorname{arctg} \frac{(a+x)(b-y)}{|z|\sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + z^2}} + \operatorname{arctg} \frac{(a-x)(b-y)}{|z|\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + z^2}} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{(a-x)(b+y)}{|z|\sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2 + z^2}} + \operatorname{arctg} \frac{(a+x)(b+y)}{|z|\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + z^2}} \right] \operatorname{sign} z;$$

$$8) \left[\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{z^2 + (b - y - kx)^2} (kz^2 + (b - y - kx)(a - x))}{|z| \sqrt{[kz^2 + (b - y - kx)(a - x)]^2 + y^2 [(k^2 + 1)z^2 + (b - y - kx)^2]}} - \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{z^2 + (b - y - kx)^2} (kz^2 - (b - y - kx)x)}{|z| \sqrt{[kz^2 - (b - y - kx)x]^2 + (b - y)^2 [(k^2 + 1)z^2 + (b - y - kx)^2]}} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{y(a - x)}{|z| \sqrt{(a - x)^2 + y^2 + z^2}} + \operatorname{arctg} \frac{xy}{|z| \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right] \operatorname{sign} z.$$

$$5.72. w(x, y, z) = \frac{\nu_0 z}{y^2 + z^2} \left(\frac{l + x}{\sqrt{(l + x)^2 + r^2}} + \frac{l - x}{\sqrt{(l - x)^2 + r^2}} \right), \quad r = \sqrt{y^2 + z^2}.$$

$$5.73. w(r, \theta) = \frac{2\pi\nu_0}{r_0} \cdot \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2n+1} P'_{2n+1}(0) P_{2n+1}(\cos \theta), & r < r_0, \\ 0, & r = r_0, \\ \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{2n+2} P'_{2n+1}(0) P_{2n+1}(\cos \theta), & r_0 < r. \end{cases}$$

$$\text{Другая форма решения: } w(r, \varphi, z) = \frac{4p_0 r_0 z}{(z^2 + (r - r_0)^2) \sqrt{z^2 + (r + r_0)^2}} E(k), \quad k^2 = \frac{4rr_0}{z^2 + (r + r_0)^2}.$$

Решение (фрагмент). Для выражения решения через эллиптический интеграл понадобится соотношение

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{(1 - k^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{1 - k^2} E(k), \quad (5.53)$$

которое получается в ходе преобразований

$$\frac{d}{d\varphi} \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} = \frac{\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} + \frac{k^2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi}{(1 - k^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} = \frac{k^2 \cos^2 \varphi - k^2 \sin^2 \varphi - 1 + 1}{k^2 \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} + \\ + \frac{k^2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi}{(1 - k^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}{k^2} + \frac{k^2 \cos^2 \varphi - 1}{k^2 \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} + \frac{k^2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi}{(1 - k^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} = \\ = \frac{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}{k^2} + \frac{(k^2 \cos^2 \varphi - 1)(1 - k^2 \sin^2 \varphi)}{k^2 (1 - k^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} = \\ = \frac{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}{k^2} + \frac{k^2 \cos^2 \varphi - 1 + k^2 \sin^2 \varphi}{k^2 (1 - k^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}{k^2} + \frac{k^2 - 1}{k^2 (1 - k^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}}.$$

Отсюда

$$\frac{d}{d\varphi} \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} = \frac{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}{k^2} + \frac{k^2 - 1}{k^2 (1 - k^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi}{k^2} + \frac{k^2 - 1}{k^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{(1 - k^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}},$$

что и требовалось.

$$5.74. w(r, \varphi, z) = \frac{2p_0}{\sqrt{z^2 + (r+r_0)^2}} \left[\frac{z^2 + r^2 - r_0^2}{z^2 + (r+r_0)^2} E(k) - K(k) \right], \quad k^2 = \frac{4rr_0}{z^2 + (r+r_0)^2}.$$

У к а з а н и е. См. решение предыдущей задачи.

$$5.75. 1) w(z) = -\frac{2\pi p_0}{hr_0} \sqrt{r_0^2 + \frac{h^2}{4\pi^2}} \left(\frac{z}{\sqrt{r_0^2 + z^2}} + \frac{h-z}{\sqrt{r_0^2 + (h-z)^2}} \right);$$

$$2) w(z) = -\frac{2\pi p_0 r_0}{h} \left(\frac{1}{\sqrt{r_0^2 + z^2}} + \frac{1}{\sqrt{r_0^2 + (h-z)^2}} \right).$$

5.76. Электростатический потенциал $u(M) = 2 \int_{\Omega} \rho(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} d\mathbf{r} + C$. Логарифмический потенциал определяется приведенным выражением, в котором $C = 0$, а множитель перед интегралом равен 1.

У к а з а н и е. См. решение задачи 5.50 3).

5.77. У к а з а н и е. Применить тождество, приведенное в решении задачи 5.10, согласно которому

$$\ln \frac{1}{r_{MP}} = \ln \left(\frac{1}{r_{MP}} + \frac{r_{OM} - r_{MP}}{r_{OM} r_{MP}} \right) = \ln \frac{1}{r_{OM}} + \ln \left(1 + \frac{r_{OM} - r_{MP}}{r_{MP}} \right),$$

а также два неравенства: $|\ln(1+\alpha)| \leq A|\alpha|$, где $|\alpha| \leq \frac{1}{2}$, $A \geq \frac{1}{2}$, и $\frac{1}{r_{MP}} \leq \frac{2d}{r_{OM}}$, установленное в решении задачи 5.10.

5.78. У к а з а н и е. Продифференцировать интеграл по параметру.

5.79. Р е ш е н и е (фрагменты). На основании выше приведенных свойств можно поставить краевую задачу для потенциала $u(r, \varphi)$

$$\begin{aligned} \Delta u &= -\frac{2\pi\rho_0}{r} \cos 3\varphi, \quad 0 < r < r_0, & \Delta u &= 0, \quad r_0 < r, \\ |u| &< \infty, & u &= O(\ln r), \quad r \rightarrow \infty, \\ u|_{r_0-0} &= u|_{r_0+0}, \quad \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r_0-0} &= \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r_0+0}. \end{aligned}$$

Решение этой задачи можно построить методом разделения переменных. При $r < r_0$ уравнение Пуассона имеет частное решение $u_0(r, \varphi) = f(r) \cos 3\varphi$, где $f(r)$ удовлетворяет уравнению Эйлера

$$f'' + \frac{1}{r}f' - \frac{9}{r^2}f = -\frac{2\pi}{r_0}.$$

Общее решение этого уравнения

$$C_1 r^{k_1} + C_2 r^{k_2} + f_0(r),$$

где k_1 и k_2 — корни характеристического уравнения $k^2 - 9 = 0$, а $f_0(r)$ есть частное решение. Функция вида $f_0(r) = Mr^\gamma$ не может быть частным решением, так как при подстановке в уравнение оно превращается в равенство $M(\gamma^2 - 9) = -\frac{2\pi}{r_0}r$, которое не выполняется ни при каких M и γ .

В этом случае следует отыскивать частное решение в виде $f_0(r) = Vr^3 \ln r$, которое удовлетворяет уравнению при $M = -\frac{\pi}{3r_0}$. Итак, при $r < r_0$ решение

задачи $u(r, \varphi) = u_0(r, \varphi) + U(r, \varphi)$, где $\Delta U = 0$. Далее согласно методу Фурье (см. пример 2.12)

$$u(r, \varphi) = u_0(r, \varphi) + \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0} \right)^n (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi), \quad r < r_0,$$

$$u(r, \varphi) = C_0 \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^n (C_n \cos n\varphi + D_n \sin n\varphi), \quad r > r_0.$$

Все коэффициенты (кроме аддитивной постоянной, которую следует положить равной нулю) определяются из дополнительных условий; форма решения такая же, что и в примере 5.5.

5.80. У к а з а н и е. Применить разложение (5.16).

$$5.81. 1) u(r) = \pi \rho_0 \cdot \begin{cases} r_0^2 \ln \frac{1}{r_0} + \frac{r_0^2 - r^2}{2}, & r \leq r_0, \\ r_0^2 \ln \frac{1}{r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$2) u(r) = \frac{\pi \rho_0 r_0^2}{\alpha + 2} \cdot \begin{cases} \ln \frac{1}{r_0} + \frac{1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\alpha+2}}{\alpha + 2}, & r \leq r_0, \\ \ln \frac{1}{r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$3) u(r, \varphi) = \frac{2\pi \rho_0}{\alpha^2} \cdot \begin{cases} (\sin \alpha r_0 - \alpha r_0 \cos \alpha r_0) \ln \frac{1}{r_0} + \\ + \sin \alpha r_0 - \sin \alpha r + \text{si}(\alpha r_0) - \text{si}(\alpha r), & r \leq r_0, \\ (\sin \alpha r_0 - \alpha r_0 \cos \alpha r_0) \ln \frac{1}{r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$4) u(r, \varphi) = \frac{2\pi \rho_0}{\alpha^2} \cdot \begin{cases} (\alpha r_0 \sin \alpha r_0 + \cos \alpha r_0) \ln \frac{1}{r_0} - \ln \frac{1}{r} - \\ - \cos \alpha r_0 + \cos \alpha r - \text{ci}(\alpha r_0) + \text{ci}(\alpha r), & r \leq r_0, \\ (\alpha r_0 \sin \alpha r_0 + \cos \alpha r_0 - 1) \ln \frac{1}{r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$5) u(r, \varphi) = \frac{2\pi \rho_0}{\alpha^2} \cdot \begin{cases} \ln \frac{1}{r} - \cos \alpha r_0 \ln \frac{1}{r_0} - \text{ci}(\alpha r_0) + \text{ci}(\alpha r), & r \leq r_0, \\ (1 - \cos \alpha r_0) \ln \frac{1}{r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$6) u(r, \varphi) = \frac{2\pi \rho_0}{\alpha} \cdot \begin{cases} \sin \alpha r_0^2 \ln \frac{1}{r_0} + \frac{1}{2} (\text{si}(\alpha r_0^2) - \text{si}(\alpha r^2)), & r \leq r_0, \\ \sin \alpha r_0^2 \ln \frac{1}{r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$7) u(r, \varphi) = \frac{2\pi \rho_0}{\alpha^2} \cdot \begin{cases} (\alpha r_0 - 1) e^{\alpha r_0} \ln \frac{1}{r_0} + \ln \frac{1}{r} + e^{\alpha r_0} - e^{\alpha r} - \\ - \text{Ei}(\alpha r_0) + \text{Ei}(\alpha r), & r \leq r_0, \\ [(\alpha r_0 - 1) e^{\alpha r_0} + 1] \ln \frac{1}{r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$8) u(r, \varphi) = \frac{\pi \rho_0}{\alpha} \cdot \begin{cases} e^{\alpha r_0^2} \ln \frac{1}{r_0} - \ln \frac{1}{r} + \frac{1}{2} (\text{Ei}(\alpha r_0^2) + \text{Ei}(\alpha r^2)), & r \leq r_0, \\ (e^{\alpha r_0^2} - 1) \ln \frac{1}{r}, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

$$5.82. 1) u(r, \varphi) = \pi \rho_0 \cos \varphi \cdot \begin{cases} r \left(r_0 - \frac{2r}{3} \right), & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^3}{3r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$2) u(r, \varphi) = \frac{\pi \rho_0 r_0^2}{2} \sin 2\varphi \cdot \begin{cases} \frac{r^2}{r_0^2} \left(\frac{1}{2} - \frac{r^2}{3r_0^2} \right), & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^2}{6r^2}, & r \geq r_0. \end{cases}$$

$$5.83. 1) u(r) = \pi \rho_0 \cdot \begin{cases} r_2^2 - r_1^2 + 2(r_1^2 \ln r_1 - r_2^2 \ln r_2), & 0 \leq r \leq r_1, \\ r_2^2 - r^2 + 2(r_1^2 \ln r - r_2^2 \ln r_2), & r_1 \leq r \leq r_2, \\ 2(r_1^2 - r_2^2) \ln r, & r_2 \leq r; \end{cases}$$

$$2) u(r) = \pi \rho_0 \sin \varphi \cdot \begin{cases} (r_2 - r_1) \left(r + \frac{r^3}{2r_1 r_2} \right), & 0 \leq r \leq r_1 \\ \left(r r_2 - \frac{r^3}{2r_2} - \frac{r_1^3}{2r} \right), & r_1 \leq r \leq r_2, \\ \frac{r_2^3 - r_1^3}{2r}, & r_2 < r; \end{cases}$$

$$3) u(r) = \pi \rho_0 \cos \varphi \cdot \begin{cases} r^2 \ln \frac{r_2}{r_1}, & 0 \leq r \leq r_1 \\ \frac{r_2^4 - r_1^4}{4} + r^2 \ln \frac{r_2}{r_1}, & r_1 \leq r \leq r_2, \\ \frac{r^4 - r_1^4}{4r^2}, & r_2 < r. \end{cases}$$

$$5.84. u(x, y) = 4a^2 - \frac{1}{2} \sum_{i=1, j=1}^2 (-1)^{i+j} \left[a_i b_j \ln(a_i^2 + b_j^2) + a_i^2 \operatorname{arctg} \frac{b_j}{a_i} + b_i^2 \operatorname{arctg} \frac{a_j}{b_i} \right],$$

$a_1 = a - x$, $a_2 = -a - x$, $b_1 = b - x$, $b_2 = -b - x$.

$$5.85. F = \begin{cases} \frac{2q_1 q_2}{r_0} \left(\frac{r}{4r_0} - \frac{r^2 - r_0^2}{\pi r_0 r} \arcsin \frac{r}{2r_0} - \frac{1}{2\pi} \left(1 + \frac{r}{2r_0} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{r}{2r_0} \right)^2} \right), \\ \frac{2q_1 q_2}{r}, & r > 2r_0, \end{cases}$$

где r — расстояние между осями цилиндров, 1-я строка соответствует $r \leq 2r_0$.

5.86. Электростатический потенциал

$$u(M) = 2 \int_S \rho(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} ds + C.$$

Логарифмический потенциал определяется приведенным выражением, в котором $C = 0$, а множитель перед интегралом равен 1.

У к а з а н и е. См. решение задачи 5.50, 3.

5.87. См. указание к решению задачи 5.77.

5.88. У к а з а н и е. Продифференцировать интеграл по параметру.

$$5.89. 1) v(x, y) = \sigma_0 \left[\frac{a+x}{2} \ln((a+x)^2 + y^2) - \frac{a-x}{2} \ln((a-x)^2 + y^2) - x \ln(x^2 + y^2) - \right. \\ \left. - |y| \operatorname{arccg} \frac{(x^2 + y^2)^2 + a^2(x^2 - y^2)}{2a^2|xy|} \operatorname{sign} x \right];$$

$$\begin{aligned}
 2) v(x, y) &= \frac{\sigma_0}{a} \left[xa + \frac{x^2 - y^2 - a^2}{4} \ln \frac{(x-a)^2 + y^2}{(x+a)^2 + y^2} - x|y| \operatorname{arctg} \frac{x^2 + y^2 - a^2}{2a|y|} \right]; \\
 3) v(x, y) &= \frac{\sigma_0}{2a} \left[a^2 - \frac{x^2 - y^2 - a^2}{2} \ln((x^2 + y^2 + a^2)^2 - a^2 x^2) - (x^2 - y^2) \ln(x^2 + y^2) + \right. \\
 &\quad \left. + |y| \operatorname{arctg} \frac{(x^2 + y^2)^2 - a^2(x^2 - y^2)}{2a^2 x|y|} \right].
 \end{aligned}$$

$$\mathbf{5.90.} \quad v(r) = 2\pi r_0 \sigma_0 \cdot \begin{cases} \ln \frac{1}{r_0}, & r \leq r_0, \\ \ln \frac{1}{r}, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

Решение (фрагменты). 1) Вычисление интеграла при $r \neq r_0$

$$v(r) = \sigma_0 r_0 \int_0^{2\pi} d\varphi \ln \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \varphi}}$$

основано на разложении (5.16). Если $r = r_0$, то необходимо вычислить интеграл (интеграл Эйлера)

$$I = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin \theta d\theta.$$

Замена $\theta = 2t$ преобразует интеграл к виду

$$I = 2 \int_0^{\frac{\pi}{4}} \ln \sin 2t dt = 2 \left(\frac{\pi}{4} \ln 2 + \int_0^{\frac{\pi}{4}} \ln \sin t dt + \int_0^{\frac{\pi}{4}} \ln \cos t dt \right).$$

После подстановки $t = \frac{\pi}{2} - \tau$ в третьем интеграле он объединяется со вторым интегралом и для I формируется уравнение

$$I = 2 \left(\frac{\pi}{4} \ln 2 + I \right) \implies I = \frac{\pi}{2} \ln \frac{1}{2}.$$

З а м е ч а н и е. Потребность в вычислении интеграла определяется спецификой задачи (проверка свойств потенциала, в частности, его непрерывность при $r = r_0$). Если опираться на уже установленные свойства, то, разумеется, интеграл считать не нужно (кстати, его значение получается из непрерывности потенциала и равно $v(r_0)$). 2) Потенциал $v(r)$ — решение задачи

$$\begin{aligned}
 \Delta u &= 0, \quad 0 < r < r_0, & \Delta u &= 0, \quad r_0 < r, \\
 |u| &< \infty, & u &= O(\ln r), \quad r \rightarrow \infty, \\
 u|_{r_0-0} &= u|_{r_0+0}, & \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r_0-0} &= \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r_0+0} + 2\pi\sigma_0.
 \end{aligned}$$

В полученном решении аддитивную константу следует положить равной нулю.

$$\mathbf{5.91.} \quad 1) v(r, \varphi) = \pi\sigma_0 r_0 \cdot \begin{cases} \frac{r}{r_0} \cos \varphi, & r \leq r_0, \\ \frac{r_0}{r} \cos \varphi, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$2) v(r, \varphi) = \pi r_0 \sigma_0 \cdot \begin{cases} \ln \frac{1}{r_0} + \left(\frac{r}{2r_0} \right)^2 \cos 2\varphi, & r \leq r_0, \\ \ln \frac{1}{r} + \left(\frac{r_0}{2r} \right)^2 \cos 2\varphi, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$3) v(r, \varphi) = 2\sigma_0 r_0 \left[2 - \ln(r^2 - 2rr_0 \cos \varphi + r_0^2) - \right. \\ \left. - \cos \frac{\varphi}{2} \frac{r + r_0}{2\sqrt{rr_0}} \ln \frac{r + r_0 + 2\sqrt{rr_0} \cos \frac{\varphi}{2}}{r + r_0 - 2\sqrt{rr_0} \cos \frac{\varphi}{2}} - \sin \frac{\varphi}{2} \frac{|r - r_0|}{\sqrt{rr_0}} \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{rr_0} \sin \frac{\varphi}{2}}{|r - r_0|} \right];$$

$$4) v(r, \varphi) = 2\sigma_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} \left[\sin \frac{\varphi}{2} \frac{r + r_0}{2} \ln \frac{r + r_0 + 2\sqrt{rr_0} \cos \frac{\varphi}{2}}{r + r_0 - 2\sqrt{rr_0} \cos \frac{\varphi}{2}} + \right. \\ \left. + \cos \frac{\varphi}{2} |r - r_0| \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{rr_0} \sin \frac{\varphi}{2}}{|r - r_0|} \right];$$

$$5) v(r, \varphi) = r_0 \sigma_0 \cdot \begin{cases} 2\varphi_0 \ln \frac{1}{r_0} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \frac{\sin \varphi_0 \cos n\varphi}{n^2}, & r \leq r_0, \\ 2\varphi_0 \ln \frac{1}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \frac{\sin \varphi_0 \cos n\varphi}{n^2}, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

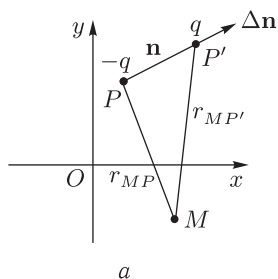
$$5.92. v(r, \varphi) = \sigma_0 r_0 \cdot \begin{cases} \pi \ln \frac{1}{r_0} + 2 \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2m+1} \frac{\sin(2m+1)\varphi}{(2m+1)^2}, & r \leq r_0, \\ \pi \ln \frac{1}{r} + 2 \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{2m+1} \frac{\sin(2m+1)\varphi}{(2m+1)^2}, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

5.93. $w(M) = 2p \frac{\partial}{\partial n} \ln \frac{1}{r_{MP}} + C = \frac{2p \cos \varphi_{PM}}{r_{MP}} + C$, где $\frac{\partial}{\partial n}$ означает дифференцирование функции $\frac{1}{r_{MP}}$ по координатам точки P в направлении вектора $\mathbf{n}$, $\varphi_{PM} \in [0; \pi]$ — угол между векторами $\mathbf{n}$ и $\mathbf{r}_{PM}$.

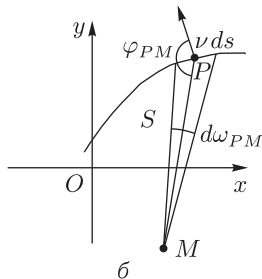
У к а з а н и е. На любой прямой S' , параллельной S , потенциал не зависит от точки на S' , т.е. электрическое поле является двумерным (поле точечного диполя в $\mathbb{R}^2$), и может быть получен предельным переходом при $\Delta n \rightarrow 0$ в выражении (рис. 5.21, а)

$$w(M) = -2q \ln \frac{1}{r_{MP}} + 2q \ln \frac{1}{r_{MP'}}$$

при условии постоянства произведения $q\Delta n = p$ (см. решение задачи 5.57); здесь $2q \ln \frac{1}{r_{MP}} + C$ — потенциал равномерно заряженной прямой, заряд единицы длины которой q (точечный заряд в $\mathbb{R}^2$ (см. решение задачи 5.51, п. 3)).



а



б

Рис. 5.21

5.94. У к а з а н и е. Электростатический потенциал является линейной суперпозицией потенциалов «точечных» диполей $\nu(P)\mathbf{n}_P ds$ (рис. 5.21, б), выражения для которых приведены в ответе к задаче 5.93. Логарифмический потенциал двойного слоя получается из электростатического заменой множителя 2 перед интегралом на 1 и приравниванием нулю аддитивной постоянной.

5.95. У к а з а н и е. Для оценки интеграла применить неравенство $r_{OM} \leq \leq 2dr_{MP}$ при $r_{OM} \geq 2d$, полученное в решении задачи 5.10.

5.96. У к а з а н и е. Продифференцировать по параметру интеграл, подынтегральная функция которого содержит нормальную производную (задача 5.94).

5.97. См. решение задачи 5.61.

$$5.98. \quad 1) w(M) = -\pi \cdot \begin{cases} 4, & M \in \Omega_1, \\ 2, & M \in \Omega_2/\overline{\Omega}_1, \\ 3, & M \in S_2/\{A\}, \\ 1, & M \in S_1/\{A\}, \\ 2, & M = A, \\ 0, & M \in \mathbb{R}^2/\overline{\Omega}_1; \end{cases} \quad 2) w(M) = -\pi \cdot \begin{cases} 2, & M \in \Omega_1, \\ 2, & M \in \Omega_2, \\ 1, & M \in S_1/\{A\}, \\ 1, & M \in S_2/\{A\}, \\ 2, & M = A, \\ 0, & M \notin \overline{\Omega}_1 \cap \overline{\Omega}_2. \end{cases}$$

$$5.99. \quad w(M) = -\pi \cdot \begin{cases} 2, & M \in \Omega, \\ 1, & M \text{ — одна из вершин,} \\ \frac{1}{2}, & M \text{ — на стороне грани без вершин,} \\ 0, & M \notin \overline{\Omega}. \end{cases}$$

5.100. Р е ш е н и е (фрагменты). Свойства потенциала формируют систему условий

$$\Delta w = 2\pi\nu_0\delta'(r - r_0) \cdot \sin^2 \varphi,$$

$$|w|_{r=0} < \infty, \quad w(r, \varphi) = O\left(\frac{1}{r}\right), \quad r \rightarrow \infty,$$

которые определяют функцию $w(r, \varphi)$. В эквивалентной форме (см. (10.40))

$$\Delta w = 0, \quad r < r_0, \quad \Delta w = 0, \quad r > r_0,$$

$$|w| < \infty, \quad w(r, \varphi) = O\left(\frac{1}{r}\right), \quad r \rightarrow \infty,$$

$$w|_{r_0+0} - w|_{r_0-0} = 2\pi\nu_0 \sin^2 \varphi, \quad \frac{\partial w}{\partial r}\Big|_{r_0+0} - \frac{\partial w}{\partial r}\Big|_{r_0-0} = 0;$$

эта краевая задача может быть решена методом Фурье (см. пример 2.12). Решение, ограниченное в нуле и имеющее заданную асимптотику при $r \rightarrow \infty$, представимо рядами

$$w(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^n \cos n\varphi, \quad r < r_0,$$

$$w(r, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r}\right)^n \cos n\varphi, \quad r > r_0,$$

все коэффициенты которых определяются условиями при $r = r_0$. Форма ответа такая же, как в примере 5.7.

$$5.101. \quad 1) w(r) = -\pi\nu_0 \cdot \begin{cases} 2, & r < r_0, \\ 1, & r = r_0, \\ 0, & r_0 < r; \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
2) \quad w(r, \varphi) &= \pi\nu_0 \sin \varphi \cdot \begin{cases} -\frac{r}{r_0}, & r < r_0, \\ 0, & r = r_0, \\ \frac{r_0}{r}, & r_0 < r; \end{cases} \\
3) \quad w(r, \varphi) &= \pi\nu_0 \cos m\varphi \cdot \begin{cases} -\frac{r^m}{r_0^m}, & r < r_0, \\ 0, & r = r_0, \\ \frac{r_0^m}{r^m}, & r_0 < r; \end{cases} \\
4) \quad w(r, \varphi) &= \nu_0 \left(-2 + \frac{r_0 - r}{2\sqrt{rr_0}} \cos \frac{\varphi}{2} \ln \frac{r + r_0 + 2\sqrt{rr_0} \cos \frac{\varphi}{2}}{r + r_0 - 2\sqrt{rr_0} \cos \frac{\varphi}{2}} + \right. \\
&\quad \left. + \frac{r_0 + r}{2\sqrt{rr_0}} \sin \frac{\varphi}{2} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{rr_0} \sin \frac{\varphi}{2}}{r - r_0} \right), \quad r \neq r_0, \quad w(r_0, \varphi) = -2\nu_0; \\
5) \quad w(r, \varphi) &= \nu_0 \left(\frac{r - r_0}{2\sqrt{rr_0}} \sin \frac{\varphi}{2} \ln \frac{r + r_0 + 2\sqrt{rr_0} \cos \frac{\varphi}{2}}{r + r_0 - 2\sqrt{rr_0} \cos \frac{\varphi}{2}} + \right. \\
&\quad \left. + \frac{r_0 + r}{2\sqrt{rr_0}} \cos \frac{\varphi}{2} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{rr_0} \sin \frac{\varphi}{2}}{r - r_0} \right), \quad r \neq r_0, \quad w(r_0, \varphi) = 0; \\
6) \quad w(r, \varphi) &= \nu_0 \cdot \begin{cases} -2\varphi - \operatorname{arctg} \frac{r \sin(\varphi + \varphi_0)}{r - r_0 \cos(\varphi + \varphi_0)} + \operatorname{arctg} \frac{r \sin(\varphi - \varphi_0)}{r - r_0 \cos(\varphi - \varphi_0)}, & r < r_0, \\ -\varphi_0, & r = r_0, \\ \operatorname{arctg} \frac{r \sin(\varphi + \varphi_0)}{r - r_0 \cos(\varphi + \varphi_0)} - \operatorname{arctg} \frac{r \sin(\varphi - \varphi_0)}{r - r_0 \cos(\varphi - \varphi_0)}, & r > r_0. \end{cases} \\
5.102. \quad w(r, \varphi) &= \nu_0 \cdot \begin{cases} -\pi - \operatorname{arctg} \frac{2rr_0 \sin \varphi}{r_0^2 - r^2}, & r < r_0, \\ -\frac{\pi}{2}, & r = r_0, \\ \operatorname{arctg} \frac{2rr_0 \sin \varphi}{r^2 - r_0^2}, & r > r_0. \end{cases}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
5.103. \quad 1) \quad w(x, y) &= \pi\nu_0 \operatorname{sign} y; \quad 2) \quad w(x, y) = 2\nu_0 \operatorname{arctg} \frac{x}{|y|}; \\
3) \quad w(x, y) &= \pi\nu_0 e^{-|\alpha y|} \sin \alpha x \operatorname{sign} y; \quad 4) \quad w(x, y) = \pi\nu_0 e^{-|\alpha y|} \cos \alpha x \operatorname{sign} y; \\
5) \quad w(x, y) &= \frac{\pi\nu_0 |\alpha|}{H_2} [(x^2 + y^2 - a^2)|y| + (x^2 - y^2 + a^2)|a|] \operatorname{sign} y; \\
6) \quad w(x, y) &= \frac{\nu_0 a^2}{H} \left[(x^2 - y^2 + a^2) \operatorname{arctg} \frac{x}{|y|} - 2x|y| \ln \frac{a^2}{x^2 + y^2} \right] \operatorname{sign} y; \\
7) \quad w(x, y) &= \frac{\pi\nu_0 a x}{H} [x^2 + (|y| - |a|)^2] \operatorname{sign} y; \\
8) \quad w(x, y) &= \frac{2\nu_0 a}{H} \left[x(x^2 + y^2 + a^2) \operatorname{arctg} \frac{x}{|y|} - |y|(x^2 + y^2 - a^2) \ln \frac{|a|}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right] \operatorname{sign} y; \\
9) \quad w(x, y) &= \frac{\pi\nu_0}{H} [(x^2 + y^2)^2 + a^2(x^2 - y^2) - |a y|(x^2 + y^2 - a^2)] \operatorname{sign} y; \\
10) \quad w(x, y) &= \frac{2\nu_0}{H} \left[((x^2 + y^2)^2 + a^2(x^2 - y^2)) \operatorname{arctg} \frac{x}{|y|} + a^2 x |y| \ln \frac{a^2}{x^2 + y^2} \right] \operatorname{sign} y; \\
H &= (x^2 + y^2 - a^2)^2 + 4a^2 x^2.
\end{aligned}$$

5.104. 1) $w(x, y) = \nu_0 \operatorname{arccg} \frac{-x}{|y|} \operatorname{sign} y;$

2) $w(x, y) = \frac{\nu_0 |a|}{H} \left[\frac{\pi}{2} (x^2 + y^2 - a^2) |y| + (x^2 - y^2 + a^2) |\alpha| \operatorname{arccg} \frac{-x}{|y|} - \right.$
 $\left. - x |a y| \ln \frac{a^2}{x^2 + y^2} \right] \operatorname{sign} y;$

3) $w(x, y) = \frac{\nu_0 a}{H} \left[-\frac{\pi}{2} |a y| + x(x^2 + y^2 + a^2) \operatorname{arccg} \frac{-x}{|y|} - \right.$
 $\left. - |y|(x^2 + y^2 - a^2) \ln \frac{|a|}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right] \operatorname{sign} y;$

4) $w(x, y) = \frac{\nu_0}{H} \left[((x^2 + y^2)^2 + a^2(x^2 - y^2)) \operatorname{arccg} \frac{-x}{|y|} - \frac{\pi}{2} |a y| (x^2 + y^2 - a^2) + \right.$
 $\left. + a^2 x |y| \ln \frac{a^2}{x^2 + y^2} \right] \operatorname{sign} y;$

$$H = (x^2 + y^2 - a^2)^2 + 4a^2 x^2.$$

5.105. 1) $w(x, y) = \nu_0 \operatorname{arccg} \frac{x^2 + y^2 - a^2}{2x|y|} \operatorname{sign} y;$

2) $w(x, y) = \nu_0 \operatorname{arccg} \frac{(x^2 + y^2)^2 + a^2(y^2 - x^2)}{2a^2 |x y|} \operatorname{sign} x y;$

3) $w(x, y) = \frac{\nu_0 a}{H} \left[x a |y| \ln \frac{(x+a)^2 + y^2}{(x-a)^2 + y^2} + (x^2 - y^2 + a^2) a \operatorname{arccg} \frac{x^2 + y^2 - a^2}{2a|y|} + \right.$
 $\left. + \frac{\pi}{2} (x^2 + y^2 - a^2) |y| \right] \operatorname{sign} y;$

4) $w(x, y) = \frac{\nu_0 a^2}{H} \left[x |y| \ln \frac{4(x^2 + y^2)^4}{(x^2 + y^2 + a^2)^2 - 4a^2 x^2} + \right.$
 $\left. + (x^2 - y^2 + a^2) \operatorname{arccg} \frac{(x^2 + y^2)^2 + a^2(y^2 - x^2)}{2a^2 |x y|} \operatorname{sign} x \right] \operatorname{sign} y;$

5) $w(x, y) = \frac{a \nu_0}{H} \left[\frac{1}{2} |y| (x^2 + y^2 - a^2) \ln \frac{(x+a)^2 + y^2}{(x-a)^2 + y^2} - \right.$
 $\left. - \pi x a |y| + x(x^2 + y^2 + a^2) \operatorname{arccg} \frac{x^2 + y^2 - a^2}{2a|y|} \right] \operatorname{sign} y;$

6) $w(x, y) = \frac{a \nu_0}{H} \left[|y| (x^2 + y^2 - a^2) \ln \frac{2(x^2 + y^2)}{\sqrt{(x^2 + y^2 + a^2)^2 - 4a^2 x^2}} + \right.$
 $\left. + |x| (x^2 + y^2 + a^2) \operatorname{arccg} \frac{(x^2 + y^2)^2 + a^2(y^2 - x^2)}{2a^2 |x y|} \right] \operatorname{sign} y;$

7) $w(x, y) = \frac{\nu_0}{H} \left[(x^2 + y^2)^2 + a^2(x^2 - y^2) \operatorname{arccg} \frac{x^2 + y^2 - a^2}{2a|y|} - \right.$
 $\left. - a^2 |x y| \ln \frac{(x+a)^2 + y^2}{(x-a)^2 + y^2} - \frac{1}{2} \pi a (x^2 + y^2 - a^2) |y| \right] \operatorname{sign} y;$

$$8) w(x, y) = \frac{\nu_0}{H} \left[(x^2 + y^2)^2 + a^2(x^2 - y^2) \operatorname{arccctg} \frac{(x^2 + y^2)^2 + a^2(y^2 - x^2)}{2a^2|xy|} \operatorname{sign} x - \right. \\ \left. - a^2x|y| \ln \frac{4(x^2 + y^2)^2}{(x^2 + y^2 + a^2)^2 - 4a^2x^2} \right] \operatorname{sign} y.$$

$$H = (x^2 + y^2 - a^2)^2 + 4a^2x^2.$$

$$5.106. u(r) = \frac{J}{4\pi\sigma r}, \mathbf{j}(r) = \frac{J}{4\pi r^2} \mathbf{e}_r, r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

$$5.107. u(r) = \frac{J}{2\pi\sigma} \ln \frac{1}{r}, \mathbf{j}(r) = \frac{J}{2\pi r} \mathbf{e}_r, r = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

5.108. Решение. Объемная плотность тока $j(P)$ равна количеству заряда, протекающего за единицу времени через единичную площадку сечения, перпендикулярного току. Если ток J равномерно распределен по сечению Δs , то $j(P) = J/\Delta s$; в общем случае $j(P) = \frac{dJ}{ds}$, так что $dJ = jds$. Если dl — элемент длины линии тока, то $dJ dl = jds dl = j d\mathbf{r}$, где $d\mathbf{r} = ds dl$ — элемент объема, или в векторной форме $dJ d\mathbf{l} = j d\mathbf{r}$.

Магнитное поле $d\mathbf{H}(M)$ в точке M элемента тока $dJ d\mathbf{l}$, расположенного в точке P , определяется законом Био-Савара

$$d\mathbf{H}(M) = \frac{dJ(P)}{cr_{PM}} [\mathbf{l}, \mathbf{r}_{PM}],$$

где P и M — точки, соответственно, начала и конца вектора $\mathbf{r}_{PM}$. Итак,

$$d\mathbf{H}(M) = \frac{[\mathbf{j}(P), \mathbf{r}_{PM}]}{cr_{PM}^3} d\mathbf{r} = -\frac{1}{c} \left[\mathbf{j}(P), \nabla_M \frac{1}{r_{PM}} \right] d\mathbf{r} = \frac{1}{c} \left[\nabla_M \frac{1}{r_{PM}}, \mathbf{j}(P) \right] d\mathbf{r},$$

где индекс M у оператора ∇ указывает точку, по координатам которой производится дифференцирование. В то же время

$$\operatorname{rot}_M \frac{\mathbf{j}(P)}{r_{PM}} = \left[\nabla_M \frac{1}{r_{PM}}, \mathbf{j}(P) \right].$$

Стало быть,

$$d\mathbf{H}(M) = \operatorname{rot}_M \frac{\mathbf{j}(P)}{cr_{PM}} = \operatorname{rot} \mathbf{A}(M),$$

где

$$\mathbf{A}(M) = \frac{\mathbf{j}(P) d\mathbf{r}}{cr_{PM}}$$

есть векторный потенциал магнитного поля элемента тока $\frac{1}{c} j d\mathbf{r}$. Поскольку векторный потенциал суммы токов равен сумме векторных потенциалов, то (при равенстве нулю аддитивной постоянной)

$$\mathbf{A}(M) = \frac{1}{c} \int_{\Omega} \frac{\mathbf{j}(P) d\mathbf{r}}{r_{MP}}.$$

В примере 1.24 было отмечено, что векторный потенциал магнитного поля, определенный соотношением $\mathbf{H} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$ (при $\mu = 1$), неоднозначен из-за того, что $\operatorname{rot} \mathbf{A} = \operatorname{rot}(\mathbf{A} + \nabla f)$, в связи с чем вводится дополнительное условие $\operatorname{div} \mathbf{A} = 0$. В данном случае дивергенция векторного потенциала магнитного поля токов равна нулю. Действительно,

$$\operatorname{div}_M \frac{\mathbf{j}(P)}{r_{MP}} = \mathbf{j}(P) \nabla_M \frac{1}{r_{MP}} = -\mathbf{j}(P) \nabla_P \frac{1}{r_{MP}} = -\operatorname{div}_P \frac{\mathbf{j}(P)}{r_{MP}} + \frac{1}{r_{MP}} \operatorname{div}_P \mathbf{j}(P).$$

Так как постоянный ток не имеет истоков, то $\operatorname{div}_P \mathbf{j}(P) = 0$. Следовательно,

$$\operatorname{div} \mathbf{A}(M) = -\frac{1}{c} \int_{\Omega} \operatorname{div}_P \frac{\mathbf{j} ds}{r_{MP}} d\mathbf{r} = -\frac{1}{c} \int_{\partial\Omega} \frac{j_n ds}{r_{MP}} = 0,$$

ибо нормальная составляющая тока на поверхности $\partial\Omega$ равна нулю. См. ответ к задаче 2.902.

5.109. $\mathbf{A}(r, \theta, \varphi) = A(r, \theta) \mathbf{e}_\varphi$;

$$1) A(r, \theta) = \frac{4\pi\omega\rho_0 \sin \theta}{3c} \cdot \begin{cases} \frac{1}{2} r \left(r_0^2 - \frac{3}{5} r^2 \right), & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^5}{5r^2}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$2) A(r, \theta) = \frac{4\pi\omega\rho_0 \sin \theta}{3cr_0} \cdot \begin{cases} r \left(r_0^3 - \frac{1}{2} r^3 \right), & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^3}{2r^2}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$3) A(r, \theta) = \frac{4\pi\omega\rho_0 \sin \theta \cos \theta}{5c} \cdot \begin{cases} r^2 \left(r_0 - \frac{5}{6} r \right), & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^6}{6r^3}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$4) A(r, \theta) = \frac{4\pi\omega\rho_0 \sin \theta \cos \theta}{5cr_0} \cdot \begin{cases} \frac{1}{2} r^2 \left(r_0^2 - \frac{5}{7} r^2 \right), & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^7}{7r^3}, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

5.110. Р е ш е н и е (фрагменты). Поверхностной плотностью тока называется количество заряда, протекающего в единицу времени через единицу длины отрезка, расположенного на поверхности, по которой течет ток, и перпендикулярного направлению тока. Пусть S — двусторонняя гладкая поверхность, S_δ — поверхность, полученная смещением каждой точки $P \in S$ на величину δ в направлении нормали $\mathbf{n}_P$. В образовавшемся слое течет ток, объемная плотность которого $\mathbf{j}$. Если в выражении $dJdl = \mathbf{j} d\mathbf{r}$, где $d\mathbf{r} = \delta d\mathbf{a} dl$ — объем прямоугольного параллелепипеда со стороной da , параллельной току, устремить δ к нулю, сохраняя постоянным произведение $\mathbf{j}\delta = \mathbf{i}$, то получится соотношение $dJdl = \mathbf{i} da dl$, где $\mathbf{i}$ — поверхностная плотность тока, а $da dl = \Sigma$ — элемент поверхности S , или в привычных обозначениях ($\Sigma \rightarrow s$) $dJdl = \mathbf{i} ds$. Далее следует повторить вывод, проделанный в решении задачи 5.108.

5.111. $\mathbf{A}(r, \theta, \varphi) = A(r, \theta) \mathbf{e}_\varphi$;

$$A(r, \theta) = \frac{\pi\omega\sigma_0 r_0^2}{c} \cdot \begin{cases} -\frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2n+1} \frac{P_{2n+1}^1(0) P_{2n+1}^1(\cos \theta)}{(n+1)(4n^2-1)} - \\ \quad - 2 \frac{r^2}{r_0^2} \sin \theta |\cos \theta|, & r \leq r_0, \\ \frac{1}{4} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{2n+2} \frac{P_{2n+1}^1(0) P_{2n+1}^1(\cos \theta)}{(n+1)(n+2)(2n+1)}, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

См. решение задачи 5.49.

5.112. $\mathbf{A}(r, \theta, \varphi) = A(r, \theta) \mathbf{e}_\varphi$, где $A(r, \theta)$:

$$1) \frac{4\pi\omega\sigma_0 r_0^3}{3c} \sin \theta \cdot \begin{cases} \frac{r^2}{r_0^3}, & r \leq r_0, \\ \frac{r_0}{r^2}, & r_0 \leq r; \end{cases} \quad 2) \frac{4\pi\omega\sigma_0 r_0^3}{5c} \sin \theta \cos \theta \cdot \begin{cases} \frac{r^2}{r_0^3}, & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^2}{r^3}, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

5.113. $\mathbf{H} = \frac{2J}{cr} \mathbf{e}_z$. У к а з а н и е. См. (1.113), (10.16).

5.114. У к а з а н и е. Векторный потенциал в точке M равен сумме векторных потенциалов прямых токов $j ds$.

$$\mathbf{A}(r) = A(r) \mathbf{e}_z, \quad A(r) = \frac{2J}{c} \cdot \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right), & r \leq r_0, \\ \ln \frac{r_0}{r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$\mathbf{H}(r) = H(r) \mathbf{e}_\varphi, \quad H(r) = \frac{2J}{c} \cdot \begin{cases} \frac{r}{r_0^2} & r \leq r_0, \\ \frac{1}{r}, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

$$\mathbf{A}(r, \varphi) = A(r, \varphi) \mathbf{e}_z; \quad 1) A(r, \varphi) = \frac{4\pi\alpha_0 r_0^3}{9c} \cdot \begin{cases} 1 - \frac{r^3}{r_0^3} & r \leq r_0, \\ 3 \ln \frac{r_0}{r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$2) A(r, \varphi) = \frac{\pi\alpha_0}{c} \sin \varphi \cdot \begin{cases} r \left(r_0 - \frac{2}{3} r \right) & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^2}{3r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$3) A(r, \varphi) = \frac{\pi\alpha_0}{2c} \cos \varphi \cdot \begin{cases} r^2 \left(r_0 - \frac{4}{5} r \right) & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^5}{5r^2}, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

5.117. У к а з а н и е. Вектор $\mathbf{A}$ удовлетворяет уравнению Пуассона (пример 1.24), решением которого является логарифмический потенциал площади (свойство вторых производных потенциала) при условии $\mathbf{j}(P) \in C^1(\bar{S})$.

$$\mathbf{A}(r, \varphi) = A(r) \mathbf{e}_\varphi; \quad 1) A(r) = \frac{\pi\omega\rho_0}{c} \cdot \begin{cases} r \left(r_0^2 - \frac{1}{2} r^2 \right), & r \leq r_0, \\ \frac{r_0^4}{2r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$2) A(r) = \frac{2\pi\omega\rho_0}{3cr_0} \cdot \begin{cases} r \left(r_0^3 - \frac{2}{5} r^3 \right) & r \leq r_0, \\ \frac{3r_0^5}{5r}, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

5.119. У к а з а н и е. Преобразовать потенциал для тонкого слоя, устремив толщину слоя к нулю.

$$\mathbf{A}(r, \varphi) = A(r) \mathbf{e}_\varphi; \quad A(r) = \frac{2\pi\omega\sigma_0 r_0^2}{c} \cdot \begin{cases} \frac{r}{r_0}, & r \leq r_0, \\ \frac{r_0}{r}, & r_0 \leq r; \end{cases}$$

$$\mathbf{H}(r) = H(r) \mathbf{e}_z; \quad H(r) = \begin{cases} \frac{4\pi i}{c}, & r \leq r_0, \\ 0, & r_0 \leq r. \end{cases}$$

5.121. У к а з а н и е. Применить соотношение $\mathbf{j} d\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{J} d\mathbf{l}$.

5.122. 1) В сферических координатах $\mathbf{A}(r, \theta, \varphi) = A(r, \theta)\mathbf{e}_\varphi$, где:

1) функция $A(r, \theta)$ дана в ответе к задаче 2.902, т. 1;

$$2) A(r, \theta) = \frac{4J}{kc} \sqrt{\frac{r_0}{r \sin \theta}} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right], \quad k^2 = \frac{4rr_0 \sin \theta}{r^2 + r_0^2 + 2rr_0 \sin \theta}.$$

5.123. Р е ш е н и е (см. [60]). Абсолютная величина поля в точке P двух элементарных цилиндрических слоев ΔS_1 и ΔS_2 , ограниченных плоскостями Π_1 , Π_2 и подобными эллиптическими цилиндрами Σ_1 , Σ_2 (рис. 5.22),

$$\begin{aligned} |\Delta E(P)| &= \left| 2\rho_0 \left(\int_{\Delta S_1} \frac{ds}{r} - \int_{\Delta S_2} \frac{ds}{r} \right) \right| = \\ &= \left| 2\rho_0 \left(\int_{\Delta S_1} \frac{r dr d\varphi}{r} - \int_{\Delta S_2} \frac{r dr d\varphi}{r} \right) \right| = |2\rho_0 \Delta\varphi (\overline{M_1 N_1} - \overline{M_2 N_2})|. \end{aligned}$$

Уравнения поверхностей Σ_1 , Σ_2 , Π_1 имеют вид

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + D_1 = 0, \quad Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + D_2 = 0, \quad y = d.$$

При подстановке $y = d$ в первые два уравнения получаются квадратные уравнения, корни которых — абсциссы точек M_1 , M_2 и N_1 , N_2 . По теореме Виета $x(M_1) + x(M_2) = x(N_1) + x(N_2) = -\frac{2dB}{A}$, откуда $\overline{M_1 N_1} = \overline{M_2 N_2}$, т. е. $\Delta E(P) = 0$.

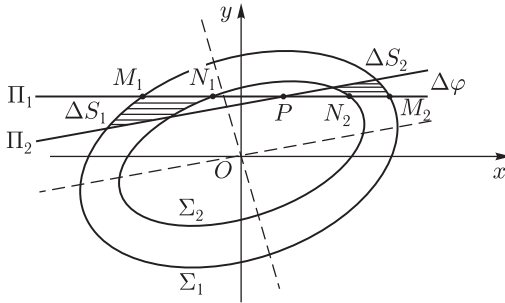


Рис. 5.22

5.124.

$$\sigma(x, y) = \frac{q}{\pi ab \sqrt{\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4}}}. \quad (5.54)$$

Р е ш е н и е. Так как поле внутри равномерно заряженного слоя (см. предыдущую задачу) равно нулю (как и поле внутри проводника), то плотность заряда на проводящем цилиндре можно получить, устремляя толщину слоя к нулю при постоянном q . Расстояние p от центра O эллипса до касательной к эллипсу в точке P и расстояние от O до P (рис. 5.23) связаны соотношением

$$p = \mathbf{r} \mathbf{n} = \left(x \cdot \frac{x}{a^2} + y \cdot \frac{y}{b^2} \right) \frac{1}{\sqrt{\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4}}},$$

а толщина слоя, ограниченного соосными эллиптическими цилиндрами с полуосями a, b и $a_1 = ka, b_1 = kb$, равна $\Delta p = |p - p_1| = p|1 - k^2|$. Следовательно,

$$\sigma = \lim_{k \rightarrow 1} \rho_0 \Delta p = \lim_{k \rightarrow 1} \frac{qp}{\pi ab |1 - k^2|} = \frac{qp}{\pi ab}.$$

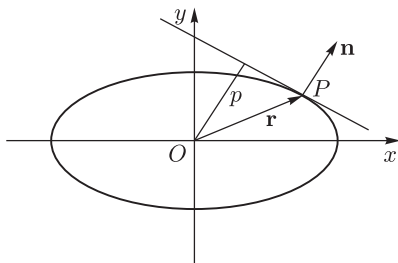


Рис. 5.23

5.125. $\sigma(x) = \frac{q}{2\pi\sqrt{a^2 - x^2}}.$

5.126. Решение. При условии $|\Delta \mathbf{r}| = \Delta r \ll r$

$$\begin{aligned} f(\mathbf{r} - \Delta \mathbf{r}) &= f(\mathbf{r}) + df(\mathbf{r}) + \frac{1}{2} d^2 f(\mathbf{r}) + o(\Delta r^2) = \\ &= f(\mathbf{r}) + \Delta \mathbf{r} \nabla f(\mathbf{r}) + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial^2 f(\mathbf{r})}{\partial x_i \partial x_j} \Delta x_i \Delta x_j + o(\Delta r^2), \quad \Delta r \rightarrow 0. \end{aligned}$$

Так как $r_k \leq d \ll r$, то

$$u(\mathbf{r}) = \sum_1^n \frac{q_k}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_k|} = \sum_1^n \left(\frac{1}{r} - \mathbf{r}_k \nabla \frac{1}{r} + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^3 x_{ki} x_{kj} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \frac{1}{r} \right) + o\left(\frac{1}{r^3}\right), \quad r \rightarrow \infty.$$

Первые два слагаемые (далее пределы суммирования опущены)

$$\frac{1}{r} \sum q_k = Q = 0, \quad -\sum \left(q_k \mathbf{r}_k, \nabla \frac{1}{r} \right) = -\left(\sum q_k \mathbf{r}_k, \nabla \frac{1}{r} \right) = -\mathbf{p} \nabla \frac{1}{r} = 0,$$

а третье слагаемое

$$u_3(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \sum_k q_k \sum_{i,j} x_{ki} x_{kj} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \frac{1}{r}.$$

Если учесть, что $\Delta \frac{1}{r} = 0$, или $\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \frac{1}{r} = -\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \frac{1}{r} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \frac{1}{r} \right)$, то

$$\begin{aligned} \sum_{i,j} x_{ki} x_{kj} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \frac{1}{r} &= \sum_i x_{ki}^2 \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \frac{1}{r} + \sum_{i \neq j} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \frac{1}{r} = \\ &= x_{k1}^2 \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \frac{1}{r} + x_{k2}^2 \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \frac{1}{r} - x_{k3}^2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \frac{1}{r} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \frac{1}{r} \right) + \sum_{i \neq j} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \frac{1}{r} = \\ &= \sum_{i=1}^3 x_{ki}^2 \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \frac{1}{r} - x_{k3}^2 \Delta \frac{1}{r} + \sum_{i \neq j} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \frac{1}{r}. \end{aligned}$$

Второе слагаемое в последней сумме можно представить также в виде $-x_{k1}^2 \Delta \frac{1}{r}$

или $-x_{k2}^2 \Delta \frac{1}{r}$ или, наконец, в симметричной (относительно x_i) форме $-\frac{1}{3} r_k^2 \Delta \frac{1}{r}$.

Таким образом,

$$u_3(\mathbf{r}) = \frac{1}{6} \sum_k q_k \sum_{i,j} (3x_{ki}x_{kj} - r_K^2 \delta_{ij}) \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \frac{1}{r} = \\ = \frac{1}{6} \sum_{i,j} D_{ij} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \frac{1}{r} = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^3 \frac{D_{ij} x_i x_j}{r^5}.$$

З а м е ч а н и е. Структура $u_3(\mathbf{r})$ не зависит от Q и $\mathbf{p}$.

5.127. У к а з а н и е. См. решение предыдущей задачи.

5.129. $u = C - 2q\alpha$.

5.130. $\sigma(\beta) = \frac{E_0(a+b) \cos(\beta - \varphi)}{4\pi\sqrt{a^2 \sin^2 \beta + b^2 \cos^2 \beta}}, \quad u = E_0(a+b) \operatorname{sh}(\alpha_s - \alpha) \cos(\beta - \varphi) + C, \quad \operatorname{ch} \alpha_s = \frac{a}{c}.$

5.131. $\mathbf{E} = E_0(a+b) \left(\frac{\cos \varphi}{a+b\varepsilon} \mathbf{e}_x + \frac{\sin \varphi}{a\varepsilon+b} \mathbf{e}_y \right)$ — однородное поле.

5.132. $u(\alpha, \beta) = \begin{cases} \pi\rho_0 \left[b^2 \operatorname{ch}^2 \alpha - a^2 \operatorname{sh}^2 \alpha + \frac{c^2}{2} (e^{-2\alpha_s} \operatorname{ch} 2\alpha - 1) \cos 2\beta \right] + C, \\ 2\pi\rho_0 ab \left(\alpha_s - \alpha - \frac{1}{2} e^{-2\alpha} \cos 2\beta \right) + C, \quad \alpha > \alpha_s, \end{cases}$

где 1-я строка соответствует $\alpha \leq \alpha_s$;

$$E_n = -\frac{1}{h_\alpha} \frac{\partial u}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha=\alpha_s} = -\frac{2\pi\rho_0 ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \beta + b^2 \cos^2 \beta}} \left(1 - \frac{a-b}{a+b} \cos 2\beta \right),$$

$$E_\tau = -\frac{1}{h_\beta} \frac{\partial u}{\partial \beta} \Big|_{\alpha=\alpha_s} = -\frac{2\pi\rho_0 ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \beta + b^2 \cos^2 \beta}} \frac{a-b}{a+b} \sin 2\beta, \quad \operatorname{ch} \alpha_s = \frac{a}{c}.$$

5.133. $u(\alpha, \beta) = C - \frac{2J}{\pi\sigma d} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\operatorname{ch}(2n+1)\alpha \cos(2n+1)\beta}{(2n+1) \operatorname{sh}(2n+1)\alpha_s}, \quad \operatorname{sh} \alpha_s = \frac{b}{c}, \quad \mathbf{j} = -\sigma \nabla u.$

5.134. $u(\alpha, \beta) = C - \frac{2J}{\pi\sigma d} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \operatorname{sh}(2n+1)\alpha \sin(2n+1)\beta}{(2n+1) \operatorname{ch}(2n+1)\alpha_s}, \quad \operatorname{ch} \alpha_s = \frac{a}{c}, \quad \mathbf{j} = -\sigma \nabla u.$

У к а з а н и е. $r_{MP}^2 = [\operatorname{ch}(\alpha + \alpha_0) - \cos(\beta + \beta_0)] [\operatorname{ch}(\alpha - \alpha_0) - \cos(\beta - \beta_0)]$.

5.136. $\sigma(\beta) = -\frac{q}{2\pi\sqrt{a^2 \sin^2 \beta + b^2 \cos^2 \beta}} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta_0 \cos n\beta}{\operatorname{ch} n\alpha_s} \right).$

5.137. $\mathbf{F} = -\frac{2q^2}{c \sin \beta_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-n\alpha_s} \sin 2n\beta_0}{\operatorname{ch} n\alpha_s} \mathbf{e}_x, \quad \operatorname{ch} \alpha_s = \frac{a}{c}, \quad \cos \beta_0 = \frac{d}{c}.$

5.138. $\mathbf{F} = \frac{2q^2}{\sqrt{d^2 + c^2}} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\operatorname{sh}(4n+2)\alpha_0 e^{-(2n+1)\alpha_s}}{\operatorname{sh}(2n+1)\alpha_s} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\operatorname{sh} 4n\alpha_0 e^{-2n\alpha_s}}{\operatorname{ch} 2n\alpha_s} \right) \mathbf{e}_y,$
 $\operatorname{sh} \alpha_s = \frac{b}{c}, \quad \sin \alpha_0 = \frac{d}{c}.$

5.139. $u(\alpha, \beta) = q \ln \frac{\operatorname{ch}(\alpha + \alpha_0 - 2\alpha_s) - \cos \beta}{\operatorname{ch}(\alpha - \alpha_0) - \cos \beta}, \quad \operatorname{ch} \alpha_0 = \frac{d}{c}, \quad \operatorname{ch} \alpha_s = \frac{a}{c},$

$$\sigma(\beta) = -\frac{q}{2\pi\sqrt{a^2 \sin^2 \beta + b^2 \cos^2 \beta}} \cdot \frac{a\sqrt{d^2 - c^2} - bd}{ad - b\sqrt{d^2 - c^2} - c^2 \cos \beta},$$

$$\mathbf{F} = -\frac{q^2}{\sqrt{d^2 - c^2}} \left[\frac{d}{\sqrt{d^2 - c^2}} + \frac{(d^2 + b^2)(bd + a\sqrt{d^2 - c^2})}{(d^2 - a^2)(ad + b\sqrt{d^2 - c^2})} \right] \mathbf{e}_x.$$

$$5.140. \quad u(\alpha, \beta) = q \ln \frac{\operatorname{ch}(\alpha + \alpha_0 - 2\alpha_s) - \sin \beta}{\operatorname{ch}(\alpha - \alpha_0) - \sin \beta},$$

$$\sigma(\beta) = -\frac{q}{2\pi\sqrt{a^2 \sin^2 \beta + b^2 \cos^2 \beta}} \cdot \frac{ad - b\sqrt{c^2 + d^2} - bd}{a\sqrt{d^2 + c^2} - bd - c^2 \sin \beta},$$

$$\mathbf{F} = -\frac{q^2}{\sqrt{d^2 + c^2}} \left[\frac{d}{\sqrt{d^2 + c^2}} + \frac{(d^2 + a^2)(ad + b\sqrt{d^2 + c^2})}{(d^2 - b^2)(bd + a\sqrt{d^2 + c^2})} \right] \mathbf{e}_x.$$

$$5.141. \quad u(\alpha, \beta) = C - 2q\alpha + q \ln \frac{\operatorname{ch}(\alpha + \alpha_0 - 2\alpha_s) - \cos \beta}{\operatorname{ch}(\alpha - \alpha_0) - \cos \beta}, \quad \operatorname{ch} \alpha_0 = \frac{d}{c}, \quad \operatorname{ch} \alpha_s = \frac{a}{c},$$

$$\sigma(\beta) = \frac{q(a+b)}{2\pi\sqrt{a^2 \sin^2 \beta + b^2 \cos^2 \beta}} \cdot \frac{d - \sqrt{d^2 - c^2} - (a-b) \cos \beta}{ad - b\sqrt{d^2 - c^2} - c^2 \cos \beta},$$

$$\mathbf{F} = -q^2 \frac{d - \sqrt{d^2 - c^2}}{(a-b)\sqrt{d^2 - c^2}} \left(\frac{a-b}{\sqrt{d^2 - c^2}} + \frac{bd + a\sqrt{d^2 - c^2}}{d^2 - a^2} \right) \mathbf{e}_x.$$

$$5.142. \quad u(\alpha, \beta) = C - 2q\alpha + q \ln \frac{\operatorname{ch}(\alpha + \alpha_0 - 2\alpha_s) - \sin \beta}{\operatorname{ch}(\alpha - \alpha_0) - \sin \beta}, \quad \operatorname{ch} \alpha_0 = \frac{d}{c}, \quad \operatorname{ch} \alpha_s = \frac{a}{c},$$

$$\sigma(\beta) = \frac{q(a+b)}{2\pi\sqrt{a^2 \sin^2 \beta + b^2 \cos^2 \beta}} \cdot \frac{\sqrt{d^2 + c^2} - d - (a-b) \sin \beta}{a\sqrt{d^2 + c^2} - bd - c^2 \sin \beta},$$

$$\mathbf{F} = -\frac{q^2(\sqrt{d^2 + c^2} - d)}{(a-b)\sqrt{d^2 + c^2}} \left(\frac{ad + b\sqrt{d^2 + c^2}}{d^2 - b^2} - \frac{a-b}{\sqrt{d^2 + c^2}} \right) \mathbf{e}_y.$$

$$5.143. \quad \sigma(x) = -\frac{q\sqrt{d^2 - a^2}}{2\pi(d-x)\sqrt{a^2 - x^2}}; \quad \mathbf{F} = -\frac{2q^2 d}{d^2 - a^2} \mathbf{e}_x.$$

$$5.144. \quad \sigma(x) = -\frac{qd}{2\pi\sqrt{a^2 - x^2}} \frac{\sqrt{d^2 + a^2} \pm \sqrt{a^2 - x^2}}{d^2 + x^2}, \quad \text{знак плюс соответствует}$$

верхней $(x+0; y)$, а знак минус — нижней $(x-0; y)$ сторонам полосы.

$$\mathbf{F} = -\frac{q^2}{d} \frac{2d^2 + a^2}{d^2 + a^2} \mathbf{e}_y.$$

$$5.145. \quad \sigma(x) = \frac{q}{2\pi\sqrt{a^2 - x^2}} \left(1 - \sqrt{\frac{d+x}{d-x}} \right); \quad \mathbf{F} = -\frac{2q^2(d - \sqrt{d^2 - a^2})}{d^2 - a^2} \mathbf{e}_x.$$

$$5.146. \quad \sigma(x) = \frac{q}{2\pi\sqrt{a^2 - x^2}} \left(1 - \frac{\sqrt{d^2 + a^2} \pm \sqrt{a^2 - x^2}}{d^2 + x^2} d \right), \quad \text{знак плюс соответ-}$$

ствует верхней $(x+0; y)$, а минус — нижней $(x-0; y)$ сторонам полосы,

$$F = \frac{q^2}{d} \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + a^2}} \right) \mathbf{e}_y.$$

$$5.147. \quad \mathbf{F} = \frac{2q^2}{\sqrt{d^2 + c^2}} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\operatorname{sh}(4n+2)\alpha_0 e^{-(2n+1)\alpha_s}}{\varepsilon \operatorname{sh}(2n+1)\alpha_s + \operatorname{ch}(2n+1)\alpha_s} + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\operatorname{sh} 4n\alpha_0 e^{-2n\alpha_s}}{\operatorname{sh} 2n\alpha_s + \varepsilon \operatorname{ch} 2n\alpha_s} \right) \mathbf{e}_y, \quad \operatorname{sh} \alpha_s = \frac{b}{c}, \quad \operatorname{sh} \alpha_0 = \frac{d}{c}, \quad c = \sqrt{a^2 - b^2}.$$

5.148. Электростатический потенциал

$$u(\alpha, \beta) = E_0 c \frac{\operatorname{sh} \alpha_1 \operatorname{sh}(\alpha - \alpha_1) + \varepsilon \operatorname{ch} \alpha_1 \operatorname{ch}(\alpha - \alpha_1)}{\operatorname{sh}(\alpha_2 - \alpha_1)(\operatorname{sh} \alpha_1 + \varepsilon^2 \operatorname{ch} \alpha_1) + \varepsilon e^{\alpha_1} \operatorname{ch}(\alpha_2 - \alpha_1)} e^{\alpha_2} \cos \beta, \quad \alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2,$$

где $\alpha = \alpha_1$ и $\alpha = \alpha_2$ — уравнения поперечных сечений цилиндров в эллиптических координатах. У к а з а н и е. Потенциал поля в диэлектрике

$u(\alpha, \beta) = v(\alpha, \beta) - E_0 c \operatorname{ch} \alpha \cos \beta$, где $v(\alpha, \beta)$ (при условии ограниченности во внутренней полости и на бесконечности) имеет вид

$$v(\alpha, \beta) = \begin{cases} A_0 + A_1 \operatorname{ch} \alpha \cos \beta, & 0 \leq \alpha \leq \alpha_1, \\ B_0 + C_0 \alpha + (B_1 \operatorname{ch} \alpha + C_1 \operatorname{sh} \alpha) \cos \beta, & \alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2, \\ D_0 + H_0 \alpha + D_1 e^{-\alpha} \cos \beta, & \alpha_2 \leq \alpha. \end{cases}$$

$$5.149. A = \begin{cases} C_0 - \frac{2J}{c} \left(\ln \frac{2}{\sqrt{a^2 - b^2}} - \alpha_0 \right) + \frac{4\mu J}{c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\operatorname{ch} n\alpha \cos n\beta e^{-n(\alpha_0 - \alpha_s)}}{n(\mu \operatorname{ch} n\alpha_s + \operatorname{sh} n\alpha_s)}, \\ C_0 + \frac{2J}{c} \ln \frac{1}{r_{MP}} + \frac{2J}{c} (\mu - 1) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\operatorname{sh} 2n\alpha_s \cos n\beta e^{-n(\alpha - \alpha_s + \alpha_0)}}{n(\mu \operatorname{ch} n\alpha_s + \operatorname{sh} n\alpha_s)}, \end{cases}$$

где $\operatorname{ch} \alpha_s = \frac{a}{\sqrt{a^2 - b^2}}$, $\operatorname{ch} \alpha_0 = \frac{d}{\sqrt{a^2 - b^2}}$, c — скорость света, 1-я строка соответствует $\alpha \leq \alpha_s$, а 2-я — $\alpha < \alpha_s$.

$$5.150. 1) \mathbf{F} = -\frac{J^2 b(bd + a\sqrt{d^2 - a^2 + b^2})}{c^2 (d^2 - a^2)(d^2 - a^2 + b^2)} \mathbf{e}_x;$$

$$2) \mathbf{F} = -\frac{J^2 a(ad + b\sqrt{d^2 + a^2 - b^2})}{c^2 (d^2 - b^2)(d^2 + a^2 - b^2)} \mathbf{e}_y, \quad c — \text{ скорость света.}$$

5.151. У к а з а н и е. См. решение задачи 5.121.

5.153. У к а з а н и е. См. решение задачи 5.122.

$$5.154. \quad \sigma(x, y) = \frac{Q}{4\pi ab \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}}. \quad (5.55)$$

$$5.156. \quad 1) \quad u = \frac{3Q}{2abc} \frac{k^2 - 1}{k^3 - 1} M_0; \quad (5.56)$$

$$2) \quad du = \frac{dQ}{abc} M_0. \quad (5.57)$$

$$5.158. \quad u = \frac{Q}{abc} M_0(\xi). \quad (5.58)$$

У к а з а н и е. Задачу Дирихле

$$\Delta u = 0 \quad 0 < \xi,$$

$$u|_{\xi=0} = C, \quad u \rightarrow 0 \quad \text{при } \xi \rightarrow \infty$$

решать в классе функций, зависящих только от ξ .

$$5.161. 1) \quad M_0(\xi) = \frac{ab^2}{\sqrt{a^2 - b^2}} \ln \frac{\sqrt{\xi + a^2} + \sqrt{a^2 - b^2}}{\sqrt{\xi + b^2}},$$

$$M_{100}(\xi) = \frac{ab^2}{a^2 - b^2} \left(\frac{1}{\sqrt{a^2 - b^2}} \ln \frac{\sqrt{\xi + a^2} + \sqrt{a^2 - b^2}}{\sqrt{\xi + b^2}} - \frac{1}{\sqrt{\xi + b^2}} \right),$$

$$M_{010}(\xi) = M_{001}(\xi) = \frac{ab^2}{2(a^2 - b^2)} \times \\ \times \left(\frac{\sqrt{\xi + a^2}}{\xi + b^2} - \frac{1}{\sqrt{a^2 - b^2}} \ln \frac{\sqrt{\xi + a^2} + \sqrt{a^2 - b^2}}{\sqrt{\xi + b^2}} \right);$$

$$2) \quad M_0(\xi) = \frac{a^2 c}{\sqrt{a^2 - c^2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{a^2 - c^2}{\xi + c^2}},$$

$$M_{100}(\xi) = M_{010}(\xi) = \frac{a^2 c}{2(a^2 - c^2)} \left(\frac{1}{\sqrt{a^2 - c^2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{a^2 - c^2}{\xi + c^2}} - \frac{\sqrt{\xi + c^2}}{\xi + a^2} \right),$$

$$M_{001}(\xi) = \frac{a^2 c}{a^2 - c^2} \left(\frac{1}{\sqrt{\xi + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{a^2 - c^2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{a^2 - c^2}{\xi + c^2}} \right).$$

У к а з а н и е. Применить соотношения (5.38), (5.39).

$$\mathbf{5.162.} \quad u = \frac{Q}{\sqrt{a^2 - b^2}} \ln \frac{\sqrt{\xi + a^2} + \sqrt{a^2 - b^2}}{\sqrt{\xi + b^2}},$$

ξ — наибольший корень уравнения $\frac{x^2}{\xi + a^2} + \frac{y^2 + z^2}{\xi + b^2} = 1$.

$$\mathbf{5.163.} \quad u = \frac{Q}{a} \ln \frac{a + \sqrt{\xi + a^2}}{\sqrt{\xi}}, \quad \xi = \frac{r^2 + z^2 - a^2 + \sqrt{(r^2 + z^2 - a^2)^2 + 4r^2 a^2}}{2},$$

$$r^2 = z^2 + y^2; \quad \rho(z) = \frac{Q}{2a}.$$

$$\mathbf{5.164.} \quad u = \frac{Q}{\sqrt{a^2 - c^2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{a^2 - c^2}{\xi + c^2}},$$

ξ — наибольший корень уравнения $\frac{x^2 + y^2}{\xi + a^2} + \frac{z^2}{\xi + c^2} = 1$.

$$\mathbf{5.165.} \quad u = \frac{Q}{r_0} \operatorname{arctg} \left(\frac{r^2 + z^2 - r_0^2 + \sqrt{(r^2 + z^2 - r_0^2)^2 - 4z^2 r_0^2}}{2r_0^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad r^2 = x^2 + y^2.$$

$$\mathbf{5.166.} \quad u = -\frac{E_0 \sqrt{(\xi + a^2)(\eta + a^2)(\zeta + a^2)}}{\sqrt{(a^2 - b^2)(a^2 - c^2)}} \left(1 - \frac{M_{100}(\xi)}{M_a} \right).$$

У к а з а н и е. Поле симметрично относительно плоскости yOz , поэтому достаточно рассмотреть случай $x > 0$. Потенциал $u = u_0 + v$, где (см. (5.35))

$$u_0 = -E_0 x = -\frac{\sqrt{(\xi + a^2)(\eta + a^2)(\zeta + a^2)}}{\sqrt{(a^2 - b^2)(a^2 - c^2)}},$$

а v — решение задачи

$$\Delta v = 0, \quad 0 < \xi,$$

$$v|_{\xi=0} = -u_0|_{\xi=0}, \quad v \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad \xi \rightarrow \infty.$$

Пусть $v = u_0 f(\xi)$, тогда $f(0) = -1$, а уравнение $\Delta(u_0 f) = 0$ сводится к

$$f'' + f' \frac{d}{d\xi} \ln[(\xi + a^2)R(\xi)] = 0, \quad (5.59)$$

откуда $f(\xi) = C + D M_{100}(\xi)$.

$$\mathbf{5.167.} \quad \sigma = \frac{1}{4\pi \sqrt{\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4} + \frac{z^2}{c^4}}} \left(\frac{x E_x}{a^2 M_a} + \frac{y E_y}{b^2 M_b} + \frac{z E_z}{c^2 M_c} \right).$$

$$5.168. \quad 1) \sigma(x, y) = \frac{(a^2 - b^2)E_0x}{4\pi a^2 b [K(k) - E(k)] \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}};$$

$$2) \sigma(x, y) = \frac{(a^2 - b^2)E_0y}{4\pi b [a^2 E(k) - b^2 K(k)] \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}}, \quad k = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a},$$

$K(k)$ и $E(k)$ — полные эллиптические интегралы первого и второго рода.

$$5.169. \quad \sigma(r, \varphi) = \frac{2E_0r \cos \varphi}{\pi^2 \sqrt{r_0^2 - r^2}}.$$

$$5.170. \quad 1) \quad u = -E_0x \left(1 - \frac{\ln \frac{\sqrt{\xi + a^2} + \sqrt{a^2 - b^2}}{\sqrt{\xi + a^2}} - \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{\xi + a^2}}}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b} - \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}} \right),$$

$$\sigma = \frac{e^3 E_0x}{2\pi \left(\ln \frac{1+e}{1-e} - 2e \right) \sqrt{(1-e^2)^2 x^2 + r^2}};$$

$$2) \quad u = -E_0z \left(1 - \frac{\frac{\sqrt{\xi + a^2}}{\xi + b^2} - \frac{1}{\sqrt{a^2 - b^2}} \ln \frac{\sqrt{\xi + a^2} - \sqrt{a^2 - b^2}}{\sqrt{\xi + b^2}}}{\frac{a}{b^2} - \frac{1}{\sqrt{a^2 - b^2}} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b}} \right),$$

$$\sigma = \frac{e^2 E_0z}{2\pi \left(1 - \frac{1-e^2}{2e} \ln \frac{1+e}{1-e} \right) \sqrt{(1-e^2)^2 x^2 + r^2}},$$

где $e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$, ξ — наибольший корень уравнения $\frac{x^2}{\xi + a^2} + \frac{y^2 + z^2}{\xi + b^2} = 1$.

$$5.171. \quad 1) \sigma = \frac{e^2 E_0x}{2\pi \left(\frac{1+e^2}{e} \operatorname{arctg} e - 1 \right) \sqrt{r^2 + (1+e^2)^2 z^2}}, \quad e = \sqrt{\frac{a^2}{c^2} - 1};$$

$$2) \sigma = \frac{e^3 E_0z}{4\pi (e - \operatorname{arctg} e) \sqrt{r^2 + (1+e^2)^2 z^2}}, \quad e = \sqrt{\frac{a^2}{c^2} - 1}, \quad r^2 = x^2 + y^2.$$

$$5.172. \quad \mathbf{H} = \frac{H_{0x} \mathbf{e}_x}{1 + (\mu - 1)M_a} + \frac{H_{0y} \mathbf{e}_y}{1 + (\mu - 1)M_b} + \frac{H_{0z} \mathbf{e}_z}{1 + (\mu - 1)M_c} - \text{однородное поле.}$$

У к а з а н и е. Если поле $\mathbf{H}_0 = H_0 \mathbf{e}_x$, то потенциал $u = u_0 + v$, где $u_0 = -H_0 x$, $v = u_0 f(\xi)$, $f(\xi)$ — решение уравнения (5.59) на промежутках $-a^2 < \xi < 0$, $0 < \xi$. Условия для определения постоянных интегрирования: ограниченность производной $\frac{u_\xi}{\partial u}$ в точке $\xi = -a^2$; $v \rightarrow 0$ при $\xi \rightarrow \infty$, непрерывность функций u и $\mu \frac{\partial u}{\partial n}$.

$$5.173. \quad \mathbf{E} = \frac{\mathbf{E}_0}{1 + \frac{\varepsilon - 1}{2e^2} \left(1 - \frac{1-e^2}{2e} \ln \frac{1+e}{1-e} \right)}, \quad e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}.$$

$$5.174. \mathbf{H} = \frac{\mathbf{H}_0}{1 + \frac{\mu - 1}{e^3}(1 + e^2)(e - \operatorname{arctg} e)}, \quad e = \sqrt{\frac{a^2}{c^2} - 1}.$$

5.175. Решение. 1) Из (5.53), (5.32) следует, что

$$\frac{\Delta V}{\Delta V'} = \frac{\Delta p \Delta S}{\Delta p' \Delta S'} = \frac{p \Delta S dk}{p' \Delta S' dk'}, \quad \frac{dV}{dV'} = \frac{abc dk}{a'b'c' dk'}.$$

Свойство (5.41) достаточно доказать для элементарных площадок ΔS и $\Delta S'$, имеющих форму треугольников с вершинами $\mathbf{r}_i$ и $\mathbf{r}'_i$, $i = 1, 2, 3$. В этом случае $2p\Delta S$ и $2p'\Delta S'$ — объемы параллелепипедов, построенных на векторах $\mathbf{r}_i$ и $\mathbf{r}'_i$, так что с учетом (5.40)

$$2p\Delta S = (\mathbf{r}_1 \mathbf{r}_2 \mathbf{r}_3) = \frac{abc}{a'b'c'} (\mathbf{r}'_1 \mathbf{r}'_2 \mathbf{r}'_3) = \frac{abc}{a, b, c} 2p'\Delta S'.$$

Таким образом,

$$\frac{\Delta V}{\Delta V'} = \frac{abc}{a'b'c'} \frac{dk}{dk'} = \frac{dV}{dV'}.$$

2) Так как $a'^2 - a^2 = b'^2 - b^2 = c'^2 - c^2 = \xi$, то

$$\begin{aligned} |\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|^2 &= (x - x')^2 + \dots + \left(\frac{a}{a'} x' - \frac{a'}{a} x_1 \right)^2 + \dots = \frac{a^2}{a'^2} x'^2 + \frac{a'^2}{a^2} x_1^2 - 2x'x_1 + \dots = \\ &= \left(\frac{a^2}{a'^2} - 1 \right) x'^2 + x'^2 + \left(\frac{a'^2}{a^2} - 1 \right) x_1^2 + x_1^2 - 2x'x_1 + \dots = \\ &= -\xi \left(\frac{x'^2}{a'^2} + \frac{y'^2}{b'^2} + \frac{z'^2}{c'^2} \right) + \xi \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) + |\mathbf{r}' - \mathbf{r}_1|^2 = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}_1|^2. \end{aligned}$$

5.176. Решение. Если $\mathbf{r}$ и $\mathbf{r}_1$ — точки на S , $\mathbf{r}'$ и $\mathbf{r}'_1$ — взаимные точки на S' , dV и dV' — взаимные объемы в окрестностях точек $\mathbf{r}_1$ и $\mathbf{r}'_1$, то в силу (5.41), (5.42)

$$\Delta u(\mathbf{r}') = \frac{\rho(\mathbf{r}_1) \Delta V}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}_1|} = \frac{\rho'(\mathbf{r}'_1) \Delta V'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_1|} \Delta u'(\mathbf{r}).$$

Интегрирование полученного тождества приводит к соотношению (5.43).

$$5.177. \quad 1) du = \frac{dq}{abc} M_0(\xi). \quad (5.60)$$

У к а з а н и е. Воспользоваться формулой (5.57) и теоремой взаимности (5.43).

$$5.178. \quad u(\mathbf{r}) = 2\pi\rho_0 \cdot \begin{cases} M_0 - M_a x^2 - M_b y^2 - M_c z^2, & \xi \leq 0, \\ M_0(\xi) - M_{100}(\xi) x^2 - M_{010}(\xi) y^2 - M_{001}(\xi) z^2, & 0 < \xi; \end{cases}$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = 4\pi\rho_0 \cdot \begin{cases} M_a x \mathbf{e}_x + M_b y \mathbf{e}_y + M_c z \mathbf{e}_z, & \xi \leq 0, \\ M_{100}(\xi) x \mathbf{e}_x + M_{010}(\xi) y \mathbf{e}_y + M_{001}(\xi) z \mathbf{e}_z, & 0 < \xi, \end{cases}$$

где ξ — эллиптическая координата точки $\mathbf{r}$ относительно поверхности эллипсоида. Решение. Пусть S_k — поверхность эллипсоида Ω_k с полуосями ka, kb, kc , где $0 < k < 1$. Эллиптическая координата ξ_k точки $\mathbf{r}$ относительно S_k есть наибольший корень уравнения

$$\frac{x^2}{\xi + k^2 a^2} + \frac{y^2}{\xi + k^2 b^2} + \frac{z^2}{\xi + k^2 c^2} = 1. \quad (5.61)$$

Потенциал вне эллипсоида Ω_1 складывается из потенциалов гомеоидов, ограниченных поверхностями S_k и S_{k+dk} . Потенциал отдельного гомеоида (см. (5.60)) будет

$$du(\mathbf{r}) = 2\pi abc\rho_0 k^2 dk \int_{\xi}^{\infty} \frac{ds}{\sqrt{(s+k^2a^2)(s+k^2b^2)(s+k^2c^2)}}, \quad (5.62)$$

а результирующий потенциал (после замены $s = k^2t$ в (5.62))

$$u(\mathbf{r}) = 2\pi abc\rho_0 \int_0^1 k dk \int_{\frac{\xi_k}{k^2}}^{\infty} \frac{dt}{R(t)}.$$

Интегрирование по частям

$$u(\mathbf{r}) = \pi abc\rho_0 \left[\int_{\xi}^{\infty} \frac{dt}{R(t)} + \int_0^1 \frac{k^2}{R\left(\frac{\xi_k}{k^2}\right)} d\left(\frac{\xi_k}{k^2}\right) \right],$$

где $\xi = \xi_1$, и замена $\xi_k/k^2 = t$ с учетом (5.61) завершают выкладку:

$$u(\mathbf{r}) = \pi abc\rho_0 \left[\int_{\xi}^{\infty} \frac{dt}{R(t)} - \int_{\xi}^{\infty} \left(\frac{x^2}{t+a^2} + \frac{y^2}{t+b^2} + \frac{z^2}{t+c^2} \right) \frac{dt}{R(t)} \right]. \quad (5.63)$$

Пусть $\mathbf{r}$ — внутренняя точка эллипсоида Ω . Поверхность S_k , проходящая через эту точку, разбивает Ω на эллипсоид Ω_k и гомеоид, ограниченный поверхностями S_k и S . Потенциал $u(\mathbf{r})$ равен сумме потенциалов $u_1(\mathbf{r})$ эллипсоида Ω_k и $u_2(\mathbf{r})$ гомеоида в точке $\mathbf{r}$ поверхности S_k . Потенциал $u_1(\mathbf{r})$ получается из (5.63) при $\xi = 0$ и преобразуется заменой $t = k^2s$ к виду

$$u_1(\mathbf{r}) = \pi abc\rho_0 \int_0^{\infty} \left(k^2 - \frac{x^2}{s+a^2} + \frac{y^2}{s+b^2} + \frac{z^2}{s+c^2} \right) \frac{ds}{R(s)}.$$

Потенциал $u_2(\mathbf{r})$ определен выражением (5.56), где $Q = \frac{4}{3}\pi(1-k^3)abc\rho_0$:

$$u_2(\mathbf{r}) = 2\pi\rho_0(1-k^2)M_0.$$

5.179. В системе координат, осями которой являются оси эллипсоида, а начало — в его центре

$$D_{xx} = \frac{Q}{5}(2a^2 - b^2 - c^2), \quad D_{yy} = \frac{Q}{5}(2b^2 - c^2 - a^2), \quad D_{zz} = \frac{Q}{5}(2c^2 - a^2 - b^2).$$

У к а з а н и е. См. задачу 5.127.

$$5.181. \quad u(\alpha, \beta) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} C_n \frac{P_n(i \operatorname{sh} \alpha)}{P_n(i \operatorname{sh} \alpha_s)} P_n(\cos \beta), & \alpha \leq \alpha_s, \\ \sum_{n=0}^{\infty} C_n \frac{Q_n(i \operatorname{sh} \alpha)}{Q_n(i \operatorname{sh} \alpha_s)} P_n(\cos \beta), & \alpha_s \leq \alpha, \end{cases}$$

$$C_n = \frac{2n+1}{2} \int_0^{\pi} f(\beta) P_n(\cos \beta) \sin \beta d\beta, \quad \operatorname{sh} \alpha_s = \frac{c}{\sqrt{a^2 - c^2}}.$$

5.182. См. ответ к предыдущей задаче, где

$$C_{2m} = \frac{u_1 + u_2}{2} \delta_{m0}, \quad C_{2m+1} = \frac{(u_1 - u_2)(4m+3)}{4(m+1)} P_{2m}(0), \quad m \in \mathbb{N}.$$

$$5.183. \quad u(\alpha) = \begin{cases} u_0, & \alpha \leq \alpha_s, \\ u_0 \frac{\operatorname{arctg} \operatorname{sh} \alpha}{\operatorname{arctg} \operatorname{sh} \alpha_s}, & \alpha_s \leq \alpha, \end{cases}$$

$$\operatorname{sh} \alpha_s = \frac{c}{d}, \quad d = \sqrt{a^2 - c^2};$$

$$\sigma = \frac{u_0 d}{4\pi a^2 c \arcsin \frac{d}{a} \cdot \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{a^4} + \frac{z^2}{c^4}}}, \quad C = \frac{d}{\arcsin \frac{d}{a}}.$$

$$5.184. \quad u(\alpha) = \frac{2u_0}{\pi} \operatorname{arctg} \operatorname{sh} \alpha, \quad \sigma = \frac{u_0}{2\pi^2 \sqrt{r_0^2 - r^2}}, \quad C = \frac{2r_0}{\pi},$$

$$5.185. \quad u(\alpha) = \frac{I}{2\pi\sigma} \cdot \begin{cases} \frac{\operatorname{arctg} \frac{c}{d}}{d}, & \alpha \leq \alpha_s, \\ \frac{\operatorname{arctg} \operatorname{sh} \alpha}{\frac{d}{\operatorname{arctg} \operatorname{sh} \alpha_s}}, & \alpha_s \leq \alpha, \end{cases}$$

$$\operatorname{sh} \alpha_s = \frac{c}{d}, \quad d = \sqrt{a^2 - c^2};$$

$$\mathbf{j} = \frac{J}{2\pi a^2 c \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{a^4} + \frac{z^2}{c^4}}} \mathbf{e}_\alpha, \quad R = \frac{\operatorname{arctg} \frac{d}{c}}{2\pi\sigma d}.$$

$$5.187. \quad u(\alpha, \beta) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} C_n \frac{P_n(\operatorname{ch} \alpha)}{P_n(\operatorname{ch} \alpha_s)} P_n(\cos \beta), & \alpha \leq \alpha_s, \\ \sum_{n=0}^{\infty} C_n \frac{Q_n(\operatorname{ch} \alpha)}{Q_n(\operatorname{ch} \alpha_s)} P_n(\cos \beta), & \alpha_s \leq \alpha, \end{cases}$$

$$C_n = \frac{2n+1}{2} \int_0^\pi f(\beta) P_n(\cos \beta) \sin \beta d\beta, \quad \operatorname{ch} \alpha_s = \frac{a}{\sqrt{a^2 - c^2}}.$$

$$5.188. \quad u(\alpha) = \begin{cases} u_0, & \alpha \leq \alpha_s, \\ u_0 \frac{Q_0(\operatorname{ch} \alpha)}{Q_0(\operatorname{ch} \alpha_s)}, & \alpha_s \leq \alpha, \end{cases}$$

$$\operatorname{ch} \alpha_s = \frac{a}{d}, \quad d = \sqrt{a^2 - b^2};$$

$$\sigma = \frac{u_0 d}{4\pi a b^2 \ln \frac{a+d}{b} \cdot \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{b^4} + \frac{z^2}{a^4}}}, \quad C = \frac{d}{\ln \frac{a+d}{b}}.$$

$$5.189. \quad u(\alpha) = \frac{I}{4\pi\sigma d} \ln \frac{\operatorname{ch} \alpha + 1}{\operatorname{ch} \alpha - 1}, \quad \alpha_s \leq \alpha, \quad \operatorname{ch} \alpha_s = \frac{a}{d}, \quad d = \sqrt{a^2 - b^2};$$

$$\mathbf{j} = \frac{I}{2\pi a b^2 \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{b^4} + \frac{z^2}{a^4}}} \mathbf{e}_\alpha, \quad R = \frac{1}{2\pi d \sigma} \ln \frac{a+d}{b}.$$

$$5.190. \quad 1) u_0; \quad 2) u_0 \frac{r}{r_0} \sin \theta \sin \varphi; \quad 3) \frac{u_0 r}{5r_0} \left(\frac{8r^2}{r_0^2} P_3(\cos \theta) - 3P_1(\cos \theta) \right);$$

$$4) \frac{u_0 r^3}{r_0^3} \sin^3 \theta \sin 3\varphi.$$

$$5.191. \quad u(r, \theta, \varphi) = \frac{r_0}{4\pi} \int_{S_1} \frac{(r_0^2 - r^2)f(\theta', \varphi') \sin \theta' d\theta' d\varphi'}{(r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \gamma)^{\frac{3}{2}}}, \quad (5.64)$$

$$\cos \gamma = \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos(\varphi - \varphi'). \quad (5.65)$$

Решением этой задачи может служить потенциал двойного слоя

$$u(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM} ds}{r_{MP}^2}$$

с неизвестной плотностью $\nu(P)$, который удовлетворяет уравнению Лапласа. Функция $\nu(P)$ определяется граничным условием: из свойства (5.7)

$$u_-(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM} ds}{r_{MP}^2} - 2\pi\nu(M), \quad M \in S,$$

где

$$u_-(M) = \lim_{\substack{M' \rightarrow M \in S \\ M' \in B(r_0)}} u(M') = f(M),$$

следует интегральное уравнение Фредгольма второго рода для функции $\nu(P)$

$$\nu(M) = \frac{1}{2\pi} \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM} ds}{r_{MP}^2} - \frac{1}{2\pi} f(M), \quad M \in S.$$

Имея ввиду соотношения (пример 5.4, рис. 5.13, а)

$$r_{MP} = 2r_0 \cos(\pi - \varphi_{PM}), \quad r_{MP}^2 = 2r_0(1 - \cos \gamma),$$

интегральное уравнение можно представить в форме

$$\nu(s) = -\frac{1}{4\sqrt{2}\pi} \int_{S_1} \frac{\nu(s') ds'}{\sqrt{1 - \cos \gamma}} - \frac{1}{2\pi} f(s), \quad s \in S_1.$$

Оно является частным случаем уравнения (при $a = 1$), рассмотренного в задаче 4.391, и имеет решение

$$\nu(s) = -\frac{1}{2\pi} f(s) + \frac{1}{4\pi} \sum_{n,m} \frac{f_{nm} Y_n^m(s)}{n+1}, \quad s \in S_1, \quad f_{nm} = \frac{(f, Y_n^m)}{\|Y_n^m\|^2}.$$

Следовательно, решение задачи Дирихле

$$u(r, \theta, \varphi) = -\frac{1}{2\pi} \int_S \frac{f(s') \cos \varphi_{PM} ds'}{r_{MP}^2} + \frac{1}{4\pi} \int_S \sum_{n,m} \frac{f_{nm} Y_n^m(s') \cos \varphi_{PM} ds'}{(n+1) r_{MP}^2}.$$

Во втором слагаемом I_2 ряд сходится равномерно на S (функция $r_{MP}^{-2} \cos \varphi_{PM}$ при фиксированном значении $r < r_0$ на S ограничена, а ряд без этого множителя равномерно сходится согласно теореме Гильберта–Шмидта), поэтому допустимо почленное интегрирование ряда, так что

$$I_2 = \frac{1}{4\pi} \sum_{n,m} \frac{f_{nm}}{n+1} \int_S \frac{Y_n^m(s') \cos \varphi_{PM} ds'}{r_{MP}^2}.$$

В результате применения соотношения (5.45) слагаемое I_2 приобретает форму

$$I_2 = \frac{1}{4\pi} \sum_{n,m} \frac{f_{nm}}{n+1} \int_{S_1} Y_n^m(s)' \sum_k (-1)^k (k+1) t^k P_k(\cos \gamma) ds'.$$

Ряд под интегралом мажорируется сходящимся числовым рядом с общим членом $(k+1)t^k$, следовательно, можно провести почленное интегрирование, что обуславливает применение формулы (5.15)

$$I_2 = - \sum_{n,m} f_{nm} Y_n^m(s).$$

Наконец, использование формулы Лапласа ([15], § 25.7) приводит слагаемое I_2 к виду

$$I_2 = -\frac{1}{4\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \int_{S_1} f(s') t^n P_n(\cos \gamma) ds'.$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} u(r, \theta, \varphi) &= \frac{1}{2\pi} \int_{S_1} f(s') \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) t^n P_n(\cos \gamma) ds' - \frac{1}{4\pi} \int_{S_1} f(s') \sum_{n=0}^{\infty} t^n P_n(\cos \gamma) ds' = \\ &= \frac{1}{4\pi} \int_{S_1} f(s') \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) t^n P_n(\cos \gamma) ds'. \end{aligned}$$

Сумма

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) t^n P_n(\cos \gamma) &= 2\sqrt{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(n + \frac{1}{2}\right) t^{n-\frac{1}{2}} P_n(\cos \gamma) = \\ &= 2\sqrt{2} \frac{d}{dt} \sum_{n=0}^{\infty} t^{n+\frac{1}{2}} P_n(\cos \gamma) = 2\sqrt{2} \frac{d}{dt} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{1+t^2-2t\cos\gamma}} = \frac{1-t^2}{(1+t^2-2t\cos\gamma)^{\frac{3}{2}}}. \end{aligned}$$

Отсюда следует ответ.

5.192. Решение. 1) Из определения инверсии следует, что векторы $\mathbf{r}$ и $\mathbf{R}$ сонаправлены и имеют общее начало т. O — центр сферы $S(r_0)$, а их длины связаны соотношением $rR = r_0^2$. Отсюда следует, что

$$\mathbf{r} = \frac{r_0^2}{R^2} \mathbf{R},$$

т. е. существует однозначное обратное отображение. Если $r > r_0$, то точка $M(\mathbf{r})$ расположена вне шара $B(r_0)$, тогда $R = \frac{r_0^2}{r} < r_0$, т. е. образ $M'(\mathbf{R}) \in B(r_0)$.

2) В сферических координатах оператор Лапласа имеет вид

$$\Delta = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \Delta_{\theta, \varphi},$$

где $\Delta_{\theta, \varphi}$ — угловая часть лапласиана, $rR = r_0^2$,

$$U(\mathbf{R}) = \frac{r_0}{R} u\left(\frac{r_0^2}{R^2} \mathbf{R}\right) = \frac{r}{r_0} u(\mathbf{r}), \quad \frac{\partial}{\partial R} = \frac{dr}{dR} \frac{\partial}{\partial r} = -\frac{r^2}{r_0^2} \frac{\partial}{\partial r}.$$

Вычисление производных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial R} &= -\frac{r^2}{r_0^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r}{r_0} u\right) = -\frac{r^2}{r_0^3} \frac{\partial}{\partial r} (ru), \\ \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} R^2 \frac{\partial U}{\partial R} &= \frac{r^2}{r_0^4} \left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r_0^4}{r^2} \left(-\frac{r^2}{r_0^3}\right)\right) \frac{\partial}{\partial r} (ru) = \frac{r^4}{r_0^5} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (ru) = \frac{r^5}{r_0^5} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r}\right), \\ \frac{1}{R^2} \Delta_{\theta, \varphi} U &= \frac{r^3}{r_0^5} \Delta_{\theta, \varphi} u = \frac{r^5}{r_0^5} \frac{1}{r^2} \Delta_{\theta, \varphi} u. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\Delta U(\mathbf{R}) = \frac{r^5}{r_0^5} \Delta u \mathbf{r} \implies \Delta U(\mathbf{R}) = 0, \quad 0 < R < r_0.$$

3) Преобразование Кельвина функции $u(\mathbf{r})$ обладает свойствами:

$$1) U(\mathbf{R}) = \frac{r_0}{r} u\left(\frac{r_0^2}{r^2} \mathbf{R}\right) = \frac{\alpha(R)}{R} = o\left(\frac{1}{R}\right), \quad R \rightarrow 0,$$

где $\alpha(R)$ — бесконечно малая функция при $R \rightarrow 0$;

2) $U(\mathbf{R})$ — гармонична в $B(r_0) \setminus \{O\}$, т. е. т. O — изолированная особая точка функции $U(\mathbf{R})$.

Существует функция $V(\mathbf{R})$, гармоническая в шаре $B(r_0)$, значения которой на сфере $S(r_0)$ совпадают со значениями $U(\mathbf{R})$ на этой сфере (см. пример 5.10). Функция $W(\mathbf{R}) = U(\mathbf{R}) - V(\mathbf{R})$ удовлетворяет условиям

$$\Delta U(\mathbf{R}) = 0, \quad 0 < R < r_0,$$

$$W(r_0) = 0, \quad W(\mathbf{R}) = o\left(\frac{1}{R}\right), \quad R \rightarrow 0.$$

Последнее условие — следствие оценки: так как $V(\mathbf{R}) \in C(\overline{B}(r_0))$, то она ограничена, поэтому

$$|W| \leq |U| + |V| \leq \frac{|\alpha(R)|}{R} + A = \frac{1}{R}(|\alpha(R)| + AR) = \frac{\beta(R)}{R} = o\left(\frac{1}{R}\right), \quad R \rightarrow 0,$$

где $\beta(R)$ — бесконечно малая функция при $R \rightarrow 0$. Любую точку $M(\mathbf{R}) \in \overline{B}(r_0) \setminus \{O\}$ можно заключить в сферический слой $\Omega(\delta; r_0)$, ограниченный сферами $S(\delta)$ и $S(r_0)$: при этом $0 < \delta \leq R \leq r_0$ (рис. 5.24). В области $\Omega(\delta; r_0)$ для $W(\mathbf{R})$ можно построить мажоранту $H(\mathbf{R}) = \frac{\varepsilon r_0}{R}$, где ε — любое положительное число. Действительно, на сфере $S(r_0)$

$$W(r_0) = 0 < \varepsilon = H(r_0);$$

на сфере $S(\delta)$

$$W(\delta) = \frac{\beta(\delta)}{\delta}, \quad H(\delta) = \frac{\varepsilon r_0}{\delta}.$$

Поскольку $\beta(\delta) \rightarrow 0$ при $\delta \rightarrow 0$, то

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0: \beta(\delta) \leq \varepsilon \implies |W(\delta)| \leq H(\delta);$$

при этом можно считать, что $\delta \leq R$. Итак, на поверхности $\partial\Omega(\delta; r_0)$, ограничивающей область $\Omega(\delta; r_0)$, выполняется неравенство $|W| \leq H$. Согласно принципу максимума для гармонической функции

$$|W(\mathbf{R})| \leq \frac{\varepsilon r_0}{R}, \quad R \in [\delta; r_0].$$

При фиксированном R правая часть неравенства может стать (при соответствующем ε) сколь угодно малой, следовательно, $W(\mathbf{R}) = 0$ в области $B(r_0) \setminus \{O\}$. Таким образом, $U(\mathbf{R}) = V(\mathbf{R})$ в любой точке $M(\mathbf{R}) \in B(r_0) \setminus \{O\}$. Если определить функцию $U(\mathbf{R})$ так, чтобы $U(O) = V(O)$, то $U(\mathbf{R})$ станет гармонической в шаре $B(r_0)$. Установленное свойство называется теоремой о стирании особенностей гармонической функции: если функция $u(M)$ — гармоническая в области $\omega \setminus \{P\}$ и удовлетворяет условию

$$u(M) = o\left(\frac{1}{r_{MP}}\right), \quad M \rightarrow P$$

(т. е. растет не быстрее, чем $\frac{1}{r_{MP}}$ при $M \rightarrow P$), то она гармонически продолжается в точку P .

В результате обратного преобразования Кельвина

$$u(\mathbf{r}) = \frac{r_0}{r} U(\mathbf{R}), \quad \mathbf{R} = \frac{r_0^2}{r^2} \mathbf{r}, \quad \mathbf{r} = \{x_1, x_2, x_3\}, \quad \mathbf{R} = \{X_1, X_2, X_3\}.$$

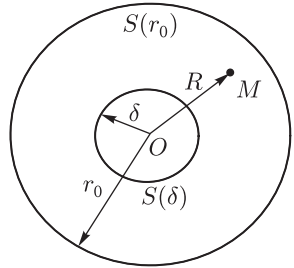


Рис. 5.24

Если $r \rightarrow \infty$, то $R \rightarrow 0$, поэтому функции U , $\frac{\partial U}{\partial X_i}$, $i = 1, 2, 3$, ограничены, $\left| \frac{x_i}{r} \right| \leq 1$, $i = 1, 2, 3$. Следовательно,

$$|u(\mathbf{r})| \leq \frac{r_0}{r} |U| \leq \frac{C}{r}, \quad r \rightarrow \infty, \implies u(\mathbf{r}) = O\left(\frac{1}{r}\right), \quad r \rightarrow \infty.$$

Оценка производных:

$$\frac{\partial u}{\partial x_i} = -\frac{r_0}{r^2} \frac{x_i}{r} U + \frac{r_0}{r} \sum_{j=1}^3 \frac{\partial U}{\partial X_j} \frac{\partial X_j}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, 3.$$

Первое слагаемое

$$\left| -\frac{r_0}{r^2} \frac{x_i}{r} U \right| \leq \frac{C}{r^2}, \quad r \rightarrow \infty;$$

второе слагаемое равно

$$\frac{r_0}{r} \left(\frac{r_0^2}{r^2} \frac{\partial U}{\partial X_i} - \frac{2r_0^2}{r^2} \frac{x_i}{r} \sum_{j=1}^3 \frac{x_j}{r} \frac{\partial U}{\partial X_j} \right), \quad i = 1, 2, 3,$$

а его абсолютная величина не превосходит $\frac{C}{r^3}$ при $r \rightarrow \infty$. Это значит, что

$$\frac{\partial u}{\partial x_i} = O\left(\frac{1}{r^2}\right), \quad r \rightarrow \infty, \quad i = 1, 2, 3, \implies \nabla u = O\left(\frac{1}{r^2}\right), \quad r \rightarrow \infty.$$

5.193. У к а з а н и е. В отличие от внутренней задачи Дирихле решение внешней задачи нельзя в общем случае представить потенциалом двойного слоя. В самом деле, решение $u(\mathbf{r})$ — гармоническая функция, равная нулю на бесконечности, может убывать с ростом r как $1/r$ (5.192, п. 3), а потенциал двойного слоя убывает как $1/r^2$. Поэтому решение следует отыскивать в виде суммы

$$u(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{MP^2} ds + \frac{C}{r}.$$

См. также задачу 4.395. Другой способ: внешнюю задачу свести к внутренней посредством преобразования Кельвина.

$$\begin{aligned} &1) \frac{u_0 r_0}{r}; \quad 2) u(r, \theta, \varphi) = u_0 \frac{r_0^3}{r^3} \sin^2 \theta \cos 2\varphi; \\ &3) \frac{u_0 r_0^3}{r^3} \left(\frac{2r_0^2}{5r^2} Y_4^1(\theta, \varphi) + Y_2^1(\theta, \varphi) \right); \quad 4) \frac{u_0 r_0^3}{r^3} \sin 2\theta \cos \varphi. \end{aligned}$$

5.195. $u(r, \theta, \varphi) = r_0 \int_0^r v(\xi, \theta, \varphi) \frac{d\xi}{\xi} + C$, где $v(\xi, \theta, \varphi)$ — решение внутренней задачи Дирихле для шара (задача 5.194) при условии $v(r_0, \theta, \varphi) = f(\theta, \varphi)$.
У к а з а н и е. Свести задачу Неймана к задаче Дирихле для функции $v = \frac{r}{r_0} \frac{\partial u}{\partial r}$.

$$\mathbf{5.196.} \quad 1) u(r, \theta, \varphi) = q_0 r \sin \theta \cos \varphi; \quad 2) u(r, \theta, \varphi) = q_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^n Y_n^m(\theta, \varphi).$$

У к а з а н и е. Либо применить потенциал простого слоя с последующим решением интегрального уравнения задачи 4.395 (т. 1), либо воспользоваться решением предыдущей задачи.

5.197. $u(r, \theta, \varphi) = r_0 \int_r^\infty v(\xi, \theta, \varphi) \frac{d\xi}{\xi}$, где $v(\xi, \theta, \varphi)$ — решение внешней задачи Дирихле для шара (задача 5.193) при условии $v(r_0, \theta, \varphi) = f(\theta, \varphi)$.

У к а з а н и е. Свести задачу Неймана к задаче Дирихле для функции $v = \frac{r}{r_0} \frac{\partial u}{\partial r}$.

$$\mathbf{5.198.} \quad u(r, \theta, \varphi) = \frac{J}{4\pi\sigma r_0} \ln \frac{r_0 + r \cos \theta + \sqrt{r^2 + r_0^2 + 2rr_0 \cos \theta}}{r_0 - r \cos \theta + \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \theta}} + \\ + \frac{J}{2\pi\sigma r_0} \left(\frac{r_0}{\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \theta}} - \frac{r_0}{\sqrt{r^2 + r_0^2 + 2rr_0 \cos \theta}} \right) + C.$$

$$\mathbf{5.199.} \quad 1) u(r, \theta, \varphi) = \frac{q_0 r_0^2}{r}; \quad 2) u(r, \theta, \varphi) = \frac{q_0 r_0}{n+1} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{n+1} Y_n^m(\theta, \varphi).$$

У к а з а н и е. Либо применить потенциал простого слоя с последующим решением интегрального уравнения задачи 4.391 (т. 1), либо воспользоваться решением задачи 5.197.

$$\mathbf{5.200.} \quad u(r, \theta, \varphi) = r_0 h \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^{m=n} \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \frac{f_{mn} Y_n^m(\theta, \varphi)}{n + hr_0}, \quad u(r, \theta, \varphi) = \frac{u_0 h r^n Y_n^m(\theta, \varphi)}{(n + hr_0) r_0^{n+1}},$$

f_{mn} — коэффициенты разложения функции $f(\theta, \varphi)$ в ряд по сферическим функциям Y_n^m . У к а з а н и е. Решение искать в виде потенциала простого слоя; см. также задачу 4.391.

$$\mathbf{5.201.} \quad u(r, \theta, \varphi) = r_0 h \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^{m=n} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{n+1} \frac{f_{mn} Y_n^m(\theta, \varphi)}{n + 1 + hr_0};$$

$$u(r, \theta, \varphi) = \frac{u_0 h r^{n+2} Y_n^m(\theta, \varphi)}{(n + 1 + hr_0) r^{n+1}}, \quad \text{обозначения те же, что в ответе к предыдущей задаче.}$$

$$\mathbf{5.202.} \quad 1) u(x, y, z) = \frac{u_0}{2} \left(1 + \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right);$$

$$2) u(x, y, z) = \frac{2u_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}};$$

$$3) u(x, y, z) = \frac{u_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{kx - y}{z\sqrt{1 + k^2}};$$

$$4) u(x, y, z) = \frac{u_0}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right);$$

$$5) u(x, y, z) = \frac{u_0}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{b-y}{z} + \operatorname{arctg} \frac{(b-y)x}{z\sqrt{x^2 + (b-y)^2 + z^2}} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{y}{z} + \operatorname{arctg} \frac{yx}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right);$$

$$6) u(x, y, z) = u_0 e^{-z\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \cos(\alpha x + \beta y).$$

$$\mathbf{5.203.} \quad 1) \frac{u_0}{2\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{b-y}{z} + \operatorname{arctg} \frac{(b-y)x}{z\sqrt{x^2 + (b-y)^2 + z^2}} + \operatorname{arctg} \frac{y}{z} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{yx}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right);$$

$$2) \frac{u_0}{2\pi} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{[z^2 + (kx - y)x] \sqrt{k^2 z^2 + (kx - y)^2}}{z \sqrt{[kz^2 + (y - kx)x]^2 + y^2 [(k^2 + 1)z^2 + (kx - y)^2]}} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{kx - y}{z \sqrt{k^2 + 1}} + \operatorname{arctg} \frac{y}{z} + \operatorname{arctg} \frac{xy}{z \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right\};$$

$$3) \frac{u_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{k^2 z^2 + b^2} (kz^2 + bx)}{z \sqrt{(kz^2 + bx)^2 + y^2 ((k^2 + 1)z^2 + b^2)}} \operatorname{arctg} \frac{b}{z \sqrt{k^2 + 1}} + \operatorname{arctg} \left(-\frac{x}{z} \right);$$

$$4) \frac{u_0}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{(a+x)(b-y)}{z \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + z^2}} + \operatorname{arctg} \frac{(a-x)(b-y)}{z \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + z^2}} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{(a-x)(b+y)}{z \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2 + z^2}} + \operatorname{arctg} \frac{(a+x)(b+y)}{z \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + z^2}} \right];$$

$$5) \frac{u_0}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{z^2 + (b-y-kx)^2} (kz^2 + (b-y-kx)(a-x))}{z \sqrt{[kz^2 + (b-y-kx)(a-x)]^2 + y^2 [(k^2 + 1)z^2 + (b-y-kx)^2]}} - \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{z^2 + (b-y-kx)^2} (kz^2 - (b-y-kx)x)}{z \sqrt{[kz^2 - (b-y-kx)x]^2 + (b-y)^2 [(k^2 + 1)z^2 + (b-y-kx)^2]}} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{y(a-x)}{z \sqrt{(a-x)^2 + y^2 + z^2}} + \operatorname{arctg} \frac{xy}{z \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right].$$

$$5.204. \quad u(x, y) = \frac{u_0}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{x}{y} + \operatorname{arctg} \frac{xz}{y \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} - \operatorname{arctg} \frac{y}{x} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{yz}{x \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right].$$

$$5.205. \quad u(x, y) = \frac{u_0}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{a+x}{y} + \operatorname{arctg} \frac{a-x}{y} + \operatorname{arctg} \frac{(a+x)z}{y \sqrt{(a+x)^2 + y^2 + z^2}} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{(a-x)z}{y \sqrt{(a-x)^2 + y^2 + z^2}} \right].$$

$$5.206. \quad u(x, y, z) = \frac{2u_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{xz}{y \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}.$$

$$5.207. \quad u(x, y) = u_1 + \frac{2}{\pi} (u_2 - u_1) \operatorname{arctg} \frac{xy}{z \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}.$$

$$5.208. \quad u(x, y, z) = \frac{u_0}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{(b+y)x}{z \sqrt{x^2 + (b+y)^2 + z^2}} + \operatorname{arctg} \frac{(b-y)x}{z \sqrt{x^2 + (b-y)^2 + z^2}} \right].$$

5.209. Решение (фрагменты). Решением задачи Неймана может служить потенциал простого слоя

$$u(M) = \int_S \frac{\sigma(P)ds}{r_{MP}}, \quad M(x, y, z) \in \Omega, \quad P(\xi, \eta, 0) \in S,$$

лапласиан которого вне S равен нулю. Из свойства (5.4) нормальных производных

$$l\left(\frac{\partial u}{\partial n}\right)_- = \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP} ds}{r_{PM}^2} + 2\pi\sigma(M), \quad M \in S,$$

следует интегральное уравнение Фредгольма второго рода

$$f(M) = \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP} ds}{r_{PM}^2} + 2\pi\sigma(M), \quad M \in S,$$

для неизвестной функции $\sigma(M)$. Если $M \in S$, то $\cos \varphi_{MP} = 0$ (рис. 5.14), так что $\sigma(M) = \frac{f(M)}{2\pi}$. Следовательно, решение задачи

$$u(M) = \frac{1}{2\pi} \int_S \frac{f(P)ds}{r_{MP}},$$

т.е. определяется формулой (5.48). Поскольку плоскость $z = 0$ не является поверхностью Ляпунова, то нужно доказать, что функция $u(M)$ удовлетворяет условиям задачи Неймана.

Доказательство того, что $\Delta u = 0$, проведем так же, как в примере 5.11.

В ходе вывода асимптотики решения при $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \rightarrow \infty$ можно принять (ввиду симметрии интеграла (5.48) по x и y) $y = 0$, а также без ограничения общности считать $\alpha < 1$. При этих условиях

$$r_{MP}^2 = (\xi - x)^2 + \eta^2 + z^2 = \xi^2 - 2\xi x + x^2 + \eta^2 + z^2 = \xi^2 - 2\xi x + \eta^2 + R^2.$$

В новых переменных $\frac{\xi}{R} = s, \frac{\eta}{R} = t, \frac{x}{R} = k, |k| \leq 1$,

$$r_{MP}^2 = R^2(s^2 - 2sk + 1 + t^2) \geq R^2(s^2 - 2|s| + 1 + t^2) = R^2[(|s| - 1)^2 + t^2].$$

Для функции $u(M)$ справедлива оценка

$$\begin{aligned} |u(M)| &\leq \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{Ad\xi d\eta}{\sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z^2} \sqrt{s^2 + t^2}^{1+\alpha}} \leq \\ &\leq \frac{A}{R^\alpha} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{dsdt}{\sqrt{(|s| - 1)^2 + t^2} \sqrt{s^2 + t^2}^{1+\alpha}} = \frac{4A}{R^\alpha} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{dsdt}{\sqrt{(s - 1)^2 + t^2} \sqrt{s^2 + t^2}^{1+\alpha}}. \end{aligned}$$

Так как интеграл сходится во всех особых точках $(s = 1; t = 0)$, $(s = -1; t = 0)$, $(s = \infty; t = \infty)$, то

$$|u(M)| \leq \frac{C}{R^\alpha}, \quad u(M) \rightarrow 0 \quad \text{при } R \rightarrow \infty.$$

С л е д с т в и я

$$\forall z > 0: |u(M)| \leq C, \quad |u_r(M)| \leq C,$$

$$\forall z > 0: u(M) = O\left(\frac{1}{r^\alpha}\right), \quad u_r(M) = O\left(\frac{1}{r^{1+\alpha}}\right), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty. \quad (5.66)$$

Ограниченность и асимптотика $u(M)$ содержатся в последней оценке. Что касается производной, то применим такой же прием, что и в примере 5.11:

$$\begin{aligned} |u_x(M)| &\leq \frac{3}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{|f||\xi - x|d\xi d\eta}{((\xi - x)^2 + \eta^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \\ &= \frac{3A}{2\pi R^{1+\alpha}} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{dsdt}{(s - k)^2 + t^2 + 1 - k^2)(s^2 + t^2)^{\frac{1+\alpha}{2}}} = \frac{C}{R^{1+\alpha}}. \end{aligned}$$

Такие же неравенства получаются для u_y и для u_r . Итак, при фиксированном $z > 0$ функция $u(M)$ ограничена и $u(M) = O\left(\frac{1}{r^{1+\alpha}}\right)$, $r \rightarrow \infty$.

Доказательство единственности решения. Если задача имеет два решения $u_1(M)$ и $u_2(M)$, то $v(M) = u_1(M) - u_2(M)$ ограничена, т. е.

$$|v| = |u_1 - u_2| \leq |u_1| + |u_2| \leq 2A$$

и удовлетворяет условиям

$$\Delta v(M) = 0, \quad M \in \Omega,$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0.$$

Далее вводится четное продолжение $V(x, y, z)$ функции $v(x, y, z)$ на отрицательные значения z

$$V(x, y, z) = \begin{cases} v(x, y, z), & z \geq 0, \\ v(x, y, -z), & z \leq 0. \end{cases}$$

Производная $W = \frac{\partial V}{\partial z}$ — нечетная непрерывная функция, так как

$$W(x, y, -z) = \frac{\partial V(x, y, -z)}{\partial z} = -\frac{\partial V(x, y, z)}{\partial z} = -W(x, y, z),$$

$$W(x, y, +0) = \frac{\partial V}{\partial z} \Big|_{z=+0} = \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=+0} = 0,$$

и при $z \geq 0$ удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\Delta W = \Delta \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{\partial \Delta V}{\partial z} = 0.$$

Таким образом, W — нечетное продолжение гармонической функции, равной нулю при $z = 0$, следовательно, W — гармоническая функция во всем пространстве (см. замечание 1 в конце примера 5.10). Функция

$$\Phi(x, y, z) = \int_z^{z+r_0} \frac{\partial V(x, y, \zeta)}{\partial \zeta} d\zeta = V(x, y, \zeta + r_0) - V(x, y, \zeta), \quad r_0 > 0,$$

гармоническая во всем пространстве. Действительно,

$$\begin{aligned} \Delta \Phi &= \Delta \int_z^{z+r_0} \frac{\partial V}{\partial \zeta} d\zeta = \int_z^{z+r_0} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) d\zeta + V_{zz}(x, y, \zeta + r_0) - V_{zz}(x, y, \zeta) = \\ &= \int_z^{z+r_0} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(-\frac{\partial^2 V}{\partial \zeta^2} \right) d\zeta + V_{zz}(x, y, \zeta + r_0) - V_{zz}(x, y, \zeta) = \\ &= -V_{zz}(x, y, \zeta + r_0) + V_{zz}(x, y, \zeta) + V_{zz}(x, y, \zeta + r_0) - V_{zz}(x, y, \zeta) = 0. \end{aligned}$$

В шаре B с центром на плоскости $z = 0$, радиус которого r_0 , функция

$$V(x, y, z) = V(x, y, z + r_0) - \Phi(x, y, z)$$

будет гармонической, так как $V(x, y, z + r_0) = v(x, y, z + r_0)$ и $\Phi(x, y, z)$ — гармонические функции в этом шаре и ввиду произвольности r_0 функция V — гармоническая в $\mathbb{R}^3$. Из неравенства

$$|V(x, y, -z)| = |V(x, y, z)| = |v(x, y, z)| \leq 2A, \quad \text{где } z \geq 0,$$

следует, что функция V ограничена в $\mathbb{R}^3$ и по теореме Лиувилля $V(x, y, z) = C$. Поскольку

$$\lim_{\substack{M \rightarrow M \\ M \in \Omega}} V(M) = \lim_{\substack{M \rightarrow M \\ M \in \Omega}} v(M) = 0,$$

то $C = 0$ и $u_1 = u_2$.

Если $f(x, y) = A\delta(x)\delta(y)$, то можно прибегнуть к эквивалентной постановке задачи Неймана

$$\Delta u = -A\delta(\mathbf{r}), \quad z > 0, \quad u(\mathbf{r}) \xrightarrow{r \rightarrow \infty} 0, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Четное продолжение функции $u(\mathbf{r})$ на все пространство — решение задачи

$$\Delta u = -2A\delta(\mathbf{r}), \quad u(\mathbf{r}) \xrightarrow{r \rightarrow \infty} 0, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2},$$

откуда (см. задачу 10.247, п. 2)

$$u(x, y, z) = \frac{A}{2\pi r}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad z > 0,$$

что непосредственно следует из (5.48).

З а м е ч а н и е 1. Четное продолжение гармонической в полупространстве $z > 0$ функции, нормальная производная которой равна нулю при $z = 0$, — гармоническая функция во всем пространстве.

З а м е ч а н и е 2. Свойства 1, 2, 4, потенциала простого слоя, приведенные в начале главы, сохраняются и для полупространства.

$$\mathbf{5.210.} \quad u_{1,2}(x, y, z) = \frac{J}{2\pi\sigma_0} \left(\frac{1}{\sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2}} \mp \frac{1}{\sqrt{(x+a)^2 + y^2 + z^2}} \right).$$

$$\mathbf{5.211.} \quad \mathbf{j} = -\sigma_0 \nabla u, \quad u(x, y, z) = \frac{I}{4\pi l \sigma_0} \ln \frac{\sqrt{(l+x)^2 + y^2 + z^2} - x - l}{\sqrt{(l-x)^2 + y^2 + z^2} - x + l}.$$

$$\mathbf{5.212.} \quad \mathbf{j} = -\sigma_0 \nabla u, \quad u(r, z) = \frac{kJ}{\pi\sigma_0\sqrt{rr_0}} K(k), \quad k = 2\sqrt{\frac{rr_0}{(r+r_0)^2 + z^2}}.$$

$$\mathbf{5.213.} \quad v_x(x, y, z) = -\frac{v_0}{2\pi} \ln \left[\frac{\sqrt{(a-x)^2 + (a-y)^2 + z^2} + a - y}{\sqrt{(a-x)^2 + (a+y)^2 + z^2} - a - y} \times \right. \\ \left. \times \frac{\sqrt{(a+x)^2 + (a+y)^2 + z^2} - a - y}{\sqrt{(a+x)^2 + (a-y)^2 + z^2} + a - y} \right],$$

$$v_y(x, y, z) = -\frac{v_0}{2\pi} \ln \left[\frac{\sqrt{(a-x)^2 + (a-y)^2 + z^2} + a - x}{\sqrt{(a+x)^2 + (a-y)^2 + z^2} - a - x} \times \right. \\ \left. \times \frac{\sqrt{(a+x)^2 + (a+y)^2 + z^2} - a - x}{\sqrt{(a-x)^2 + (a+y)^2 + z^2} + a - x} \right],$$

$$v_z(x, y, z) = \frac{v_0}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{(a-x)(a-y)}{z\sqrt{(a-x)^2 + (a-y)^2 + z^2}} + \operatorname{arctg} \frac{(a+x)(a-y)}{z\sqrt{(a+x)^2 + (a-y)^2 + z^2}} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{(a-x)(a+y)}{z\sqrt{(a-x)^2 + (a+y)^2 + z^2}} + \operatorname{arctg} \frac{(a+x)(a+y)}{z\sqrt{(a+x)^2 + (a+y)^2 + z^2}} \right].$$

$$\mathbf{5.214.} \quad u(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(r_0^2 - r^2)f(\psi) d\psi}{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\psi - \varphi)}.$$

Решение. Постановка задачи:

$$\begin{aligned}\Delta u(M) &= 0, \quad M \in B(r_0) \in \mathbb{R}^2, \\ u|_{r=r_0} &= f(M), \quad M \in S = \partial B(r_0), \\ u(M) &\in C^2(B(r_0)) \cap C(\overline{B}(r_0)), \quad f(M) \in C(S).\end{aligned}$$

Функцию $u(M)$ можно отыскивать в виде потенциала двойного слоя

$$u(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM} ds}{r_{MP}}, \quad M \in B(r_0),$$

с неизвестной плотностью $\nu(P)$: при любом выборе $\nu(P) \in C(S)$ функция $u(M)$ удовлетворяет уравнению Лапласа. Согласно свойству (5.13)

$$u_-(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM} ds}{r_{MP}} - \pi \nu(M), \quad M \in S,$$

где

$$u_-(M) = \lim_{\substack{M' \rightarrow M \in S \\ M' \in B(r_0)}} u(M') = f(M);$$

для плотности $\nu(P)$ получается интегральное уравнение Фредгольма второго рода

$$\nu(M) = \frac{1}{\pi} \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM} ds}{r_{MP}} - \frac{1}{\pi} f(M), \quad M \in S.$$

Если учесть, что $r_{MP} = 2r_0 \cos \varphi_{PM}$ (рис. 5.25, а), то интегральное уравнение приводится к уравнению с вырожденным ядром

$$\nu(M) = -\frac{1}{\pi} \int_S \nu(P) ds - \frac{1}{\pi} f(M), \quad M \in S.$$

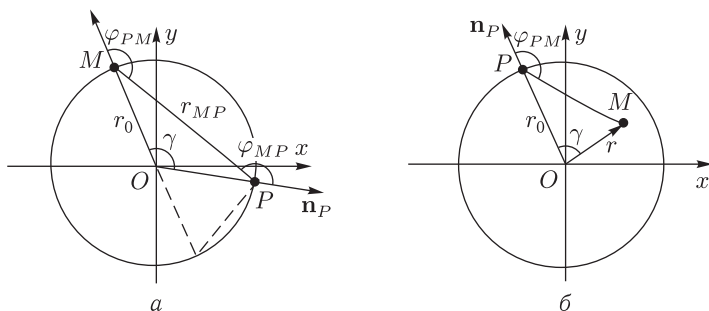


Рис. 5.25

Так как интеграл равен некоторой постоянной C , то интегрирование уравнения по S сводит его к уравнению для C :

$$C = -C - \frac{1}{\pi} \int_S f(P) ds \implies C = -\frac{1}{2\pi} \int_S f(P) ds.$$

Таким образом,

$$\nu(M) = \frac{1}{4\pi r_0^2} \int_S f(P) ds - \frac{1}{\pi} f(M), \quad M \in S.$$

Следовательно, решение задачи Дирихле

$$u(M) = \int_S \left[\frac{1}{4\pi r_0^2} \int_S f(Q) ds - \frac{1}{\pi} f(P) \right] \frac{\cos \varphi_{PM} ds}{r_{MP}} = \\ = \frac{1}{4\pi^2 r_0} \int_S f(Q) ds \int_S \frac{\cos \varphi_{PM} ds}{\cos \varphi_{PM}} - \frac{1}{\pi} \int_S f(P) \frac{\cos \varphi_{PM} ds}{r_{MP}}.$$

Внутренний интеграл в первом слагаемом равен -2π (задача 5.97), так что

$$u(M) = -\frac{1}{2\pi} \int_S f(P) \frac{r_{MP} + 2r_0 \cos \varphi_{PM}}{r_0 r_{MP}} ds.$$

Расстояние r_{MP} между точками $M(r, \varphi)$ и $P(r_0, \psi)$, где $\psi - \varphi = \gamma$, и $\cos \varphi_{PM}$ связаны уравнениями $r_{MP}^2 = r_0^2 + r^2 - 2rr_0 \cos(\psi - \varphi)$, $r^2 = r_0^2 + r_{MP}^2 + 2r_0 r_{MP} \cos \varphi_{PM}$ (см. рис. 5.25, б). Поэтому

$$r_{MP} + 2r_0 \cos \varphi_{PM} = \frac{r_0^2 - r^2}{r_{MP}}, \quad -\frac{r_{MP} + 2r_0 \cos \varphi_{PM}}{r_0 r_{MP}} = \frac{r_0^2 - r^2}{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\psi - \varphi)},$$

что приводит к ответу.

5.215. 1) $u_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^m \sin m\varphi$; $\frac{u_0}{4} \left(\frac{r}{r_0} \cos \varphi - \frac{r^3}{r_0^3} \cos 3\varphi \right)$; 3) $\frac{u_0(25r_0^2 - r^2)}{12(25r_0^2 + r^2 + 10rr_0 \sin \varphi)}$;
4) $\frac{u_0(16r_0^2 - 9r^2)}{7(16r_0^2 + 9r^2 - 24rr_0 \cos \varphi)}$; 5) $u_0 \frac{8rr_0 \sin \varphi + 3(r_0^2 - r^2)}{4(9r_0^2 + r^2 - 6rr_0 \sin \varphi)}$; 6) $\frac{u_0 rr_0 \cos \varphi}{9r_0^2 + 4r^2 + 12rr_0 \sin \varphi}$;
7) $u_0 \frac{2rr_0 \cos \varphi + 15(r_0^2 - r^2)}{25r_0^2 + 9r^2 + 30rr_0 \cos \varphi}$; 8) $\frac{2u_0 rr_0 \sin \varphi}{49r_0^2 + r^2 - 14rr_0 \cos \varphi}$; 9) $\frac{2u_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2rr_0 \sin \varphi}{r_0^2 - r^2}$.

5.216. У к а з а н и е. Применить методику решения задачи 5.192. При доказательстве п. 2 воспользоваться мажорантой $\varepsilon \ln \frac{1}{r_{MP}}$, где ε — любое положительное число ([87], глава IV, § 2, п. 5).

5.217. $u(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(r^2 - r_0^2)f(\psi) d\psi}{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\psi - \varphi)}.$

У к а з а н и е. В отличие от внутренней задачи Дирихле решение $u(\mathbf{r})$ внешней задачи в общем случае не представимо потенциалом двойного слоя, так как решение $u(\mathbf{r})$ на бесконечности может иметь предел, не равный нулю (задача 5.216 п. 3), а потенциал двойного слоя при $r \rightarrow \infty$ стремится к нулю. В связи с этим фактом решение следует отыскивать в виде суммы

$$u(M) = \int_S \frac{\nu(P) \cos \varphi_{PM}}{MP^2} ds + C.$$

См. также задачу т. 1, 4.359, п. 2. Другой способ: внешнюю задачу свести к внутренней посредством преобразования Кельвина.

5.218. 1) $\frac{u_0}{2} \left(\frac{3}{4} + \frac{r_0^2}{r^2} \cos 2\varphi + \frac{1}{4} \frac{r_0^4}{r^4} \cos 4\varphi \right)$; 2) $\frac{u_0(3r^2 - r_0^2)}{3r^2 + r_0^2 + 2\sqrt{3}rr_0 \cos \varphi}$;
3) $\frac{u_0(2r^2 - r_0^2)}{2r^2 + r_0^2 - 2\sqrt{2}rr_0 \sin \varphi}$; 4) $\frac{2u_0 rr_0 \sin \varphi}{5r^2 + r_0^2 + 2\sqrt{5}rr_0 \cos \varphi}$; 5) $\frac{2u_0 rr_0 \cos \varphi}{7r^2 + 3r_0^2 - 2\sqrt{21}rr_0 \sin \varphi}$;
6) $\frac{6u_0 rr_0 \sin \varphi + \sqrt{7}(r^2 - r_0^2)}{3(7r^2 + r_0^2 - 2\sqrt{7}rr_0 \sin \varphi)}$; 7) $\frac{12u_0 rr_0 \cos \varphi - \sqrt{13}(r^2 - r_0^2)}{6(13r^2 + r_0^2 + 2\sqrt{13}rr_0 \cos \varphi)}$; 8) $\frac{u_0}{\pi} \operatorname{arccotg} \frac{2rr_0 \sin \varphi}{r_0^2 - r^2}$.

5.219. $u(r, \varphi) = \frac{J}{2\pi\sigma h} \ln \frac{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \varphi}{r^2 + r_0^2 + 2rr_0 \cos \varphi}.$

$$5.220. \quad u(r, \varphi) = C + \frac{r_0}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\psi) \ln \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\psi - \varphi)}} d\psi.$$

Решение. Потенциал простого слоя удовлетворяет (вне поверхности $S(r_0)$) уравнению Лапласа, следовательно, решение задачи Неймана можно отыскивать в виде

$$u(M) = \int_{S(r_0)} \sigma(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} ds, \quad M \in B(r_0),$$

где $\sigma(P)$ — неизвестная функция. Из свойства (5.11) нормальной производной

$$\left(\frac{\partial u(M)}{\partial n} \right) \Big|_- = \int_S \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP}}{r_{MP}} ds + \pi \sigma(M), \quad M \in S,$$

и из граничного условия $\left(\frac{\partial u(M)}{\partial n} \right) \Big|_- = f(M)$ следует, что $\sigma(P)$ удовлетворяет интегральному уравнению Фредгольма второго рода:

$$\sigma(P) = -\frac{1}{\pi} \int_{S(r_0)} \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP}}{r_{MP}} ds + \frac{1}{\pi} f(M), \quad M \in S(r_0).$$

Так как (рис. 5.13.а) $r_{MP} = 2r_0 \cos(\pi - \varphi_{PM})$, то ядро уравнения упрощается и становится вырожденным, а уравнение принимает форму

$$\sigma(P) = \frac{1}{2\pi r_0} \int_{S(r_0)} \sigma(P) ds + \frac{1}{\pi} f(M), \quad M \in S(r_0),$$

или

$$\sigma(P) = \frac{C}{2\pi r_0} + \frac{1}{\pi} f(M), \quad M \in S(r_0), \quad \text{где } C = \int_{S(r_0)} \sigma(P) ds.$$

Для определения константы C достаточно проинтегрировать полученное уравнение по окружности $S(r_0)$:

$$\int_{S(r_0)} \sigma(P) ds = \frac{C}{2\pi r_0} \int_{S(r_0)} ds + \frac{1}{\pi} \int_{S(r_0)} f(P) ds \implies C = \frac{C 2\pi r_0}{2\pi r_0} + 0.$$

Уравнение для C оказывается тождеством, так что

$$\sigma(M) = \frac{1}{\pi} f(M) + C, \quad \text{где } C — произвольная постоянная.$$

После подстановки $\sigma(M)$ в выражение для потенциала простого слоя решение задачи Неймана принимает вид

$$u(r, \varphi) = r_0 \int_0^{2\pi} \left(\frac{1}{\pi} f(\psi) + C \right) \ln \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\psi - \varphi)}} d\psi,$$

где интеграл от второго слагаемого равен константе (см. окончание примера 5.12).

$$5.221. \quad u(r, \varphi) = \frac{q_0 r^2 \sin 2\varphi}{2Dr_0} + C.$$

$$5.222. \quad 1) \frac{q_0 r_0^2 r \sin \varphi}{2(r^2 + 9r_0^2 - 6rr_0 \cos \varphi)}; \quad 2) \frac{q_0 r_0^2 r \sin \varphi}{3r^2 + 4r_0^2 + 4\sqrt{3}rr_0 \cos \varphi};$$

$$3) \frac{q_0 r_0^2 r \sin \varphi}{7(9r^2 + 16r_0^2 - 24rr_0 \sin \varphi)}; \quad 4) \frac{2q_0 r_0^2 r \cos \varphi}{5(r^2 + 11r_0^2 + 2\sqrt{11}rr_0 \sin \varphi)}.$$

$$5.223. \quad u(r, \varphi) = C - \frac{r_0}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\psi) \ln \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\psi - \varphi)}} d\psi.$$

$$5.224. u(r, \varphi) = \frac{q_0 r_0^2}{kr} \cos \varphi.$$

$$5.225. 1) \frac{q_0 r_0^2 r \sin \varphi}{3(4r^2 + r_0^2 + 6rr_0 \cos \varphi)}; 2) \frac{q_0 r_0^2 r \sin \varphi}{5(6r^2 + r_0^2 - 2\sqrt{6}rr_0 \cos \varphi)};$$

$$3) \frac{q_0 r_0^2 r \cos \varphi}{15(16r^2 + r_0^2 - 8rr_0 \sin \varphi)}; 4) \frac{q_0 r_0^2 r \cos \varphi}{7(8r^2 + r_0^2 + 4\sqrt{2}rr_0 \sin \varphi)}.$$

5.226. У к а з а н и е. См. пример 5.11.

$$5.227. 1) \frac{u_0}{\pi} \operatorname{arctg} \left(-\frac{x}{y} \right); 2) \frac{2u_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{x}{y};$$

$$3) \frac{u_0 l}{\pi k} \left[(|a| - x) \operatorname{arctg} \frac{x}{y} - y \ln \frac{|a|}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right];$$

$$4) \frac{2u_0 l}{\pi k_1} \left[2xy|a| \ln \frac{|a|}{\sqrt{x^2 + y^2}} + x(x^2 + y^2 - a^2) \frac{\pi}{2} + |a|(y^2 - x^2 + a^2) \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right];$$

$$5) \frac{2u_0}{\pi k_1} \left[[(x^2 + y^2)^2 - a^2(x^2 - y^2)] \operatorname{arctg} \frac{x}{y} - \frac{\pi}{2} |a|(x^2 + y^2 - a^2) - xya^2 \ln \frac{a^2}{x^2 + y^2} \right];$$

$$6) \frac{2u_0}{\pi k_1} \left[|a|y(x^2 + y^2 + a^2) \ln \frac{|a|}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{\pi}{2} [(x^2 + y^2)^2 - a^2(x^2 - y^2)] - \right. \\ \left. - |a|x(x^2 + y^2 - a^2) \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right];$$

$$7) \frac{u_0 l^2}{|a| \pi k^2} \left[yk + |a|y(x - |a|) \ln \frac{a^2}{x^2 + y^2} + |a|((x - |a|)^2 - y^2) \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right];$$

$$8) \frac{u_0 l}{\pi k} \left[\left(\frac{2ay^2}{k} - x \right) \operatorname{arctg} \frac{x}{y} - y - \frac{y(x^2 + y^2 - a^2)}{k} \ln \frac{|a|}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right]; 9) \frac{u_0 l x}{x^2 + (y + |a|)^2};$$

$$10) \frac{2u_0 l}{\pi k_2} \left[y(x^2 + y^2 - |a|^2) \ln \frac{a^2}{x^2 + y^2} + x(x^2 + y^2 + a^2) \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right]; 11) u_0 \frac{x^2 + y(y + |a|)}{x^2 + (y + |a|)^2};$$

$$12) \frac{u_0}{\pi k_2} \left[a^2 xy \ln \frac{a^2}{x^2 + y^2} - \frac{\pi}{2} ay(x^2 + y^2 - a^2) + \right. \\ \left. + ((x^2 + y^2)^2 + a^2(x^2 - y^2)) \operatorname{arctg} \left(-\frac{x}{y} \right) \right];$$

$$13) \frac{2u_0}{\pi k_2} \left[a^2 xy \ln \frac{a^2}{x^2 + y^2} + ((x^2 + y^2)^2 + a^2(x^2 - y^2)) \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right]; 14) u_0 e^{-|\alpha|y} \cos \alpha x;$$

$$15) \frac{u_0 l^2}{k_2} [2|a|xye^{-|\alpha a|} + |a|e^{-|\alpha|y}((x^2 - y^2 + a^2) \sin \alpha x - 2xy \cos \alpha x)];$$

$$16) \frac{u_0 l^2}{k_2} [-2|a|xye^{-|\alpha a|} + |a|e^{-|\alpha|y}(x(x^2 + y^2 + a^2) \cos \alpha x + y(x^2 + y^2 - a^2) \sin |\alpha|x)];$$

$$k = (x - |a|)^2 + y^2, k_1 = (x^2 + y^2 + a^2)^2 - 4a^2 x^2, k_2 = (x^2 + y^2 + a^2)^2 - 4a^2 y^2.$$

$$5.228. u(x, y) = u_1 + \frac{2}{\pi} (u_2 - u_1) \operatorname{arctg} \frac{y}{x}.$$

$$5.229. \quad u(x, y) = \frac{u_0}{\pi} \operatorname{arccctg} \frac{(x^2 + y^2)^2 - l^4}{4xy l^2}.$$

$$5.230. \quad u(r, \varphi) = \frac{u_0}{\pi} \operatorname{arccctg} \frac{r^{\frac{\pi}{\alpha}} - l^{\frac{\pi}{\alpha}} \cos \frac{\pi \varphi}{\alpha}}{l^{\frac{\pi}{\alpha}} \sin \frac{\pi \varphi}{\alpha}}.$$

5.231. Р е ш е н и е (фрагменты). Решение задачи Неймана представимо потенциалом простого слоя

$$u(M) = \int_{\Omega} \sigma(P) \ln \frac{1}{r_{MP}} ds$$

с неизвестной плотностью (M), которая удовлетворяет интегральному уравнению Фредгольма второго рода

$$f(P) = \int_{\Omega} \frac{\sigma(P) \cos \varphi_{MP} ds}{r_{MP}} + \pi \sigma(M), \quad M \in S.$$

Отсюда следует формула для $u(M)$, приведенная в формулировке задачи.

Доказательство существования решения проводится так же, как в примере 5.11 и в задаче 5.209: следует убедиться в правомерности вычисления частных производных функции $u(x, y)$ посредством дифференцирования под знаком интеграла, показать, что функция $u(x, y)$ удовлетворяет уравнению Лапласа и граничному условию при $y = 0$. В данном случае следует также проверить выполнение интегрального условия, приведенного в постановке задачи. Так как

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{x}{r} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{y}{r} = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \frac{(x - \xi)x + y^2}{(x - \xi)^2 + y^2} \frac{d\xi}{r},$$

то при $\delta \in (0; \pi)$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \int_{\delta}^{\pi - \delta} \frac{\partial u}{\partial r} r d\varphi = \int_{\delta}^{\pi - \delta} d\varphi \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \frac{(x - \xi)x + y^2}{(x - \xi)^2 + y^2} d\xi.$$

Внутренний интеграл равномерно сходится по $r \in (0; \infty)$. Действительно, на основе неравенства $a^2 + b^2 \geq 2|a||b|$ получается оценка

$$\begin{aligned} \frac{|(\xi - x)x + y^2|}{(x - \xi)^2 + y^2} &\leq \frac{|(\xi - x)||x|}{(x - \xi)^2 + y^2} + \frac{y^2}{(x - \xi)^2 + y^2} \leq \frac{|(\xi - x)||x|}{2|\xi - x|y} + 1 \leq \frac{|x|}{2y} + 1 = \\ &= \frac{r|\cos \varphi|}{2r \sin \varphi} + 1 \leq \frac{1}{2 \sin \delta} + 1. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} \lim_{r \rightarrow \infty} \int_{\delta}^{\pi - \delta} \frac{\partial u}{\partial r} r d\varphi &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{r^2 - \xi r \cos \varphi}{\xi^2 - 2\xi r \cos \varphi + r^2} d\xi = \frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi - \delta} d\varphi \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) d\xi = \\ &= \frac{\pi - 2\delta}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) d\xi. \end{aligned}$$

Отсюда при $\delta \rightarrow 0$ следует, что интегральное соотношение выполняется (рис. 5.26). Интеграл от нормальной производной гармонической функции по замкнутому контуру $L \in \Omega$ равен нулю. Если $u(M)$ — потенциал скоростей ($\mathbf{V} = \nabla u$) идеальной несжимаемой жидкости (плотность $\rho = 1$)

при стационарном течении без источников, то это свойство выражает закон сохранения массы. Поток жидкости через контур L

$$\begin{aligned} \int_L (\mathbf{Vn}) dl &= \int_D \operatorname{div} \mathbf{V} ds = \\ &= \int_D \operatorname{div}(\nabla u) ds = \int_D \Delta u ds = 0, \end{aligned}$$

где D — ограниченная область с границей L . С другой стороны, этот поток

$$\int_L (\mathbf{Vn}) dl = \int_L (\nabla u \mathbf{n}) dl = \int_L \frac{\partial u}{\partial n} ds.$$

Таким образом, количества жидкости, втекающей в область D и вытекающей из D , одинаковы. Интегральное соотношение является предельной формой закона сохранения и представляет собой граничное условие на бесконечности. Единственность решения. Если существуют два решения u_1 и u_2 задачи Неймана, то функция $v = u_1 - u_2$ удовлетворяет условиям

$$\begin{aligned} \Delta(x, y) &= 0, \quad (x, y) \in \Omega, \\ \frac{\partial v}{\partial y} \Big|_{y=0} &= 0, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{\partial v}{\partial r} r d\varphi = 0, \\ v &= O(\ln r), \quad r \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

В области $\Omega/\overline{B}(r_0)$, где r_0 — любое положительное число, функция v представима рядом (см. пример 2.19)

$$v(r, \varphi) = A_0 \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^n (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi).$$

Этот ряд при $r > r_0$ равномерно сходится по r и φ и его можно почленно дифференцировать по r и φ . Интегральное соотношение

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{\partial v}{\partial r} r d\varphi = A_0 \pi = 0$$

выполняется при $A_0 = 0$. Отсюда следует, что v — ограниченная гармоническая функция, производная которой $v_y(x, 0) = 0$. В этом случае (задача 5.209) $v = C$, т. е. $u_1 - u_2 = C$.

З а м е ч а н и е 1. Формула, представляющая решение, применима для $f = A\delta(x)$. Обоснование такое же, как в задаче 5.209.

З а м е ч а н и е 2. Если $u(x, y)$ потенциал физического поля $\mathbf{A} = \alpha \nabla u$, (α — числовой коэффициент), то неоднозначность потенциала, естественная с физической точки зрения, не влияет на величину поля. При отказе от интегрального соотношения задача имеет решения u и $u + C \ln r$, что недопустимо, так как приводит к неоднозначности поля.

5.232. Потенциалы 1) $u(x, y) = \frac{J}{\pi\sigma} \ln \frac{r_2}{r_1}$; 2) $u(x, y) = \frac{J}{\pi\sigma} \ln \frac{1}{r_1 r_2}$,

где $r_1 = \sqrt{(x+a)^2 + y^2}$, $r_2 = \sqrt{(x-a)^2 + y^2}$. Эквипотенциальные поверхности 1) $\frac{r_2}{r_1} = C$, $y \geq 0$; 2) $r_1 r_2 = C$, $y \geq 0$. Поперечное сечение поверхности $\frac{r_2}{r_1} = C$ — окружности (геометрическое место точек, отношение расстояний которых до двух фиксированных точек постоянно); поперечное сечение по-

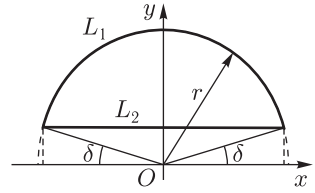


Рис. 5.26

верхности $r_1 r_2 = C$ — лемнискаты (геометрическое место точек, произведение расстояний которых до двух фиксированных точек постоянно).

$$5.233. u(x, y) = \frac{J}{\pi\sigma} \left[\frac{x}{2} \ln \frac{(x+a)^2 + y^2}{(x-a)^2 + y^2} - \frac{a}{2} \ln((x^2 + y^2 + a^2)^2 - 4a^2 x^2) + \right. \\ \left. + (y - 2a) \operatorname{arctg} \frac{x^2 + y^2 - a^2}{2ay} \right].$$

$$5.234. j_x(x, y) = \frac{J}{\pi} \ln \frac{(x^2 + y^2 + a^2)^2 - 4a^2 x^2}{x^2 + y^2},$$

$$j_y(x, y) = -\frac{J}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{(x^2 + y^2)^2 - a^2(x^2 - y^2)}{2a^2|x|y} \operatorname{sign} x.$$

$$5.235. v_x = \frac{v_0}{2\pi} \ln \frac{(x+a)^2 + y^2}{(x-a)^2 + y^2}, \quad v_y = \operatorname{arctg} \frac{x^2 + y^2 - a^2}{2ay}.$$

$$5.236. 1) \frac{f_0 l^3 x}{2|a|(x^2 + (y + |a|)^2)};$$

$$2) -\frac{f_0 l^3}{2\pi a^2 K_1} \left[[(x^2 + y^2)^2 + a^2(x^2 - y^2)] \ln(x^2 + y^2) - a^2(y^2 - x^2 - a^2) \ln a^2 - \right. \\ \left. - 4xya^2 \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right];$$

$$3) \frac{v_0 l^3}{2\pi a^2 K_1} \left[a^2(y^2 - x^2 - a^2) \ln a^2 - ((x^2 + y^2)^2 + a^2(x^2 - y^2)) \ln(x^2 + y^2) - \right. \\ \left. - 4xya^2 \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right];$$

$$4) \frac{v_0 l^2}{\pi} \left[\frac{|a|(a^2 - x^2 + y^2)}{K_2} - \frac{\ln(x^2 + y^2)}{|a|} - \frac{\pi y(x^2 + y^2 + a^2)}{K_2} + \frac{4|a|xy}{K_1} \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right];$$

$$5) -\frac{f_0 l^2}{2\pi|a|[(x - |a|)^2 + y^2]} \left[(x^2 + y^2 - |a|x) \ln(x^2 + y^2) + |a|(|a| - x) \ln a^2 + \right. \\ \left. + 2|a|y \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right].$$

$$K_1 = (x^2 + y^2 - a^2)^2 + 4a^2 x^2, \quad K_2 = (x^2 + y^2 + a^2)^2 - 4a^2 x^2.$$

$$5.237. u(M) = v(M) + u_0(M), \quad \text{где}$$

$$u_0(M) = \begin{cases} -\frac{1}{2\pi} \int_{\Omega} F(p) \ln \frac{1}{r_{MP}} dr, & \Omega \in \mathbb{R}^2, \\ -\frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{F(P)}{r_{MP}} dr, & \Omega \in \mathbb{R}^3, \end{cases}$$

а $v(M)$ — решение краевой задачи

$$\Delta v(M) = 0, \quad M \in \Omega,$$

$$\left(\alpha v + \beta \frac{\partial v}{\partial n} \right) \Big|_S = f - \left(\alpha u_0 + \beta \frac{\partial u_0}{\partial n} \right) \Big|_S.$$

$$5.238. \mathbf{j} = -\nabla u, \quad u(r, \varphi) = \frac{J}{2\pi\sigma} \ln \frac{1}{r} + \frac{Jr^2}{4\pi\sigma r_0^2} \cos 2\varphi + C.$$

У к а з а н и е. См. задачу 1.435.

$$5.239. u(r, \varphi) = -2p \left(\frac{1}{r} - \frac{r}{r_0^2} \right) \cos \varphi + C, \quad \sigma(\varphi) = \frac{p \cos \varphi}{\pi r_0^2}.$$

$$5.240. u(r, \theta, \varphi) = \frac{Q_0}{4\pi k r} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} P_2(\cos \theta) \right) + C.$$

У к а з а н и е. См. задачу 1.222.

$$5.241. u(r, \varphi) = -p \left(\frac{1}{r^2} - \frac{r}{r_0^3} \right) \cos \theta + C, \quad \sigma(\theta) = \frac{3p \cos \theta}{\pi r_0^3}.$$

$$5.242. \sigma(M) = \frac{E_n(M)}{2\pi} + \frac{u_E(0) - u_E(M)}{4\pi r_0} + \frac{Q_0}{4\pi r_0^2}.$$

$$5.243. \sigma(\theta) = \frac{3E_0 \cos \theta}{4\pi}.$$

$$5.244. \sigma(\theta) = \frac{Q_0}{4\pi r_0^2} + \frac{3E_0 \cos \theta}{4\pi}.$$

$$5.245. \sigma(\theta) = -\frac{Q}{4\pi r_0} \frac{d^2 - r_0^2}{(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \theta)^{\frac{3}{2}}}.$$

$$5.246. \sigma(\theta) = \frac{Q}{4\pi r_0 d} \left[1 - \frac{d(d^2 - r_0^2)}{(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \theta)^{\frac{3}{2}}} \right] + \frac{Q_0}{4\pi r_0^2}.$$

$$5.247. 1) \sigma_0(\theta) = \frac{P}{4\pi r_0} \frac{d^3 - 5dr_0^2 + r_0^2(d^2 + 3r_0^2) \cos \theta}{(d^2 + r_0^2 - 2dr_0 \cos \theta)^{\frac{5}{2}}};$$

$$2) \sigma(\theta) = \sigma_0(\theta) + \frac{Q_0}{4\pi r_0^2} - \frac{P}{4\pi r_0 d^2}.$$

$$5.248. 1) \sigma_0(\theta, \varphi) = -\frac{3P(d^2 - r_0^2) \sin \theta \cos \varphi}{4\pi(d^2 + r_0^2 - 2dr_0 \cos \theta)^{\frac{5}{2}}}; 2) \sigma(\theta, \varphi) = \sigma_0(\theta, \varphi) + \frac{Q}{4\pi r_0^2},$$

точка M на оси Oz , вектор $\mathbf{P}$ параллелен оси Ox .

$$5.249. \sigma(\theta, \varphi) = \frac{q}{\pi} \frac{(r_0 \sin \theta - d \cos \varphi) \sin \theta}{d^2 + r_0^2 \sin^2 \theta - 2r_0 d \sin \theta \cos \varphi} - \\ - \frac{q}{2\pi r_0} \ln \frac{d}{\sqrt{d^2 + r_0^2 \sin^2 \theta - 2r_0 d \sin \theta \cos \varphi}} + \frac{Q}{4\pi r_0^2},$$

нить расположена в плоскости xOz параллельно оси Oz .

5.250. Р е ш е н и е. Пусть $u_1(M)$ — потенциал поверхности S_1 , $u_2(M)$ — потенциал поверхности S_2 , т.е.

$$u_1(M) = \int_{S_1} \frac{\sigma_1(P) ds}{r_{MP}}, \quad u_2(M) = \int_{S_2} \frac{\sigma_2(P) ds}{r_{MP}},$$

тогда $u_\sigma(M) = u_1(M) + u_2(M)$ — потенциал поля индуцированных зарядов. Пусть S_δ — поверхность, полученная смещением каждой точки $M \in S$ на расстояние δ в направлении внешней нормали к S в точке M (рис. 5.27). Сумма

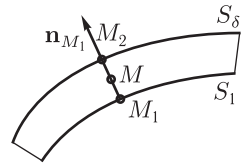


Рис. 5.27

$$E_n(M) - \left(\frac{\partial u_1(M_1)}{\partial n} \right)_+ - \left(\frac{\partial u_2(M_2)}{\partial n} \right)_-,$$

где индекс 2 относится к S_δ , $E_n(M)$ — проекция поля $\mathbf{E}(M)$ на нормаль $\mathbf{n}$ к S_1 в точке M_1 , при $\delta \rightarrow 0$ становится равной нормальной компоненте результирующего поля, которое в проводнике равно нулю. Следовательно,

$$E_n(M) - \int_S \frac{\sigma_1(P) \cos \varphi_{MP} ds}{r_{MP}^2} + 2\pi \sigma_1(M) - \int_S \frac{\sigma_2(P) \cos \varphi_{MP} ds}{r_{MP}^2} + 2\pi \sigma_2(M) = 0, \quad M \in S,$$

что равносильно уравнению (5.52). Уравнение (5.51) следуют из факта, что потенциал результирующего поля равен сумме потенциалов u_E и u_σ .

5.251. У к а з а н и е. Воспользоваться уравнениями (5.51), (5.52).

$$\mathbf{5.252.} \quad \sigma(M) = -\frac{E_n(M)}{2\pi} + \frac{u_E(M)}{4\pi r_0}.$$

$$\mathbf{5.253.} \quad \sigma(\theta) = \frac{Q}{4\pi r_0} \frac{d^2 - r_0^2}{(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \theta)^{\frac{3}{2}}}.$$

$$\mathbf{5.254.} \quad \sigma(\theta) = \frac{P}{4\pi r_0} \frac{d^3 - 5dr_0^2 + r_0^2(d^2 + 3r_0^2) \cos \theta}{(d^2 + r_0^2 - 2dr_0 \cos \theta)^{\frac{5}{2}}}.$$

$$\mathbf{5.255.} \quad \sigma(\theta, \varphi) = \frac{3P(d^2 - r_0^2) \sin \theta \cos \varphi}{4\pi(d^2 + r_0^2 - 2dr_0 \cos \theta)^{\frac{5}{2}}}.$$

$$\mathbf{5.256.} \quad \sigma(M) = -\frac{E_n(M)}{2\pi} + \frac{u_E(M)}{4\pi r_0} + \frac{Q + Q_0}{4\pi r_0^2}.$$

$$\mathbf{5.257.} \quad \sigma(\theta) = \frac{Q}{4\pi r_0 d} \left[1 - \frac{d(d^2 - r_0^2)}{(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \theta)^{\frac{3}{2}}} \right] + \frac{Q_0}{4\pi r_0^2}.$$

$$\mathbf{5.258.} \quad 1) \sigma_0(\theta) = \frac{P}{4\pi r_0} \frac{d^3 - 5dr_0^2 + r_0^2(d^2 + 3r_0^2) \cos \theta}{(d^2 + r_0^2 - 2dr_0 \cos \theta)^{\frac{5}{2}}} + \frac{Q_0}{4\pi r_0^2}.$$

$$\mathbf{5.259.} \quad 1) \sigma_0(\theta, \varphi) = \frac{3P(d^2 - r_0^2) \sin \theta \cos \varphi}{4\pi(d^2 + r_0^2 - 2dr_0 \cos \theta)^{\frac{5}{2}}} + \frac{Q_0}{4\pi r_0^2}, \quad \text{точка } M \text{ на оси } Oz,$$

вектор $\mathbf{p}$ параллелен оси Ox .

$$\mathbf{5.260.} \quad \sigma(M) = \frac{E_n(M)}{2\pi}.$$

$$\mathbf{5.261.} \quad \sigma(M) = -\frac{Qh}{2\pi(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

$$\mathbf{5.262.} \quad 1) \sigma(x, y) = -\frac{q}{2\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + l_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + l_2^2}} \right);$$

$$2) \sigma(x, y) = -\frac{ql_2}{2\pi(y^2 + l_2^2)} \left(\frac{l_1 - x}{\sqrt{(l_1 - x)^2 + y^2 + l_2^2}} + \frac{l_1 + x}{\sqrt{(l_1 + x)^2 + y^2 + l_2^2}} \right).$$

$$\mathbf{5.263.} \quad \sigma(x, y) = -\frac{3Phx}{2\pi(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{5}{2}}}.$$

5.264. Р е ш е н и е. Математической моделью задачи служат уравнения (5.51) и (5.52). Пусть точки M и P принадлежат S , их полярные координаты (R, ψ) и (r, φ) соответственно. Принимая во внимание, что потенциал не зависит от φ , можно считать $\varphi = 0$, тогда расстояние между точками M и P будет равно $r_{MP} = \sqrt{r^2 + R^2 - 2rR \cos \psi}$, а уравнение (5.51) примет форму

$$\int_0^{r_0} \sigma(R) R dR \int_0^{2\pi} \frac{d\psi}{\sqrt{r^2 + R^2 - 2rR \cos \psi}} = u - u_E(r), \quad 0 \leq 0 \leq r_0.$$

Замена $\psi = \theta - \psi$ во внутреннем интеграле I преобразует его к виду

$$I = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{d\theta}{\sqrt{r^2 + R^2 + 2rR \cos \theta}} = 2 \int_0^{\pi} \frac{d\theta}{\sqrt{r^2 + R^2 + 2rR(1 - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2})}}.$$

В результате подстановки $\theta = 2\varphi$

$$I = 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{(R+r)^2 - 4rR \sin^2 \varphi}} = \frac{4}{r+R} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \frac{4rR}{(r+R)^2} \sin^2 \varphi}} = \frac{4}{R+r} K\left(\frac{2\sqrt{rR}}{R+r}\right),$$

что и требовалось получить. Для преобразования второго уравнения следует учесть, что $\cos \varphi_{MP} = 0$.

$$5.265. \sigma_1(r) = \sigma_1(r) = \frac{Q_0}{4\pi r_0 \sqrt{r_0^2 - r^2}}. \quad C = \frac{2r_0}{\pi}.$$

У к а з а н и е. Воспользоваться решением интегрального уравнения из задачи 4.300, т. 1.

$$5.266. \sigma_{1,2}(r) = -\frac{Qh}{2\pi^2(y^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \left(\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{r_0^2 - r^2}{r_0^2 + r^2}} + \sqrt{\frac{r_0^2 + r^2}{r_0^2 - r^2}} \mp \frac{\pi}{2} \right).$$

У к а з а н и е. Вычисление плотностей сводится к решению интегрального уравнения, рассмотренного в задаче 4.300.

$$5.267. \sigma_1(r) + \sigma_2(r) = \frac{1}{\pi^2} \frac{d}{dr} \int_{r_0}^r \frac{rd\eta}{\sqrt{r^2 - \eta^2}} \cdot \frac{d}{d\eta} \int_{\eta}^{\infty} \frac{\eta u_E(\tau) d\tau}{\tau \sqrt{\tau^2 - \eta^2}},$$

$$\sigma_2(r) + \sigma_1(r) = \frac{E_z(r)}{2\pi}.$$

Р е ш е н и е (фрагменты). Вывод системы интегральных уравнений

$$4 \int_{r_0}^{\infty} \frac{\sigma(R) R dR}{r+R} K\left(\frac{2\sqrt{rR}}{r+R}\right) = u - u_E(r), \quad r_0 \leq r,$$

$$\sigma_2(r) - \sigma_1(r) = \frac{E_z(r)}{2\pi}, \quad r_0 \leq r,$$

проводится так же, как и в задаче 5.264. Заменаи $R = \frac{1}{y}$, $r = \frac{1}{x}$, $r_0 = \frac{1}{x_0}$ первому уравнению полученной системы можно придать форму

$$\int_0^{x_0} \frac{f(y)}{x+y} K\left(\frac{2\sqrt{xy}}{x+y}\right) dy = g(x), \quad 0 \leq x \leq r_0,$$

где $f(x) = \frac{\sigma\left(\frac{1}{y}\right)}{y^2}$, $g(x) = \frac{u - u_E\left(\frac{1}{x}\right)}{4x}$. Решением этого уравнения (см. задачу 4.300) является функция

$$f(x) = -\frac{4}{\pi^2} \frac{d}{dx} \int_x^{x_0} \frac{s ds}{\sqrt{s^2 - x^2}} \cdot \frac{d}{ds} \int_0^s \frac{g(t) dt}{\sqrt{s^2 - t^2}}.$$

Последовательные замены $t = \frac{1}{\tau}$, $s = \frac{1}{\eta}$, $x = \frac{1}{r}$ приводят к ответу.

$$5.268. \sigma_{1,2}(r) = -\frac{Qh}{2\pi^2(h^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \left[\operatorname{arctg} \frac{h}{r_0} \sqrt{\frac{r^2 - r_0^2}{r^2 + h^2}} + \frac{r_0}{h} \sqrt{\frac{r^2 + h^2}{r^2 - r_0^2}} \mp \frac{\pi}{2} \right].$$

5.269. Р е ш е н и е. Система уравнений — частный случай системы (5.51), (5.52). Пусть точки M и P принадлежат S , их сферические координаты (r_0, θ, ψ) и (r_0, θ', φ) соответственно. В силу аксиальной симметрии потенциал не зависит от φ , так что можно принять $\varphi = 0$. В этом случае расстояние между точками M и P равно $r_{MP} = \sqrt{2r_0^2(1 - \cos \gamma)}$, где γ — угол между

векторами $\mathbf{r}_{OM}$ и $\mathbf{r}_{OP}$, а $\cos \gamma = \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos \psi$. Левая часть уравнения (5.51) приобретает форму

$$\frac{r_0}{\sqrt{2}} \int_0^\alpha \sigma(\theta') \sin \theta' d\theta' \int_0^{2\pi} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - \cos \theta \cos \theta' - \sin \theta \sin \theta' \cos \psi}}.$$

Подстановка $\psi = \varphi - \pi$ приводит внутренний интеграл I к виду

$$\begin{aligned} I &= \int_{-\pi}^{\pi} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos \varphi}} = \\ &= 2 \int_0^{\pi} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' (1 - 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2})}}. \end{aligned}$$

После замены $\varphi = 2\chi$ интеграл

$$\begin{aligned} I &= 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\chi}{\sqrt{1 - \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' - \sin \theta \sin \theta' \sin^2 \chi}} = \\ &= 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\chi}{\sqrt{1 - \cos(\theta + \theta') - \sin \theta \sin \theta' \sin^2 \chi}} = \frac{4}{\sqrt{2} \sin \frac{\theta + \theta'}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\chi}{\sqrt{1 - \frac{\sin \theta \sin \theta'}{\sin \frac{\theta + \theta'}{2}}}} = \\ &= \frac{4}{\sqrt{2} \sin \frac{\theta + \theta'}{2}} K \left(\frac{2\sqrt{\sin \theta \sin \theta'}}{\sin \frac{\theta + \theta'}{2}} \right). \end{aligned}$$

Для преобразования уравнения (5.52) нужно применить соотношение $2r_0 \cos \varphi_{PM} = -r_{MP}$ (см. рис. 5.13, а) и воспользоваться уравнением (5.51).

5.270. Плотности заряда удовлетворяют системе линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \sigma_1(\theta) + \sigma_2(\theta) &= -\frac{1}{2\pi^2 r_0 \sin \frac{\theta}{2}} \frac{d}{d\theta} \int_{\theta}^{\alpha} \frac{\operatorname{tg} \frac{s}{2} ds}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \frac{s}{2} - \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2}}} \cdot \frac{d}{ds} \int_0^s \frac{(u - u_E(t)) \operatorname{tg} \frac{t}{2} dt}{\cos \frac{t}{2} \sqrt{\operatorname{tg}^2 \frac{s}{2} - \operatorname{tg}^2 \frac{t}{2}}}, \\ -\sigma_1(\theta) + \sigma_2(\theta) &= \frac{E_z(\theta)}{2\pi} + \frac{u - u_E(\theta)}{4\pi r_0}. \end{aligned}$$

Решение (фрагменты). Чтобы решить уравнение

$$2r_0 \int_0^{\alpha} \frac{\sigma(\theta') \sin \theta'}{\sin \frac{\theta + \theta'}{2}} K \left(\frac{\sqrt{\sin \theta \sin \theta'}}{\sin \frac{\theta + \theta'}{2}} \right) d\theta' = u - u_E(\theta),$$

его нужно перестроить. В результате преобразования подынтегрального выра-

$$\text{жения } \frac{\sigma(\theta') \sin \theta' d\theta'}{\sin \frac{\theta + \theta'}{2}} = \frac{2\sigma(\theta') \sin \frac{\theta'}{2} \cos \frac{\theta'}{2} d\theta'}{\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta'}{2} + \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta'}{2}} = \frac{2\sigma(\theta') \cos \frac{\theta'}{2} \operatorname{tg} \frac{\theta'}{2} d\theta'}{\cos \frac{\theta}{2} \left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + \operatorname{tg} \frac{\theta'}{2} \right)},$$

$$K \left(\frac{\sqrt{\sin \theta \sin \theta'}}{\sin \frac{\theta + \theta'}{2}} \right) = K \left(\frac{\sqrt{4 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta'}{2} \cos \frac{\theta'}{2}}}{\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta'}{2} + \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta'}{2}} \right) = K \left(\frac{2\sqrt{\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \operatorname{tg} \frac{\theta'}{2}}}{\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + \operatorname{tg} \frac{\theta'}{2}} \right)$$

с последующими заменами $x = \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}$, $y = \operatorname{tg} \frac{\theta'}{2}$ оно превращается в

$$\frac{2 \sin(2 \operatorname{arctg} y) y dy}{(x+y)(1+y^2)^{\frac{3}{2}}} \sqrt{1+x^2}.$$

В итоге получается интегральное уравнение

$$\int_0^a \frac{f(y)}{x+y} K\left(\frac{2\sqrt{xy}}{x+y}\right) dy = g(x), \quad f(x) = \frac{8r_0 \sin(2 \operatorname{arctg} y)y}{(1+y^2)^{\frac{3}{2}}},$$

$$g(x) = \frac{u - u_E(2 \operatorname{arctg} x)}{\sqrt{1+x^2}}, \quad a = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

составляющее содержание задачи 4.300. Таким образом,

$$f(x) = -\frac{4}{\pi^2} \frac{d}{dx} \int_x^a \frac{s ds}{\sqrt{s^2 - x^2}} \cdot \frac{d}{ds} \int_0^s \frac{g(t) t dt}{\sqrt{s^2 - t^2}}.$$

Возврат к старым переменным приводит к ответу.

$$\begin{aligned} 5.271. \sigma_{1,2}(\theta) = \frac{E_0}{4\pi^2} & \left[\frac{(3 \cos \theta - 2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}) \cos \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{\sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\theta}{2}}} + \right. \\ & \left. + 3 \cos \theta \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\theta}{2}}}{\cos \frac{\alpha}{2}} \mp \frac{3\pi}{2} \cos \theta \right]. \end{aligned}$$

При $\alpha = \frac{\pi}{2}$ плотность $\sigma(\theta) = \frac{3E_0 \cos \theta}{4\pi}$.

У к а з а н и е. Воспользоваться решением задачи 5.270.

$$5.272. \sigma_{1,2}(\theta) = \frac{Q_0}{4\pi(\alpha + \sin \alpha)r_0^2} \left[\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\theta}{2}}}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{\sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\theta}{2}}} \mp \frac{\pi}{2} \right],$$

$$C = \frac{(\alpha + \sin \alpha)r_0}{\pi}.$$

$$5.273. 1) \sigma_{1,2}(\theta) = -\frac{Q_0}{4\pi r_0^2} \left(\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\theta}{2}}}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{\sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\theta}{2}}} \pm \frac{\pi}{2} \right);$$

$$2) \sigma_{1,2}(\theta) = -\frac{Q}{8\pi^2 r_0^2 \cos \frac{\theta}{2}} \left(\frac{1}{\cos^2 \frac{\theta}{2} \sqrt{\operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2}}} \pm \frac{\pi}{2} \right).$$

У к а з а н и е. Применить решение задачи 5.270.

$$\begin{aligned} 5.274. 1) \sigma_{1,2}(\theta) = -\frac{P}{4\pi^2 r_0^3} & \left[\frac{(3 \cos \theta - 2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}) \cos \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{\sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\theta}{2}}} + \right. \\ & \left. + 3 \cos \theta \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\theta}{2}}}{\cos \frac{\alpha}{2}} \pm \frac{3\pi}{2} \cos \theta \right]; \end{aligned}$$

$$2) \sigma_{1,2}(\theta) = -\frac{P}{16\pi^2 r_0^3 \cos \frac{\theta}{2}} \left(\frac{1}{\cos^2 \frac{\theta}{2} \sqrt{\operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2}}} \pm \frac{3\pi}{2} \right).$$

У к а з а н и е. Воспользоваться решением задачи 5.270.

$$5.276. \sigma(M) = \frac{E_n(M)}{2\pi}.$$

$$5.277. \sigma(\varphi) = \frac{E_0 \cos \varphi}{2\pi}.$$

$$5.278. \sigma(\varphi) = \frac{q_0}{2\pi r_0} + \frac{E_0 \cos \varphi}{2\pi}.$$

$$5.279. \sigma(\varphi) = \frac{E_n}{2\pi} - \frac{q}{2\pi r_0}.$$

$$5.280. \sigma(\varphi) = -\frac{q(d^2 - r_0^2)}{2\pi r_0(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)}.$$

$$5.281. 1) \sigma(\varphi) = \frac{p(r_0^2 + d^2) \cos \varphi - 2r_0 d}{\pi(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2}; 2) \sigma(\varphi) = \frac{p(d^2 - r_0^2) \sin \varphi}{\pi(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2}.$$

$$5.282. \sigma(\varphi) = \frac{E_n}{2\pi} + \frac{q_0}{2\pi r_0}.$$

$$5.283. \sigma(\varphi) = -\frac{q(d^2 - r_0^2)}{2\pi r_0(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)} + \frac{q}{2\pi r_0}.$$

$$5.284. 1) \sigma(\varphi) = \frac{p(r_0^2 + d^2) \cos \varphi - 2r_0 d}{\pi(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2} + \frac{q_0}{2\pi r_0};$$

$$2) \sigma(\varphi) = \frac{p(d^2 - r_0^2) \sin \varphi}{\pi(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2} + \frac{q_0}{2\pi r_0}.$$

$$5.286. \sigma(\varphi) = -\frac{E_n}{2\pi}.$$

$$5.287. \sigma(\varphi) = -\frac{q(r_0^2 - d^2)}{2\pi r_0(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)}.$$

$$5.288. 1) \sigma(\varphi) = -\frac{p(r_0^2 + d^2) \cos \varphi - 2r_0 d}{\pi(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2}; 2) \sigma(\varphi) = -\frac{p(d^2 - r_0^2) \sin \varphi}{\pi(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2}.$$

$$5.289. \sigma(\varphi) = -\frac{E_n}{2\pi} + \frac{2q + q_0}{2\pi r_0}.$$

$$5.290. \sigma(\varphi) = \frac{qd(d - r_0 \cos \varphi)}{\pi r_0(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2} + \frac{q}{2\pi r_0}.$$

$$5.291. 1) \sigma(\varphi) = -\frac{p(r_0^2 + d^2) \cos \varphi - 2r_0 d}{\pi(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2} + \frac{q_0}{2\pi r_0};$$

$$2) \sigma(\varphi) = -\frac{p(d^2 - r_0^2) \sin \varphi}{\pi(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2} + \frac{q_0}{2\pi r_0}.$$

$$5.292. \sigma(x, y) = \frac{E_y(x, y)}{2\pi}.$$

$$5.293. 1) \sigma(x) = -\frac{p}{\pi} \frac{x^2 - h^2}{(x^2 + h^2)^2}; 2) \sigma(x) = -\frac{phx}{\pi(x^2 + h^2)^2}.$$

$$5.294. \sigma_{1,2}(x) = -\frac{q}{2h \operatorname{ch} \frac{\pi x}{h}}.$$

У к а з а н и е. Применить преобразование Фурье.

$$5.295. \sigma_{1,2}(r) = -\frac{2q}{3\pi r} \frac{1}{\left(\frac{r}{d}\right)^{\frac{3}{2}} + \left(\frac{d}{r}\right)^{\frac{3}{2}}}.$$

У к а з а н и е. Применить преобразование Меллина.

$$5.296. \sigma_{1,2}(r) = -\frac{q}{2\pi} \sqrt{\frac{d}{r}} \frac{1}{d+r}.$$

У к а з а н и е. Применить преобразование Меллина (см. задачу 4.300).

Глава 6

МЕТОД ФУНКЦИИ ГРИНА

Этот метод применим к решению линейных задач для уравнения

$$\mathcal{L}u(x) = F(x), \quad x \in \Omega \subset \mathbb{R}^n, \quad (6.1)$$

где

$$\mathcal{L} = \sum_{|\alpha|=0}^m a_\alpha D^\alpha$$

— линейный дифференциальный оператор с постоянными коэффициентами. Суть метода заключается в следующем. Для построения решения уравнения (6.1) в области Ω при нулевых дополнительных условиях (граничных, начальных) используется функция Грина, или функция источника, которая является решением уравнения

$$\mathcal{L}G = \delta(x - \xi) \quad (6.2)$$

в области Ω при тех же дополнительных условиях (если уравнение и дополнительные условия непротиворечивы). Функцию $F(x)$ можно трактовать как плотность источников, тогда $G(x, \xi)$ характеризует влияние единичного источника, помещенного в точку $x = \xi$. Так как $F(x)$ может быть представлена в форме суперпозиции точечных источников как

$$F(x) = \int_{\Omega} F(\xi) \delta(x - \xi) d\xi,$$

то в силу линейности задачи для уравнения (6.1) ее решение

$$u(x) = \int_{\Omega} F(\xi) G(x, \xi) d\xi.$$

Таким образом, решение линейных задач методом функции Грина основано на следующем принципе: результат действия суммы источников равен сумме их действий.

В случае ненулевых дополнительных условий следует осуществить необходимую редукцию, т. е. перейти к задаче с нулевыми условиями.

Проведенные эвристические рассуждения не являются доказательством того, что найденное решение действительно является таковым, т. е. удовлетворяет всем условиям, определяющим задачу: необходимо математическое обоснование этого факта.

Решение широкого класса задач (задачи Коши, смешанных и краевых задач) для линейных уравнений различного типа проводится по единой схеме. 1) *Определение функции Грина*, т. е. формулировка условий, которым она удовлетворяет; если задача состоит в решении уравнения (6.1) в области Ω при заданных дополнительных условиях (необязательно нулевых), то соответствующая функция Грина является решением уравнения (6.2) в той же области при нулевых дополнительных условиях (если такая задача имеет решение). 2) *Построение функции Грина*. 3) *Представление решения* основной задачи с помощью функции Грина.

Аппарат функции Грина является также эффективным средством преобразования задачи для дифференциального уравнения в эквивалентное интегральное уравнение.

Литература к главе 6

1. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: МГУ, Наука, 2004.
2. Владимиров В. С., Жаринов В. В. Уравнения математической физики. — М.: Физматлит, 2003.
3. Будаков Б. Н., Самарский А. А., Тихонов А. Н. Сборник задач по математической физике. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
4. Сборник задач по уравнениям математической физики / под ред. В. С. Владимирова — 4-е изд., стереотип. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

6.1. Задачи для волнового уравнения

Пример 6.1. Построение функции Грина задачи Коши для волнового уравнения. Задаче Коши

$$\begin{aligned} u_{tt} &= a^2 u_{xx} + f(x, t), \quad -\infty < x < \infty, \quad t < \tau, \\ u(x, 0) &= u_0(x), \quad u_t(x, 0) = u_1(x) \end{aligned} \quad (6.3)$$

соответствует функция Грина, которая удовлетворяет условиям

$$\begin{aligned} G_{tt} &= a^2 G_{xx} + \delta(x - \xi) \cdot \delta(t - \tau), \quad -\infty < x < \infty, \quad \tau < t, \\ G|_{t=\tau} &= G_t|_{t=\tau} = 0. \end{aligned} \quad (6.4)$$

Волновой оператор $\partial_t^2 - a^2 \partial_x^2$ инвариантен относительно замены переменных $x - \xi \rightarrow \xi$, $t - \tau \rightarrow \tau$, поэтому задачу (6.4) достаточно решить при $\xi = 0$, $\tau = 0$ и в полученном решении заменить x на $x - \xi$, t — на $t - \tau$. Поскольку скорость распространения возмущения конечна, то для любого t функции G , G_x , G_{xx} равны нулю при достаточно больших значениях $|x|$. При этом условии справедливо преобразование Фурье

$$\tilde{G}(\lambda, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, t) e^{i\lambda x} dx,$$

которое трансформирует задачу (6.4), где $\xi = 0$, $\tau = 0$, в задачу Коши для обыкновенного дифференциального уравнения

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{tt} + a^2 \lambda^2 \tilde{G} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \delta(t), \quad t > 0, \\ \tilde{G}(\lambda, 0) &= \tilde{G}_t(\lambda, 0) = 0. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\tilde{G} = \frac{\sin a\lambda t}{\sqrt{2\pi} a\lambda} \eta(t),$$

следовательно, функция Грина задачи (6.4)

$$G(x - \xi, t - \tau) = \frac{1}{2a} \eta\left(t - \tau - \frac{|x - \xi|}{a}\right). \quad (6.5)$$

Волновое уравнение описывает малые поперечные колебания струны. Если струна возбуждается поперечным ударным импульсом I в точке $x = \xi$ в момент времени $t = \tau$, то правая часть волнового уравнения в задаче (6.3) будет содержать слагаемое $\frac{I}{\rho} \delta(x - \xi) \cdot \delta(t - \tau)$. Следовательно, отклонения точек струны от положения равновесия будут

$$u(x, t) = \frac{I}{\rho} G(x - \xi, t - \tau). \quad (6.6)$$

В этом заключается физический смысл функции источника в данном случае. Исходя из физического смысла функции Грина

задачу для ее определения можно поставить в виде

$$\begin{aligned} G_{tt} &= a^2 G_{xx}, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ G(x, \tau) &= 0, \quad G_t(x, \tau) = \delta(x - \xi). \end{aligned} \quad (6.7)$$

Постановки (6.4) и (6.7) эквивалентны: одна из другой получается с помощью формулы (10.15).

6.1. Построить функцию Грина задачи Коши для уравнения, описывающего потенциал бесконечной линии ($-\infty < x < \infty$) без искажения ($RC = LG$).

6.2. Бесконечная трубка ($-\infty < x < \infty$) заполнена идеальным газом, давление и плотность которого P_0 и ρ_0 соответственно. В момент времени $t = 0$ в сечении $x = 0$ выделилось равномерно по сечению количество Q того же газа. Определить в акустическом приближении потенциал скоростей газа.

6.3. Построить функцию Грина задачи Коши для волнового уравнения $u_{tt} = a^2 \Delta u$: 1) в $\mathbb{R}^2$; 2) в $\mathbb{R}^3$.

6.4. На оси Oz расположены мгновенные источники идеального газа, в результате действия которых с каждой единицы длины оси в момент времени $t = 0$ выделилось количество q_0 газа. Определить в акустическом приближении потенциал скоростей газа, если его равновесные давление и плотность P_0 и ρ_0 соответственно.

6.5. Определить в акустическом приближении потенциал скоростей идеального газа в результате действия точечного источника, выделившего в момент времени $t = 0$ количество Q того же газа; равновесные давление и плотность P_0 и ρ_0 соответственно.

6.6. Неограниченная струна ($-\infty < x < \infty$) получает импульс I в результате поперечного удара в точку $x = 0$. Решить задачу о движении струны, если сопротивление внешней среды пропорционально скорости движения струны (коэффициент пропорциональности α задан).

6.7. Построить функцию Грина задачи Коши для уравнения, описывающего потенциал бесконечной линии с пренебрежимо малой утечкой на единицу длины.

6.8. Построить функцию Грина задачи Коши для уравнения, описывающего потенциал бесконечной линии ($-\infty < x < \infty$) с параметрами R , L , C , G .

6.9. Неограниченная струна $(-\infty < x < \infty)$ получает импульс I в результате поперечного удара в точку $x = 0$. Решить задачу о движении струны, если на нее действуют упругие силы, пропорциональные отклонению точек струны от положения равновесия (коэффициент пропорциональности k , отнесенный к единице длины струны, задан).

6.10. Построить функцию Грина задачи Коши для уравнения

$$u_{tt} = a^2 u_{xx} + k^2 u.$$

6.11. Построить в $\mathbb{R}^2$ функцию Грина задачи Коши для уравнений:

$$1) u_{tt} = a^2 \Delta u - k^2 u; \quad 2) u_{tt} = a^2 \Delta u + k^2 u.$$

6.12. Построить в $\mathbb{R}^3$ функцию Грина задачи Коши для уравнений:

$$1) u_{tt} = a^2 \Delta u - k^2 u; \quad 2) u_{tt} = a^2 \Delta u + k^2 u.$$

6.13. Построить функцию Грина задачи Коши для уравнения малых поперечных колебаний бесконечного упругого стержня.

Пример 6.2. Функция Грина задачи Коши для уравнения колебаний неоднородной струны, плотность которой равна ρ_1 при $x < 0$, ρ_2 при $x > 0$, является решением задачи

$$\begin{aligned} G_{tt} &= \frac{\partial}{\partial x} a^2(x) \frac{\partial G}{\partial x} + \delta(x - \xi) \cdot \delta(t - \tau), \quad -\infty < x < \infty, \quad \tau < t, \\ G|_{x=0} &= G|_{x=+0}, \quad G_x|_{x=0} = G_x|_{x=+0}, \\ G|_{t=\tau} &= G_t|_{t=\tau} = 0, \end{aligned}$$

где

$$a^2(x) = \begin{cases} a_1^2 = \frac{T_0}{\rho_1}, & x < 0, \\ a_2^2 = \frac{T_0}{\rho_2}, & x > 0. \end{cases}$$

Пусть $\xi < 0$; изображение $\tilde{G} = \mathcal{L}[G]$ удовлетворяет условиям

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{xx} - \frac{p^2}{a_1^2} \tilde{G} &= -\frac{1}{a_1^2} \delta(x - \xi), & \tilde{G}_{xx} - \frac{p^2}{a_2^2} \tilde{G} &= 0, \\ x < 0, & & 0 < x, \\ \tilde{G}|_{x=0} &= \tilde{G}|_{x=+0}, & \tilde{G}_x|_{x=0} &= \tilde{G}_x|_{x=+0}. \end{aligned}$$

Ограниченное решение имеет вид

$$\tilde{G} = \begin{cases} A e^{\frac{p}{a_1}x}, & x < \xi, \\ B e^{\frac{p}{a_1}x} + C e^{-\frac{p}{a_1}x}, & \xi < x < 0, \\ D e^{-\frac{p}{a_2}x}, & 0 < x. \end{cases}$$

Из условий при $x = 0$ и $x = \xi$ (см. (10.15)) получается система уравнений для определения коэффициентов A, B, C, D

$$\begin{cases} B + C = D, \\ B - C = \frac{a_1}{a_2}D, \\ A - B = \alpha^2 C, \\ A - B = -\alpha^2 C + \frac{\alpha}{pa_1}, \end{cases}$$

где $\alpha = \exp\left(-\frac{p}{a_1}\xi\right)$. В результате

$$\tilde{G} = \begin{cases} \frac{a_2 - a_1}{2a_1(a_1 + a_2)p} e^{\frac{p}{a_1}(x+\xi)} + \frac{1}{2a_1p} e^{-\frac{p}{a_1}|x+\xi|}, & x < 0, \\ \frac{a_2}{a_1(a_1 + a_2)p} e^{-p\left(\frac{x}{a_2} - \frac{\xi}{a_1}\right)}, & 0 < x. \end{cases}$$

Оригиналом изображения $\tilde{G}(p)$ является функция

$$G(x, \xi, t) = \begin{cases} \frac{a_2 - a_1}{2a_1(a_1 + a_2)} \eta\left(t + \frac{x + \xi}{a_1}\right) + \frac{1}{2a_1} \eta\left(t - \frac{|\xi - x|}{a_1}\right), \\ \frac{a_2}{a_1(a_1 + a_2)} \eta\left(t + \frac{\xi}{a_1} - \frac{x}{a_2}\right), \end{cases} \quad (6.8)$$

где первая строка соответствует положительным значениям x а вторая — отрицательным. Если $\xi > 0$, то функция Грина получается из (6.8) заменами: $1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 1, \xi \rightarrow -\xi, x \rightarrow -x$.

6.14. Построить функцию Грина задачи Коши для уравнения продольных колебаний неоднородного стержня с характеристиками: ρ_1, E_1, S_0 при $x < 0$; ρ_2, E_3, S_0 при $x > 0$.

6.15. Неограниченная струна $(-\infty < x < \infty)$ с шариком в точке $x = 0$ получает импульс $I\mathbf{e}_u$ в результате поперечного удара в точку $x = \xi$. Начальные условия нулевые, масса шарика m . Решить задачу о движении струны.

6.16. В момент времени $t = 0$ в точку $x = \xi \neq 0$ неограниченной линии $(-\infty < x < \infty)$ помещен заряд Q . Определить потенциал линии, если ее параметры $R = G = 0$,

$$L = \begin{cases} L_1, & x < 0, \\ L_2, & 0 < x, \end{cases} \quad C = \begin{cases} C_1, & x < 0, \\ C_2, & 0 < x. \end{cases}$$

Начальные ток и потенциал равны нулю.

Пример 6.3. Решение задачи Коши для неоднородного волнового уравнения. На бесконечную струну $(-\infty < x < \infty)$ с момента $t = 0$ действует поперечная сила, плотность которой $F(x, t)$. Функция $u(x, t)$, характеризующая отклонение точек струны от положения равновесия, является решением задачи

$$u_{tt} = a^2 u_{xx} + \frac{1}{\rho} F(x, t), \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0.$$

Силу $F(x, t)$ можно представить в виде суперпозиции

$$F(x, t) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(\xi, \tau) \delta(x - \xi) \cdot \delta(t - \tau) d\xi d\tau$$

мгновенных точечных импульсов $F(\xi, \tau)$. Каждый такой импульс обуславливает отклонение (см. (6.6))

$$\frac{1}{\rho} F(\xi, \tau) G(x - \xi, t - \tau),$$

а суммарное отклонение

$$u(x, t) = \frac{1}{\rho} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} F(\xi, \tau) G(x - \xi, t - \tau) d\xi.$$

При $t < 0$ функции $F(x, t)$ и $G(x - \xi, t)$ равны нулю, поэтому

$$u(x, t) = \frac{1}{\rho} \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} F(\xi, \tau) G(x - \xi, t - \tau) d\xi, \quad (6.9)$$

где функция Грина определена формулой (6.5). Таким образом,

$$u(x, t) = \frac{1}{2a\rho} \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} F(\xi, \tau) \eta\left(t - \tau - \frac{|x - \xi|}{a}\right) d\xi.$$

Подынтегральная функция не равна нулю, если $t - \tau - \frac{|x - \xi|}{a} > 0$, следовательно,

$$u(x, t) = \frac{1}{2a\rho} \int_0^t d\tau \int_{x-a(t-\tau)}^{x+a(t-\tau)} F(\xi, \tau) d\xi. \quad (6.10)$$

В частном случае поперечной силы $F_0(t)$, приложенной в точке $x = 0$ струны,

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{1}{2a\rho} \int_0^t F_0(\tau) d\tau \int_{x-a(t-\tau)}^{x+a(t-\tau)} \delta(\xi) d\xi = \\ &= \frac{1}{2a\rho} \int_0^{t - \frac{|x|}{a}} F_0(\tau) d\tau \cdot \eta\left(t - \frac{|x|}{a}\right). \end{aligned} \quad (6.11)$$

6.17. На струну $(-\infty < x < \infty)$ с момента $t = 0$ действует поперечная сила $F_0 e^{-\alpha t}$, $\alpha > 0$, приложенная в точке $x = 0$. Решить задачу о движении струны при нулевых начальных условиях. Начертить профиль струны в момент времени $t_0 > 0$. Найти закон движения точки с координатой x_0 и построить соответствующий график.

6.18. На струну $(-\infty < x < \infty)$ с момента $t = 0$ действует поперечная сила $F_0 \sin \omega t$, приложенная в точке $x = 0$. Решить задачу о движении струны при нулевых начальных условиях.

6.19. В точке $x = 0$ неограниченной струны $(-\infty < x < \infty)$ приложена сила $F_0 e_u$, действующая в течение времени от $t = 0$ до $t = t_0 > 0$. Решить задачу о движении струны при нулевых начальных условиях.

6.20. В идеальном газе, равновесные давление и плотность которого P_0 и ρ_0 соответственно, с момента времени $t = 0$ действуют источники того же газа. Определить в акустическом приближении потенциал скоростей газа, если мощность источников в единице объема $q(x, y, t)$.

6.21. Решить предыдущую задачу, если источники газа распределены на прямой: 1) с плотностью $q(t)$; 2) с постоянной плотностью q_0 .

6.22. Решить задачу 6.20, если источники распределены с плотностью $q(t)$ на прямой, движущейся в направлении, перпендикулярном к ней, по закону $\mathbf{r} = \mathbf{v}_0 t$, $0 < v_0 \ll a$.

6.23. Найти в акустическом приближении потенциал скоростей идеального газа, в котором с момента $t = 0$ действуют источники того же газа; мощность источников в единице объема $q(x, y, z, t)$, равновесные давление и плотность газа P_0 и ρ_0 соответственно.

6.24. Решить предыдущую задачу в случае $q = q_0 e^{-\alpha(x^2+y^2+z^2)}$, где $\alpha \geq 0$.

6.25. Решить задачу 6.23 для источников, равномерно распределенных на сфере, радиус которой r_0 , мгновенно выделивших количество Q газа.

6.26. Решить задачу 6.23, если источники распределены на сфере, радиус которой r_0 , и выделяют в единицу времени с единицы площади количество газа: 1) $q(t)$; 2) q_0 .

6.27. Решить задачу 6.23, если в газе действует точечный источник мощности $Q(t)$.

6.28. Решить задачу 6.23, если в газе действует точечный источник мощности $Q(t)$, движущийся по закону $\mathbf{r} = \mathbf{v}_0 t \eta(t)$, где $|\mathbf{v}_0| \ll a$.

6.29. Решить задачу

$$u_{tt} = a^2 u_{xx} - c^2 u + f(x, t), \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0.$$

6.30. К точке $x = 0$ неограниченной струны ($-\infty < x < \infty$) с момента времени $t = 0$ приложена сила $F_0(t) \mathbf{e}_u$. Решить задачу о движении струны при нулевых начальных условиях, если на нее действуют упругие силы, пропорциональные отклонению точек струны от положения равновесия (коэффициент пропорциональности k , отнесенный к единице длины струны, задан).

Пример 6.4. Задача Коши с ненулевыми начальными условиями сводится к задаче, рассмотренной в примере 6.3. Пусть по неоднородной струне (см. пример 6.2) распространяется прямая волна $f(t - x/a_1)$. Функция $u(x, t)$ является решением задачи

$$u_{tt} = \frac{\partial}{\partial x} a^2(x) \frac{\partial u}{\partial x}, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) \equiv u_0(x) = f\left(-\frac{x}{a_1}\right), \quad u_t(x, 0) \equiv u_1(x) = f'\left(-\frac{x}{a_1}\right),$$

где, согласно условию, $f\left(-\frac{x}{a_1}\right) = 0$ при $x > 0$. Переход к обобщенным производным по t (см. (10.15)) приводит к задаче

$$u_{tt} = a^2 u_{xx} + u_0(x) \cdot \delta'(t) + u_1(x) \cdot \delta(t), \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) = u_t(x) = 0.$$

По формуле (6.9)

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} [u_0(\xi) \cdot \delta'(\tau) + u_1(\xi) \cdot \delta(\tau)] G(x, \xi, t - \tau) d\xi = \\ &= \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^0 \left[f\left(-\frac{\xi}{a_1}\right) \delta'(\tau) + f'\left(-\frac{\xi}{a_1}\right) \delta(\tau) \right] G(x, \xi, t - \tau) d\xi = \\ &= \int_{-\infty}^0 \left[f\left(-\frac{\xi}{a_1}\right) G_t(x, \xi, t) + f'\left(-\frac{\xi}{a_1}\right) G(x, \xi, t) \right] d\xi. \end{aligned}$$

После интегрирования по частям второго слагаемого решение принимает вид

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^0 f\left(-\frac{\xi}{a_1}\right) [G_t(x, \xi, t) + a_1 G_\xi(x, \xi, t)] d\xi.$$

При $x < 0$ из выражения (6.8) для функции Грина следует, что

$$\begin{aligned} G_t &= \frac{a_2 - a_1}{2a_1(a_1 + a_2)} \delta\left(t + \frac{x + \xi}{a_1}\right) + \frac{1}{2a_1} \delta\left(t - \frac{|x - \xi|}{a_1}\right), \\ G_\xi &= \frac{a_2 - a_1}{2a_1^2(a_1 + a_2)} \delta\left(t + \frac{x + \xi}{a_1}\right) + \frac{1}{2a_1^2} \delta\left(t - \frac{|x - \xi|}{a_1}\right) \operatorname{sign}(x - \xi). \end{aligned}$$

Так как $1 + \operatorname{sign} x = 2\eta(x)$, то

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{a_2 - a_1}{a_1(a_1 + a_2)} \int_{-\infty}^0 f\left(-\frac{\xi}{a_1}\right) \delta\left(t + \frac{x + \xi}{a_1}\right) d\xi + \\ &\quad + \frac{1}{a_1} \int_{-\infty}^x f\left(-\frac{\xi}{a_1}\right) \delta\left(t + \frac{\xi - x}{a_1}\right) d\xi. \end{aligned}$$

Замена $t + \frac{x + \xi}{a_1} = y$ в первом интеграле, $t + \frac{\xi - x}{a_1} = y$ — во втором дает

$$u(x, t) = f\left(t - \frac{x}{a_1}\right) + \frac{a_2 - a_1}{a_1 + a_2} f\left(t + \frac{x}{a_1}\right) \eta\left(t + \frac{x}{a_1}\right).$$

При $x > 0$

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{2a_2}{a_1(a_1 + a_2)} \int_{-\infty}^0 f\left(-\frac{\xi}{a_1}\right) \delta\left(t + \frac{\xi}{a_1} - \frac{x}{a_2}\right) d\xi = \\ &= \frac{2a_2}{a_1 + a_2} f\left(t - \frac{x}{a_2}\right) \eta\left(t - \frac{x}{a_2}\right). \end{aligned}$$

6.31. Вдоль неоднородного стержня, характеристики которого: ρ_1, E_1, S_0 при $x < 0$; ρ_2, E_2, S_0 при $x > 0$, распространяется продольная волна $f(t + x/a_2)$. Решить задачу о колебаниях стержня. При каком условии отсутствует отраженная волна?

6.32. Решить задачу Коши

$$\begin{aligned} u_{tt} &= a^2 u_{xx} - k^2 u, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) &= u_0(x), \quad u_t(x, 0) = u_1(x). \end{aligned}$$

6.33. Решить задачу Коши

$$\begin{aligned} u_{tt} &= a^2 \Delta u, \quad -\infty < x, y, z < \infty, \quad 0 < t, \\ u|_{t=0} &= u_0(x, y), \quad u_t|_{t=0} = u_1(x, y). \end{aligned}$$

6.34. В момент времени $t = 0$ скорость газа равна нулю, а его плотность $\rho(\mathbf{r}) = \rho_0 \left(1 + \frac{s_0}{1 + x^2 + y^2}\right)$. Найти в акустическом приближении плотность газа на оси Oz , если равновесные давления и плотность P_0 и ρ_0 соответственно.

6.35. Решить задачу Коши

$$\begin{aligned} u_{tt} &= a^2 \Delta u, \quad -\infty < x, y, z < \infty, \quad 0 < t, \\ u|_{t=0} &= u_0(x, y, z), \quad u_t|_{t=0} = u_1(x, y, z). \end{aligned}$$

6.36. Начальная скорость идеального газа равна нулю, а его плотность $\rho(\mathbf{r}, 0) = \rho_0[1 + s_0\eta(r_0 - r)]$, где $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Определить в акустическом приближении плотность газа $\rho(\mathbf{r}, t)$, если равновесные давление и плотность P_0 и ρ_0 соответственно.

6.37. Решить задачу о поперечных колебаниях неограниченного упругого стержня $(-\infty < x < \infty)$, начальные скорости которого равны нулю, а начальные отклонения $u(x, 0) = u_0 \exp\left(-\frac{\alpha x^2}{4a}\right)$, где $\alpha > 0$.

Пример 6.5. Функция Грина волнового уравнения для полуграниченной струны с упруго закрепленным концом является решением задачи

$$\begin{aligned} G_{tt} &= a^2 G_{xx} + \delta(x - \xi) \cdot \delta(t), \quad 0 < x, \quad 0 < t, \\ (G_x - hG)|_{x=0} &= 0, \\ G'|_{t=0} &= G_t|_{t=0} = 0, \end{aligned}$$

т.е. неоднородность в уравнении имеет вид δ -функции, а все остальные условия (граничное и начальные) — нулевые. Изображение $\tilde{G} = \mathcal{L}[G]$ удовлетворяет условиям

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{xx} - \frac{p^2}{a^2} \tilde{G} - \frac{1}{a^2} \delta(x - \xi), \quad 0 < x, \\ (\tilde{G}_x - h\tilde{G})|_{x=0} &= 0. \end{aligned}$$

Ограниченное решение

$$\tilde{G} = \begin{cases} A e^{\frac{px}{a}} + B e^{-\frac{px}{a}}, & 0 < x < \xi, \\ C e^{-\frac{px}{a}}, & \xi < x, \end{cases}$$

содержит константы, которые удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{cases} A(p - ha) - B(p + ha) = 0, \\ A\alpha^2 + B - C = 0, \\ A\alpha^2 - B + C = \frac{\alpha}{pa}, \end{cases}$$

где $\alpha = \exp(p\xi/a)$, вытекающей из условия при $x = 0$ и условий при $x = \xi$ (см. (10.15)): $[\tilde{G}]|_{x=\xi} = 0$, $[\tilde{G}_x]|_{x=\xi} = -\frac{1}{a^2}$. В итоге для изображения получается выражение

$$\tilde{G} = \frac{1}{2pa} e^{-\frac{p}{a}|\xi-x|} + \frac{p-ha}{p+ha} \cdot \frac{1}{2pa} e^{-\frac{p}{a}(\xi+x)},$$

которому соответствует оригинал

$$G(x, \xi, t) = \frac{1}{2a} \eta \left(t - \frac{|\xi - x|}{a} \right) + \frac{1}{a} \left(e^{-ha(t - \frac{\xi+x}{a})} - \frac{1}{2} \right) \eta \left(t - \frac{x + \xi}{a} \right). \quad (6.12)$$

6.38. Построить функцию Грина смешанной задачи для уравнения продольных колебаний полубесконечного упругого стержня ($0 < x$) конец которого: 1) жестко закреплен; 2) свободен.

6.39. Построить функцию Грина смешанной задачи для уравнения продольных колебаний полубесконечного упругого стержня ($0 < x$), на торец которого действует сила сопротивления, пропорциональная скорости (коэффициент пропорциональности α задан).

6.40. Решить задачу о продольных колебаниях упругого полугограниченного стержня ($0 < x$) с сосредоточенной массой m на торце, возбужденных продольным ударным импульсом I в торец стержня.

6.41. Конец линии ($0 < x$) с параметрами L, C ($R = G = 0$) заземлен через конденсатор C_0 . Построить функцию Грина соответствующей смешанной задачи для уравнения, описывающего потенциал.

6.42. Вдоль линии ($0 < x$) с параметрами L, C ($R = G = 0$), конец которой заземлен через конденсатор C_0 , распространяется волна $u(x, t) = f(x + at)$. Определить зависимость заряда конденсатора от времени, если $f(x) = u_0 \sin \frac{\omega}{a} x \cdot \eta(x)$.

6.43. По полугограниченному упругому стержню ($0 < x$) распространяется продольная волна $u(x, t) = f(x + at)$. Найти отраженную волну, если торец стержня: 1) жестко закреплен; 2) свободен.

6.44. Вдоль полугограниченного упругого стержня ($0 < x$), на торец которого действует сила сопротивления, пропорциональная скорости (коэффициент пропорциональности α задан), распространяется продольная волна $u(x, t) = f(x + at)$. Найти отраженную волну.

6.45. В точке $x = x_0 > 0$ полугограниченной струны ($0 < x$) с закрепленным концом действует с момента $t = 0$ поперечная сила $F_0 \sin \omega t \mathbf{e}_u$. Решить задачу о колебаниях струны.

6.46. Построить функцию Грина смешанной задачи для уравнения, описывающего потенциал линии ($0 < x$) без искажения ($RC = LG$) с заземленным концом.

6.47. Построить функцию Грина смешанной задачи для уравнения, описывающего ток в полуограниченной линии ($0 < x$) без утечки с заземленным концом.

6.48. Решить задачу о движении полубесконечной струны ($0 < x$), конец которой движется по закону $\mu(t)$.

6.49. К концу полуограниченного стержня ($0 < x$) прикреплена пружинка с коэффициентом жесткости k . С момента $t = 0$ свободный конец пружинки движется вдоль оси Ox по закону $\mu(t)$. Решить задачу о движении стержня.

6.50. Конец полуограниченной линии ($0 < x$) без утечки подключен к батарее с э.д.с. $E_0\eta(t)$. Найти ток в линии при нулевых начальных условиях.

6.2. Задачи для уравнения теплопроводности

Пример 6.6. Функция Грина задачи Коши для уравнения теплопроводности определяется следующим образом:

$$G_t = a^2 G_{xx} + \delta(x) \cdot \delta(t), \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad 0 < t, \\ G(x, 0) = 0.$$

Преобразование Фурье

$$\tilde{G}(\lambda, t) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \int_{\mathbb{R}^n} G(x, t) e^{-i(\lambda, x)} dx$$

приводит к задаче Коши

$$\tilde{G}_t + a^2 \lambda^2 \tilde{G} = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \delta(t), \quad 0 < t, \\ \tilde{G}(\lambda, 0) = 0,$$

ограниченное решение которой

$$\tilde{G}(\lambda, t) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} e^{-a^2 \lambda^2 t}.$$

Прообраз восстанавливается с помощью формулы обращения:

$$G(x, t) = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{\mathbb{R}^n} e^{i(\lambda, x) - a^2 \lambda^2 t} d\lambda.$$

Интеграл равен произведению однотипных интегралов, каждый из которых вычисляется по формуле (6.63):

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{i \lambda_k x_k - a^2 \lambda_k^2 t} d\lambda_k = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{\pi}{t}} e^{-\frac{x_k^2}{4a^2 t}}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Следовательно,

$$G(x, t) = \frac{1}{(2a\sqrt{\pi t})^n} e^{-\frac{x^2}{4a^2 t}}. \quad (6.13)$$

Как следует из определения, функция Грина представляет собой температуру пространства, обусловленную выделением количества тепла $Q = C\rho$ в точке $x = 0$ в момент времени $t = 0$, если при $t < 0$ температура пространства была равна нулю. Таким образом, в результате выделения тепла температура пространства при $t = 0$ становится равной $\delta(x)$, т. е.

$$G_t = a^2 \Delta G, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad t > 0, \\ G(x, 0) = \delta(x).$$

З а м е ч а н и е. В теории теплопроводности употребляют термин «прямая», понимая под этим неограниченный однородный стержень с теплоизолированной поверхностью.

6.51. Через поверхность тонкого неограниченного стержня происходит теплообмен с внешней средой по закону Ньютона. Построить функцию Грина соответствующей задачи Коши.

6.52. Найти потенциал бесконечной линии $(-\infty < x < \infty)$ с параметрами R, C ($L = G = 0$), в точку $x = \xi$ которой в момент времени $t = \tau$ помещен заряд Q .

6.53. Решить предыдущую задачу для линии с пренебрежимо малой индуктивностью на единицу длины.

6.54. В сечении $x = 0$ тонкой трубки $(-\infty < x < \infty)$ в момент времени $t = 0$ выделилось количество q на единицу площади неустойчивого газа (распад пропорционален концентрации). Определить концентрацию газа в процессе диффузии, если начальная концентрация равна нулю.

6.55. В однородной изотропной среде с коэффициентом диффузии D находится точечный источник, который в момент $t = 0$ выделяет количество Q неустойчивого газа (распад пропорционален концентрации). Определить концентрацию газа в процессе диффузии, если его начальная концентрация равна нулю.

6.56. Построить функцию Грина задачи Коши для уравнения диффузии в среде, движущейся со скоростью v_0 вдоль оси Ox , если концентрация диффундирующего вещества зависит только от x и t .

6.57. В сечении $x = \xi$ бесконечного стержня $(-\infty < x < \infty)$ с характеристиками: ρ_1, C_1, S_0 при $x < 0$; ρ_2, C_2, S_0 , при $x > 0$, в момент времени $t = 0$ выделилось (равномерно по сечению) Q единиц тепла. Найти температуру стержня, если его начальная температура равна нулю; поверхность стержня теплоизолирована.

6.58. В момент времени $t = 0$ в точку $x = \xi \neq 0$ неограниченной линии $(-\infty < x < \infty)$ помещен заряд Q . Определить потенциал линии, если ее параметры $L = G = 0$,

$$R = \begin{cases} R_1, & x < 0, \\ R_2, & 0 < x, \end{cases} \quad C = \begin{cases} C_1, & x < 0, \\ C_2, & 0 < x. \end{cases}$$

Начальный потенциал равен нулю.

6.59. В сечении $x = 0$ бесконечного стержня $(-\infty < x < \infty)$ с теплоизолированной поверхностью имеется сосредоточенная теплоемкость C_0 . В момент времени $t = 0$ в сечении $x = \xi$ выделилось (равномерно по сечению) Q единиц тепла. Определить температуру $u(x, t)$ стержня при $t > 0$, если $u(x, 0) = 0$.

6.60. В сечении $x = \xi \leq 0$ неограниченной трубки $(\infty < x < \infty)$ в момент времени $t = 0$ мгновенно выделилось (равномерно по сечению) количество Q газа. Решить задачу диффузии, если сечение $x = 0$ представляет собой полупроницаемую перегородку; при $t < 0$ газа в трубке не было.

6.61. В момент времени $t = 0$ на цилиндрической поверхности, радиус которой r' , равномерно по поверхности выделилось Q единиц тепла на единицу длины вдоль оси. Найти температуру пространства, если начальная температура равна нулю.

6.62. Определить температуру пространства, обусловленную выделением в момент времени $t = 0$ количества тепла Q , равномерно

распределенного по окружности, радиус которой r' ; до момента $t = 0$ температура пространства была равна нулю.

6.63. Определить температуру пространства, обусловленную выделением в момент времени $t = 0$ количества тепла Q , равномерно распределенного по кругу, радиус которого r' ; до момента $t = 0$ температура пространства была равна нулю.

6.64. В однородной бесконечной среде с поглощением ($\Sigma_c \ll \Sigma_s$) имеется изотропный плоский источник (плоскость $x = 0$), с единицы площади которого мгновенно (в момент времени $t = 0$) выделилось Q_0 моноэнергетических (тепловых) нейтронов. Найти в диффузионном приближении плотность $n(x, t)$ нейтронов, если их скорость v (по абсолютной величине) не меняется в процессе диффузии; начальная концентрация нейтронов равна нулю.

6.65. Решить предыдущую задачу для линейного изотропного источника, расположенного на оси Oz , с единицы длины которого мгновенно выделилось Q_0 моноэнергетических нейтронов.

6.66. Решить задачу 6.64 для точечного изотропного источника, мгновенно выделившего Q_0 моноэнергетических нейтронов.

6.67. В бесконечной однородной среде с поглощением ($\Sigma_c \ll \Sigma_s$) действует плоский изотропный источник (плоскость $x = 0$), испускающий в единицу времени с единицы площади Q_0 быстрых нейтронов с летаргией $u = 0$. Найти в диффузионно-возрастном приближении плотность замедления нейтронов.

6.68. Решить предыдущую задачу для линейного изотропного источника, расположенного на оси Oz , с единицы длины которого в единицу времени испускается Q_0 быстрых нейтронов с летаргией $u = 0$.

6.69. Решить задачу 6.67 для точечного изотропного источника, испускающего в единицу времени Q_0 быстрых нейтронов с летаргией $u = 0$. Найти также средний квадрат расстояния $\overline{r^2}$ между точками, в которых летаргия нейтрона $u = 0$ и $u > 0$.

6.70. Построить функцию Грина задачи Коши для уравнения Шредингера

$$i\hbar \frac{\partial G(x, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta G(x, t), \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n, \quad 0 < t, \\ G(x, 0) = \delta(x).$$

Пример 6.7. Решение задачи Коши для неоднородного уравнения теплопроводности

$$\begin{aligned} u_t &= a^2 \Delta u + f(x, t), \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad t > 0, \\ u(x, 0) &= 0 \end{aligned}$$

можно построить исходя из физического смысла функции Грина. Если источники $f(x, t)$ представить в виде суперпозиции

$$f(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_{\mathbb{R}^n} f(\xi, \tau) \delta(x - \xi) \cdot \delta(t - \tau) d\xi$$

мгновенных точечных источников, то каждый источник обуславливает температуру (см. пример 6.6) $f(\xi, \tau) G(x - \xi, t - \tau)$, а все источники — температуру

$$u(x, t) = \int_0^t d\tau \int_{\mathbb{R}^n} f(\xi, \tau) G(x - \xi, t - \tau) d\xi. \quad (6.14)$$

Пределы интегрирования по t определяются условиями: $f(x, t)$ и $G(x, t)$ равны нулю при $t < 0$.

Пусть в точке $x = 0$ прямой $(-\infty < x < \infty)$ с момента $t = 0$ действует источник постоянной мощности Q , а начальная температура прямой равна нулю. При $t > 0$ согласно формулам (6.14) и (6.13) температура

$$u(x, t) = \frac{Q}{C\rho} \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\xi) G(x - \xi, t - \tau) d\xi = \frac{Qa}{2k\sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-\frac{x^2}{4a^2\tau}} \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}.$$

После замены $x = 2a\sqrt{\tau}y$ и интегрирования по частям получается следующий результат:

$$u(x, t) = \frac{Q}{2k} \left[2a\sqrt{\frac{t}{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4a^2t}} - |x| \operatorname{Erf} \left(\frac{|x|}{2a\sqrt{t}} \right) \right].$$

6.71. В сечении $x = 0$ стержня $(-\infty < x < \infty)$ с теплоизолированной поверхностью с момента $t = 0$ до $t = t_0 > 0$ действует источник тепла мощности Q . Найти температуру стержня, если его начальная температура равна нулю.

6.72. Определить температуру прямой $(-\infty < x < \infty)$, на части $(-l, l)$ которой в момент времени $t = 0$ выделилось Q

равномерно распределенных единиц тепла. Начальная температура прямой равна нулю.

6.73. На участке $(-l, l)$ прямой $(-\infty < x < \infty)$ с момента $t = 0$ действуют источники, линейная плотность которых постоянна и равна q_0 . Определить температуру прямой, если ее начальная температура равна нулю.

6.74. Найти температуру $u(x, t)$ прямой $(-\infty < x < \infty)$, на которой с момента времени $t = 0$ действуют источники тепла плотности $q_0 \exp(-\alpha x^2)$, где $\alpha > 0$, если $u(x, 0) = 0$.

6.75. В пространстве с момента $t = 0$ до $t = t_0 > 0$ действует точечный источник тепла постоянной мощности Q . Найти температуру $u(\mathbf{r}, t)$ пространства при $t > 0$, если $u(\mathbf{r}, 0) = 0$.

6.76. В сечении $x = \xi$ тонкой трубки $(-\infty < x < \infty)$ с момента $t = 0$ действует источник неустойчивого газа (распад пропорционален концентрации) постоянной мощности Q . Найти концентрацию газа в процессе диффузии, если начальная концентрация равна нулю.

6.77. В сечении $x = 0$ неограниченного стержня $(-\infty < x < \infty)$ действует в течение времени от $t = 0$ до $t = t_0 > 0$ источник тепла, мощность которого $Q_0 e^{\alpha t}$, где $\alpha > 0$. Решить задачу теплопроводности, если начальная температура стержня равна нулю, а через его поверхность происходит теплообмен по закону Ньютона со средой нулевой температуры.

6.78. В сечении $x = 0$ неограниченного стержня $(-\infty < x < \infty)$ действует в течение времени от $t = 0$ до $t = t_0 > 0$ источник тепла, мощность которого $Q_0 t/t_0$. Решить задачу теплопроводности, если начальная температура стержня равна нулю, а через его поверхность происходит теплообмен по закону Ньютона со средой нулевой температуры.

6.79. В однородной бесконечной среде с поглощением ($\Sigma_c \ll \Sigma_s$) действует изотропный плоский источник, испускающий в единицу времени с единицы площади плоскости $x = 0$ количество Q_0 моноэнергетических (тепловых) нейтронов. Найти в диффузионном приближении плотность $n(x, t)$ нейтронов, если их скорость v (по абсолютной величине) не меняется в процессе диффузии; начальная концентрация нейтронов равна нулю.

6.80. Точечный источник тепла мощности Q_0 движется вдоль прямой $(-\infty < x < \infty)$ по закону $x = v_0 t$. Найти температуру $u(x, t)$ прямой, если $u(x, 0) = 0$.

6.81. Определить температуру газа, в котором в результате разряда выделилось количество тепла Q , равномерно распределенного по цилиндру, радиус которого r_0 , высота $2l$; начальная температура газа равна нулю.

6.82. В однородной бесконечной среде с поглощением ($\Sigma_c \ll \Sigma_s$) действует изотропный плоский источник (плоскость $x = 0$), испускающий с единицы площади в единицу времени Q_0 быстрых нейтронов с летаргией $u = 0$. Найти в диффузионно-возрастном приближении плотность потока тепловых нейтронов.

6.83. Решить предыдущую задачу для точечного изотропного источника, испускающего в единицу времени Q_0 быстрых нейтронов с летаргией $u = 0$.

Пример 6.8. Задача Коши с ненулевым начальным условием

$$\begin{aligned} u_t &= a^2 \Delta u, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) &= u_0(x) \end{aligned}$$

сводится к эквивалентной задаче

$$\begin{aligned} u_t &= a^2 \Delta u + u_0(x) \cdot \delta(t), \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) &= 0, \end{aligned}$$

решение которой (см. (6.14))

$$u(x, t) = \int_{\mathbb{R}^n} u_0(\xi) G(x - \xi, t) d\xi.$$

Пусть температура стержня ($-\infty < x < \infty$) с теплоизолированной поверхностью в момент $t = 0$ равна $u_0 \frac{x}{l} \eta(l - |x|)$. Тогда при $t > 0$

$$u(x, t) = \frac{u_0}{l} \int_{-l}^l \frac{e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2t}}}{2a\sqrt{\pi t}} \xi d\xi.$$

В результате замены $\xi - x = 2a\sqrt{t}y$ получается ответ:

$$\begin{aligned} u(x, t) = \frac{u_0}{2l} \left[x \left(\operatorname{erf} \frac{l+x}{2a\sqrt{t}} + \operatorname{erf} \frac{l-x}{2a\sqrt{t}} \right) + \right. \\ \left. + 2a\sqrt{\frac{t}{\pi}} \left(e^{-\frac{(l+x)^2}{4a^2t}} - e^{-\frac{(l-x)^2}{4a^2t}} \right) \right]. \end{aligned}$$

6.84. Начальная температура стержня $(-\infty < x < \infty)$ с теплоизолированной поверхностью равна: 1) $\frac{u_0}{1+x^2/l^2}$; 2) $\frac{u_0 l}{x} \sin \frac{x}{l}$. Какова температура сечения $x = 0$ при $t > 0$?

6.85. Начальная температура стержня $(-\infty < x < \infty)$ с теплоизолированной поверхностью равна $\frac{u_0 l \operatorname{sign} x}{\sqrt{x^2 + l^2}}$. Найти плотность теплового потока через сечение $x = 0$.

6.86. Найти потенциал линии $(-\infty < x < \infty)$ с параметрами R, C ($L = G = 0$), если начальный ток равен нулю, а потенциал $u_0 \operatorname{sign} x$.

6.87. Завод сбрасывает химические отходы в небольшую реку, скорость течения которой v . Можно считать, что начальное загрязнение имеет форму слоя $(-h < x < h)$, продольное сечение которого совпадает с поперечным сечением реки; концентрация отходов в слое u_0 , коэффициент диффузии D . Какая степень загрязнения (т.е. концентрация отходов) будет зафиксирована на расстоянии l (вниз по течению) от места сброса $x = 0$ через время t ? Задачу решать в одномерном приближении.

6.88. Определить температуру $u(x, t)$ прямой $(-\infty < x < \infty)$, если $u(x, 0) = u_0 \eta(l - |x|)$. Построить график зависимости температуры от времени в точках $x_1 \in (0, l)$, $x_2 > l$.

6.89. Найти температуру прямой $(-\infty < x < \infty)$, если начальная температура равна $u_0 \left(1 - \frac{|x|}{l}\right) \eta\left(1 - \frac{|x|}{l}\right)$, $l > 0$.

6.90. Определить температуру $u(x, t)$ прямой $(-\infty < x < \infty)$ при $t > 0$, если $u(x, 0) = u_0 \exp(-\alpha|x|)$, $\alpha > 0$. Получить асимптотическое представление зависимости температуры от времени в фиксированной точке при $t \rightarrow \infty$.

6.91. Неограниченный стержень $(-\infty < x < \infty)$ с теплоизолированной поверхностью нагрет до температуры $u_0 \exp(-\alpha x^2)$, где $\alpha > 0$. Как будет изменяться температура стержня со временем?

6.92. Определить температуру стержня $(-\infty < x < \infty)$ с теплоизолированной поверхностью при $t > 0$, если его начальная температура равна $Ax \exp(-\alpha x^2)$, где $\alpha > 0$. Получить асимптотическое представление зависимости температуры в сечении x от времени при $t \rightarrow \infty$.

6.93. Определить температуру $u(x, t)$ прямой $(-\infty < x < \infty)$, если начальная температура $u(x, 0) = u_0 \sin \beta x$.

6.94. Определить температуру $u(x, t)$ прямой $(-\infty < x < \infty)$, если начальная температура $u(x, 0) = u_0 \cos \beta x \exp(-\alpha x^2)$, $\alpha > 0$.

6.95. Найти температуру бесконечного стержня $(-\infty < x < \infty)$, через поверхность которого происходит теплообмен по закону Ньютона со средой нулевой температуры, если начальная температура равна u_1 при $x < 0$, u_2 при $x > 0$.

6.96. Через поверхность стержня $(-\infty < x < \infty)$ происходит теплообмен по закону Ньютона со средой, температура которой постоянна и равна u_0 . Найти температуру $u(x, t)$ стержня при $t > 0$, если $u(x, 0) = u_1 \operatorname{sign} x$.

6.97. Через поверхность тонкого стержня $(-\infty < x < \infty)$ происходит теплообмен по закону Ньютона со средой, температура которой $u_0 \eta(x)$. Решить задачу теплопроводности для стержня, если его начальная температура равна нулю.

6.98. Через поверхность стержня $(-\infty < x < \infty)$ происходит теплообмен по закону Ньютона со средой, температура которой $u_0 e^{-\alpha|x|}$, $\alpha > 0$. Решить задачу теплопроводности для стержня, если его начальная температура равна нулю.

6.99. Решить задачу Коши для уравнения теплопроводности

$$u_t = a^2 u_{xx} - h(u - u_0 \sin \alpha x), \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = 0, \quad \alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n), \quad \alpha x = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i.$$

6.100. Найти температуру стержня $(-\infty < x < \infty)$, характеристики которого: ρ_1, C_1, S_0 при $x < 0$, ρ_2, C_2, S_0 при $x > 0$, если начальная температура $u_0 \eta(x)$; поверхность стержня теплоизолирована.

6.101. Определить концентрацию вещества, диффундирующего в среде, которая движется со скоростью v_0 вдоль оси Ox , если начальная концентрация $u_0(1 - \eta(x))$.

6.102. Тонкая трубка $(-\infty < x < \infty)$, в которой диффундирует газ, движется вдоль оси Ox со скоростью v_0 . Найти концентрацию газа $u(x, t)$ в трубке при $t > 0$, если начальная концентрация $u(x, 0) = u_0 \exp(-\alpha x^2)$ и $\alpha > 0$.

6.103. Начальная температура стержня $(-\infty < x < \infty)$ с характеристиками ρ_1, k_1, C_1, S_0 при $x < 0$, ρ_2, k_2, C_2, S_0 при $x > 0$

равна $u_0 \exp(-\alpha|x|)$, $\alpha > 0$. Найти температуру в сечении $x = 0$. Получить асимптотическое представление зависимости температуры от времени при $t \rightarrow \infty$ в этом сечении.

6.104. В сечении $x = 0$ бесконечного стержня $(-\infty < x < \infty)$ с теплоизолированной поверхностью имеется тонкая прокладка, теплоемкость которой C_0 . Определить температуру $u(0, t)$ прокладки, если при $t = 0$: 1) ее температура равна нулю, а стержня — u_0 ; 2) ее температура — u_0 , а стержня — $u_0\eta(x)$. Получить асимптотическое разложение (до 2-го члена) функции $u(0, t)$ при $t \rightarrow 0$ и $t \rightarrow \infty$.

6.105. Решить задачу Коши

$$u_t = a^2 \Delta u, \quad -\infty < x, y, z < \infty, \quad 0 < t, \\ u|_{t=0} = u_0(x, y, z),$$

если $u_0(x, y, z)$ равна:

$$1) Axye^{-\alpha(x^2+y^2)}, \quad \alpha > 0; \quad 2) u_0e^{-\alpha(x^2+y^2)}, \quad \alpha > 0; \quad 3) u_0 \sin \beta xy.$$

6.106. Решить задачу Коши

$$u_t = a^2 \Delta u, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) = u_0 e^{-(\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i)^2}.$$

6.107. Начальная температура пространства $u_0\eta(r_0 - r)$, где r — расстояние до оси Oz . Найти температуру в точках оси Oz .

6.108. Начальная температура пространства $u_0e^{-\alpha r}$, где $\alpha > 0$, а r — расстояние до оси Oz . Найти температуру в точках оси Oz и получить также асимптотическое представление функции $u(0, t)$ при $t \rightarrow \infty$.

6.109. Определить температуру пространства при $t > 0$, если при $t = 0$ она равна:

$$1) u_0 r^2 e^{-\alpha r^2}; \quad 2) u_0 \cos \alpha r^2; \quad 3) \frac{u_0}{r} (1 - \exp(-\alpha r^2)),$$

где $\alpha > 0, r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

6.110. Решить задачу 3.32, т. 1 методом функции Грина.

6.111. Решить задачу Коши

$$u_t = a^2 \Delta u, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) = u_0 e^{-\alpha x^2}, \quad \alpha > 0.$$

6.112. Определить температуру однородного неограниченного слоя $(-l < x < l, -\infty < y, z < \infty)$, поверхность которого поддерживается при нулевой температуре, а начальная температура: 1) $u_0 \operatorname{sign} x \cos \beta y e^{-\alpha z^2}$, $\alpha > 0$; 2) $u_0 \cos \frac{\pi x}{2l} \sin \beta y z$.

6.113. Поверхность бесконечного бруса с прямоугольным поперечным сечением $(|x| < l_1, |y| < l_2)$ поддерживается при нулевой температуре. Решить задачу теплопроводности для бруса, если его начальная температура $u_0 \operatorname{sign} z$.

6.114. Поверхность неограниченного цилиндра $(r < r_0, 0 \leq \varphi < 2\pi)$ поддерживается при нулевой температуре, а начальная температура равна $u_0(1 - r^2/r_0^2) \eta(l - |z|)$. Решить задачу теплопроводности.

Пример 6.9. В некоторых случаях функцию Грина смешанных задач удастся получить методом изображений. Иллюстрацией может служить построение функции Грина задачи для неоднородного уравнения теплопроводности в двугранном угле $(0 < x, 0 < y, z \in \mathbb{R})$, на грань $y = 0$ которого подается тепловой поток с заданной плотностью, а другая грань имеет определенную температуру; при этом температура, плотность потока и плотность источников не зависят от z . Согласно физическому смыслу функции Грина (см. пример 6.6) она представляет собой температуру внутри угла, обусловленную действием линейного (параллельного оси Oz) источника, с каждой единицы длины которого мгновенно выделилось количество тепла $Q = C\rho$; при этом граничные и начальные условия нулевые. Смешанную задачу можно свести к задаче Коши, функция Грина которой уже найдена (см. (6.13)), поместив вне угла дополнительные источники таким образом, чтобы грань $x = 0$ имела нулевую температуру, а поток через грань $y = 0$ был равен нулю. Для этого наряду с данным источником в точке P следует поместить источники мощности $-Q$ в точках P_1, P_2 и мощности Q в точке P_3 (рис. 6.1). Суммарное действие всех источников определяет функцию Грина смешанной задачи

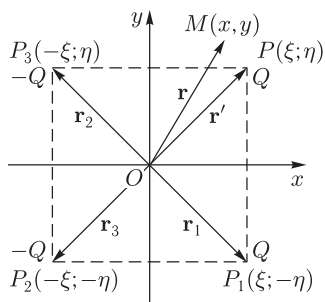


Рис. 6.1

$\tilde{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t) = G(\mathbf{r} - \mathbf{r}', t) + G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1, t) - G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_2, t) - G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_3, t)$, где $G(\mathbf{r} - \mathbf{r}', t)$ имеет вид (6.13) при $n = 2$.

6.115. Торец полуограниченного стержня с теплоизолированной боковой поверхностью: 1) поддерживается при заданной температуре; 2) облучается заданным тепловым потоком. Построить функцию Грина соответствующей смешанной задачи для уравнения теплопроводности.

6.116. Конец полуограниченной линии ($x < 0$) с пренебрежимо малой индуктивностью на единицу длины заземлен. В точку $x = \xi > 0$ помещают заряд Q . Найти потенциал линии.

6.117. В момент времени $t = 0$ на сфере, радиус которой r' , выделилось $Q = C\rho$ единиц тепла, равномерно распределенного по сфере. Найти температуру пространства, если начальная температура равна нулю.

6.118. Шар ($r < r_0$) находится в однородной изотропной среде с характеристиками k , ρ , C , температура которой равна нулю. В момент $t = 0$ на сфере, радиус которой $r' > r_0$, выделилось количество тепла Q , равномерно распределенное по сфере. Определить температуру вне шара, если его поверхность поддерживается при нулевой температуре.

6.119. В поглощающем однородном замедлителе имеется область $\Omega = \{x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 \leq r_0^2\}$, в которой в единицу времени равномерно по объему генерируется Q_0 быстрых нейтронов с летаргией $u = 0$. Найти плотность замедления нейтронов.

6.120. Построить функцию Грина смешанной задачи для неоднородного уравнения в двугранном угле ($0 < x$, $0 < y$, $-\infty < z < \infty$), грани которого поддерживаются при заданной температуре; температура граней, начальная температура и плотность источников не зависят от z .

6.121. Построить функцию Грина смешанной задачи для уравнения теплопроводности в октанте ($0 < x$, $0 < y$, $0 < z$), грани которого имеют заданную температуру.

6.122. Построить функцию Грина смешанной задачи для уравнения теплопроводности на отрезке ($0 < x < l$) с граничными условиями первого типа: 1) методом Фурье; 2) методом изображений.

6.123. Построить функцию Грина смешанной задачи для уравнения теплопроводности на отрезке ($0 < x < l$) с граничными условиями второго типа при $x = 0$ и первого типа при $x = l$: 1) методом Фурье; 2) методом изображений.

6.124. В однородном замедлителе с поглощением ($\Sigma_c \ll \Sigma_s$), занимающем полупространство, действует точечный изотропный источник, испускающий в единицу времени Q_0 быстрых нейтронов с летаргией $u = 0$; координаты источника $x = y = 0, z = a$, где $a > 0$ — расстояние до экстраполированной границы $z = 0$. Найти плотность замедления нейтронов.

6.125. В бесконечном замедлителе с поглощением ($\Sigma_c \ll \Sigma_s$) действует изотропный сферический источник (сфера, радиус которой r'), с единицы площади которого в единицу времени испускается Q_0/S' быстрых нейтронов с летаргией $u = 0$, где S' — площадь сферы. Определить поле замедления нейтронов.

Пример 6.10. Через торец полуограниченного стержня с теплоизолированной боковой поверхностью происходит теплообмен по закону Ньютона с внешней средой. Построить функцию Грина соответствующей смешанной задачи для уравнения теплопроводности.

Функция Грина удовлетворяет условиям

$$\begin{aligned} G_t &= a^2 G_{xx} + \delta(x - \xi) \cdot \delta(t), \quad 0 < x, \quad 0 < t, \\ (G_x - h G)|_{x=0} &= 0, \\ G|_{t=0} &= 0. \end{aligned}$$

Преобразование Лапласа приводит к задаче для $F = \mathcal{L}[G]$:

$$\begin{aligned} F_{xx} - \frac{p}{a^2} F &= -\frac{1}{a^2} \delta(x - \xi), \quad 0 < x, \\ (F_x - h F)|_{x=0} &= 0, \end{aligned}$$

ограниченное решение которой

$$F(x, \xi, p) = \begin{cases} Ae^{\frac{\sqrt{p}}{a}x} + Be^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x}, & 0 \leq x < \xi, \\ Ce^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x}, & \xi \leq x. \end{cases}$$

Коэффициенты A, B, C определяются из условий при $x = 0$ и $x = \xi$ (см. пример 6.5):

$$\begin{cases} A(\sqrt{p} - ha) - B(\sqrt{p} - ha) = 0, \\ C - A\alpha^2 - B = 0, \\ C + A\alpha^2 - B = \frac{\alpha}{a\sqrt{p}}, \end{cases}$$

где $\alpha = \exp(\sqrt{p} \xi/a)$. В результате

$$F(x, \xi, p) = \frac{1}{2a\sqrt{p}} e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}|\xi-x|} + \frac{1}{2a\sqrt{p}} e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}(\xi+x)} - \\ - \frac{h}{\sqrt{p}(\sqrt{p} + ah)} e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}(\xi+x)}.$$

Переход к оригиналу совершается с помощью соответствий (3.49), (3.44):

$$G(x, \xi, t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} \left(e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2 t}} + e^{-\frac{(x+\xi)^2}{4a^2 t}} \right) - \\ - h e^{h(x+\xi)+h^2 a^2 t} \operatorname{Erf} \left(\frac{x+\xi}{2a\sqrt{t}} + ha\sqrt{t} \right). \quad (6.15)$$

6.126. В сечении $x = \xi$ полуограниченной трубки ($0 < x$) в момент времени $t = 0$ выделилось количество Q неустойчивого газа (распад пропорционален концентрации). Определить концентрацию газа в процессе диффузии, если конец трубки закрыт полупроницаемой перегородкой; начальная концентрация газа равна нулю, концентрация газа вне трубки постоянна и равна нулю.

6.127. Построить функцию Грина смешанной задачи для уравнения теплопроводности, описывающего распространение тепла в полуограниченном стержне с сосредоточенной теплоемкостью C_0 на конце при условии теплоизолированности этой системы.

6.128. Конец линии ($0 < x$) с параметрами R, C ($L = G = 0$) заземлен через конденсатор C_0 , начальный заряд которого q_0 . Определить зависимость заряда конденсатора от времени.

6.129. Конец линии ($0 < x$) с параметрами R, C ($L = G = 0$) заземлен через конденсатор C_0 . В момент времени $t = 0$ в точку $x = x_0 > 0$ помещают заряд q_0 . Найти заряд конденсатора $q(t)$. Получить асимптотическое представление функции $q(t)$ при $t \rightarrow 0$ и $t \rightarrow \infty$ и построить ее график.

6.130. Конец полуограниченной линии ($0 < x$) с пренебрежимо малой индуктивностью на единицу длины заземлен через сосредоточенное сопротивление R_0 . В момент времени $t = 0$ в точку $x = x_0 > 0$ линии помещают заряд q_0 . Определить ток через сопротивление.

6.131. Шар, радиус которого r_0 , помещен в однородную изотропную среду с характеристиками k , ρ , C , температура которой равна нулю. В момент $t = 0$ на сфере радиус, радиус которой $r' > r_0$, равномерно по сфере выделилось количество тепла Q . Определить температуру вне шара, если: 1) его поверхность теплоизолирована; 2) шар поддерживается при нулевой температуре, а через его поверхность происходит теплообмен по закону Ньютона.

Пример 6.11. Определить температуру стержня ($0 < x$) с теплоизолированной боковой поверхностью, на конце которого происходит теплообмен по закону Ньютона со средой нулевой температуры, а начальная температура $u_0(x)$. Рассмотреть частный случай $u_0(x) = u_0$.

Для решения задачи

$$\begin{aligned} u_t &= a^2 u_{xx}, \quad 0 < x, \quad 0 < t, \\ u_x(0, t) - hu(0, t) &= 0, \\ u(x, 0) &= u_0(x) \end{aligned}$$

с ненулевым начальным условием ее можно преобразовать посредством обобщенного дифференцирования по t (см. (10.15)) к эквивалентной задаче

$$\begin{aligned} u_t &= a^2 u_{xx} + u_0(x) \cdot \delta(t), \quad 0 < x, \quad 0 < t, \\ u_x(0, t) - hu(0, t) &= 0, \\ u(x, 0) &= 0. \end{aligned}$$

Теперь решение выражается интегралом, аналогичным (6.14),

$$u(x, t) = \int_0^t d\tau \int_0^\infty u_0(\xi) \delta(\tau) G(x, \xi, t - \tau) d\xi = \int_0^\infty u_0(\xi) G(x, \xi, t) d\xi,$$

в котором функция $G(x, \xi, t)$ имеет вид (6.15).

В частном случае

$$\begin{aligned} u(x, t) = u_0 \left[\int_0^\infty \frac{e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2t}}}{2a\sqrt{\pi t}} d\xi + \int_0^\infty \frac{e^{-\frac{(x+\xi)^2}{4a^2t}}}{2a\sqrt{\pi t}} d\xi - \right. \\ \left. - h \int_0^\infty e^{h(x+\xi)+a^2h^2t} \operatorname{Erf} \left(\frac{x+\xi}{2a\sqrt{t}} + ah\sqrt{t} \right) d\xi \right]. \end{aligned}$$

После замены $\xi - x = 2a\sqrt{t}y$ в первом интеграле, $\xi + x = 2a\sqrt{t}y$ — во втором и интегрирования по частям в третьем решение принимает вид

$$u(x, t) = u_0 \left[\operatorname{erf} \frac{x}{2a\sqrt{t}} + e^{hx+a^2h^2t} \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} + ah\sqrt{t} \right) \right].$$

6.132. Начальная концентрация газа в полуограниченной трубке ($0 < x$) равна: 1) $u_0\eta(l-x)$; 2) $u_0\eta(x-l)$; 3) $u_0 \operatorname{sign}(l-x)$. Решить задачу диффузии, если концентрация газа на конце трубки в любой момент времени равна нулю.

6.133. Торцы полубесконечного стержня ($0 < x$) с теплоизолированной боковой поверхностью поддерживаются при нулевой температуре. Определить температуру стержня при $t > 0$, если при $t = 0$ она равна: 1) $u_0 \exp(-\alpha x)$; 2) $u_0 \exp(-\alpha x^2)$, где $\alpha > 0$.

6.134. Найти концентрацию частиц, диффундирующих в полубесконечной трубке ($0 < x$), конец которой закрыт, а начальная концентрация: 1) $u_0\eta(l-x)$; 2) $u_0 \exp(-\alpha x)$, $\alpha > 0$.

6.135. В трубке ($0 < x$) с закрытым концом диффундирует газ, начальная концентрация которого $u_0\eta(x-l)$. Определить концентрацию газа при $t > 0$. Построить график зависимости концентрации от времени при $x = x_1 \in (0, l)$ и $x = x_2 > l$.

6.136. Полубесконечный стержень ($0 < x$) с теплоизолированной поверхностью (включая торец) имеет в момент времени $t = 0$ температуру $u_0 \operatorname{sign}(x-l)$. Определить его температуру при $t > 0$. Построить графики зависимости температуры от времени в сечениях $x = x_1 \in (0, l)$ и $x = x_2 > l$.

6.137. Граница $z = 0$ полупространства ($z > 0$) теплоизолирована, кроме круга, радиус которого r_0 ; через круг поступает тепловой поток постоянной плотности $q_0 \mathbf{e}_z$. Определить температуру полупространства в момент времени $t > 0$, если при $t = 0$ она равна нулю.

6.138. На границе $z = 0$ полупространства ($z > 0$), температура которого равна нулю, находится тонкое однородное кольцо, радиус которого r_0 . С момента $t = 0$ в кольце течет постоянный ток и в полупространство поступает тепловая мощность Q . Решить задачу теплопроводности при условии, что граница $z = 0$ теплоизолирована. Определить также температуру на оси кольца.

6.139. Решить задачу Коши

$$\begin{aligned} u_t &= a^2 \Delta u, \quad -\infty < x, y, z < \infty, \quad 0 < t, \\ u(x, y, z, 0) &= u_0(r), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \end{aligned}$$

где $u_0(r)$ равна: 1) $u_0 \eta(r_0 - r)$; 2) $A r e^{-\alpha r^2}$, $\alpha > 0$.

6.140. Определить температуру пространства, обусловленную мгновенным выделением Q единиц тепла, равномерно распределенного в шаре, радиус которого r_0 , если начальная температура равна нулю.

6.141. В бесконечном замедлителе с поглощением ($\Sigma_c \ll \Sigma_s$) действует точечный изотропный источник, испускающий в единицу времени Q_0 быстрых нейтронов с летаргией $u = 0$. Определить в диффузионно-возрастном приближении плотность потока тепловых нейтронов.

6.142. В однородную изотропную среду помещен шар, радиус которого r_0 . Определить температуру вне шара, если шар поддерживается при нулевой температуре, а начальная температура внешней среды равна u_0 .

6.143. Шар, радиус которого r_0 , помещен в однородную изотропную среду с характеристиками k , ρ , C . Начальная температура внешней среды равна $u_0 \frac{r}{r_0} e^{\alpha(r-r_0)}$, где $\alpha \geq 0$; шар поддерживается при нулевой температуре. Решить задачу теплопроводности. Получить также асимптотическое представление решения $u(r, t)$ при $t \rightarrow \infty$ (r — фиксировано) и при $r \rightarrow \infty$ (t — фиксировано).

6.144. Неустойчивый газ (распад пропорционален концентрации) диффундирует из шара, радиус которого r_0 , во внешнее пространство столь долго, что концентрация газа не зависит от времени, а на поверхности шара она равна u_0 . С момента $t = 0$ концентрация газа на сфере $r = r_0$ становится равной нулю. Решить диффузионную задачу вне шара, считая концентрацию $u(r, t)$ непрерывной функцией при $r \geq r_0$ (граничное условие первого рода).

6.145. В среде с характеристиками k , ρ , C находится шар, радиус которого r_0 ; вне шара действуют тепловые источники, мощность которых в единице объема $\frac{Q}{r} e^{-\alpha r}$, $\alpha \geq 0$. Определить температуру среды при нулевом начальном условии, если шар поддерживается при нулевой температуре.

6.146. Через боковую поверхность полуограниченного стержня ($0 < x$) происходит теплообмен по закону Ньютона со средой, температура которой u_1 . Найти температуру стержня, если его торец поддерживается при нулевой температуре, а начальная температура u_0 .

6.147. В сечении $x = x_0 > 0$ стержня ($0 < x$) с теплоизолированной боковой поверхностью действует источник тепла постоянной мощности Q_0 . Определить температуру $u(x, t)$ стержня при $t > 0$, если $u(x, 0) = 0$, а торец: 1) поддерживается при нулевой температуре; 2) теплоизолирован.

6.148. Найти температуру полупрямой ($0 < x$), на которой находятся тепловые источники плотности $q_0 \exp(-\alpha x)$, $\alpha > 0$; конец полупрямой поддерживается при нулевой температуре, начальная температура равна нулю.

6.149. Грани двугранного угла ($0 < x, 0 < y, -\infty < z < \infty$) поддерживаются при нулевой температуре; найти температуру внутри угла при $t > 0$, если при $t = 0$ она равна u_0 .

6.150. Определить температуру октанта ($0 < x, 0 < y, 0 < z$), грань $x = 0$ которого теплоизолирована, остальные грани имеют нулевую температуру, а начальная температура u_0 .

6.151. В тонкой полуограниченной трубке ($0 < x$) диффундирует газ, источник которого расположен в сечении $x = x_0 > 0$ и имеет постоянную мощность Q ; конец трубки закрыт полупроницаемой перегородкой, начальная концентрация газа равна нулю. Определить поток $q(t)$ газа, выходящего из трубки, и получить асимптотическое разложение (до второго члена включительно) функции $q(t)$ при $t \rightarrow \infty$.

6.152. Шар, радиус которого r_0 , помещен в среду с характеристиками k, ρ, C и поддерживается при нулевой температуре. Найти температуру среды, если ее начальная температура равна u_0 , а через поверхность шара происходит теплообмен по закону Ньютона.

6.153. На конце полуограниченного стержня ($0 < x$) имеется тонкая пластинка, теплоемкость которой C_0 . При условии теплоизоляции этой системы найти: 1) температуру стержня, если начальная температура пластинки равна нулю, а стержня — u_0 ; 2) температуру $u(0, t)$ пластинки, если ее начальная температура равна нулю, а стержня — $u_0 \exp\left(-\frac{\alpha x}{a}\right)$, где $\alpha = \frac{kS}{aC_0}$; получить

асимптотическое представление функции $u(0, t)$ при $t \rightarrow \infty$ и построить ее график.

6.154. Поверхность цилиндра ($r < r_0$, $0 < \varphi \leq 2\pi$, $0 < z$) имеет нулевую температуру, а его начальная температура $u_0 e^{-\alpha z}$, $\alpha \geq 0$. Решить задачу теплопроводности.

Пример 6.12. Решение смешанной задачи с неоднородными граничными условиями можно построить, привлекая эквивалентную задачу с однородными граничными условиями. Иллюстрацией служит следующая задача.

Через торец полуограниченного стержня ($0 < x$) с теплоизолированной боковой поверхностью поступает тепловой поток плотности $q(t)$. Найти температуру стержня $u(x, t)$ при $t > 0$, если $u(x, 0) = 0$. Математическая формулировка этих условий определяет задачу для функции $u(x, t)$:

$$\begin{aligned} u_t &= a^2 u_{xx}, \quad 0 < x, \quad 0 < t, \\ -ku_x(0, t) &= q(t), \quad u(x, 0) = 0. \end{aligned}$$

Чтобы построить решение с помощью функции Грина, следует воспользоваться эквивалентной постановкой (см. задачу 10.269)

$$\begin{aligned} u_t &= a^2 u_{xx} + \frac{a^2}{k} q(t) \cdot \delta(x), \quad 0 < x, \quad 0 < t, \\ u_x(0, t) &= 0, \quad u(x, 0) = 0. \end{aligned}$$

Теперь применима формула, аналогичная (6.14), согласно которой

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{a^2}{k} \int_0^t d\tau \int_0^\infty q(\tau) \delta(\xi) G_2(x, \xi, t - \tau) d\xi = \\ &= \frac{a^2}{k} \int_0^t q(\tau) G_2(x, 0, t - \tau) d\tau, \end{aligned}$$

где $G_2(x, \xi, t)$ имеет вид (6.70). В результате получается ответ:

$$u(x, t) = \frac{a}{k\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{q(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} e^{-\frac{x^2}{4a^2(t-\tau)}} d\tau. \quad (6.16)$$

6.155. Найти температуру полуограниченного стержня ($0 < x$) с теплоизолированной боковой поверхностью, торец которого имеет температуру $\mu(t)$, а начальная температура равна нулю.

6.156. Найти температуру полупрямой ($0 < x$), конец которой поддерживается при постоянной температуре u_0 , а начальная температура равна нулю.

6.157. Определить магнитное поле в однородном полупространстве ($0 < z$) с магнитной проницаемостью μ и большой проводимостью (токами смещения можно пренебречь), обусловленное включением в момент времени $t = 0$ в полупространстве ($z < 0$), магнитного поля, параллельного плоскости $z = 0$ и равного H_0 при любых $t > 0$ и $z < 0$.

6.158. Начальное давление газа в цилиндрическом угольном пласте ($0 < x$) с непроницаемой боковой поверхностью равно P_0 , давление вне пласта при любом $t > 0$ равно P_1 . Обычно $P_0 \gg P_1$ и в коэффициенте при производной в уравнении (1.107) полагают $P = P_0$. Решить линеаризованную задачу фильтрации.

6.159. Конец полуограниченного стержня ($0 < x$) с теплоизолированной боковой поверхностью поддерживается с момента $t = 0$ до $t_0 > 0$ при температуре u_0 , а затем при нулевой температуре. Определить температуру стержня, если его начальная температура равна нулю.

6.160. Определить температуру полупрямой ($0 < x$), если ее конец имеет температуру At , а начальная температура равна нулю.

6.161. Полуограниченный стержень ($0 < x$) с теплоизолированной боковой поверхностью находится при нулевой температуре. Температура торца с момента времени $t = 0$ до $t = t_0 > 0$ меняется по закону $u_0 e^{\alpha t}$, где $\alpha > 0$, а затем становится равной нулю. Решить задачу теплопроводности.

6.162. Найти концентрацию частиц, диффундирующих в тонкой полуограниченной трубке ($0 < x$), если их начальная концентрация равна нулю, а на конце задан поток плотность которого: 1) $q_0 \mathbf{e}_x$; 2) $q_0 \eta(t_0 - t) \mathbf{e}_x$.

6.163. Через торец полуограниченного стержня ($0 < x$) с теплоизолированной боковой поверхностью происходит теплообмен по закону Ньютона со средой, температура которой $\mu(t)$. Найти температуру $u(x, t)$ стержня при $t > 0$, если $u(x, 0) = 0$. Рассмотреть случай $\mu(t) = At$.

6.164. Найти потенциал полуограниченной линии ($0 < x$) с пренебрежимо малой индуктивностью на единицу длины, к концу которой в момент времени $t = 0$ подключается батарея с постоянной э.д.с. E_0 .

6.165. К концу линии ($0 < x$) с параметрами R, C ($L = G = 0$) в момент времени $t = 0$ подключается через сопротивление R_0 батарея с э.д.с. E_0 . Определить потенциал линии.

6.166. Шар, радиус которого r_0 , помещен в среду, температура которой равна нулю. Определить температуру среды, если шар поддерживается при температуре u_0 .

6.167. Шар, радиус которого r_0 , находится в среде с характеристиками k, ρ, C . С момента $t = 0$ температура шара меняется по закону At . Определить температуру вне шара при $t > 0$, если при $t = 0$ она равна нулю.

6.168. Полуограниченный стержень ($0 < x$) с теплоизолированной боковой поверхностью изготовлен из горючего материала. В момент времени $t = 0$ торец стержня поджигают. Фронт горения имеет температуру u_0 и перемещается со скоростью v_0 . Найти температуру стержня, если его начальная температура равна нулю.

6.169. Начальное давление газа в цилиндрическом угольном пласте ($0 < x$) с непроницаемой боковой поверхностью равно P_0 , давление вне пласта при любом $t > 0$ равно P_1 . В ходе выработки пласта его граница $x = 0$ перемещается с постоянной скоростью V_0 . Найти приближенное решение задачи фильтрации, полагая в коэффициенте при производной в уравнении (1.107), т. 1, $P = P_0$ (см. задачу 6.158).

6.170. Через конец тонкой полуограниченной трубки ($0 < x$), закрытый полупроницаемой перегородкой, из внешней среды диффундирует газ. Найти концентрацию газа в трубке, если его начальная концентрация равна нулю, а концентрация во внешней среде равна u_0 .

6.171. Через поверхность шара, радиус которого r_0 , во внешнюю среду поступает радиальный тепловой поток постоянной плотности q_0 . Найти температуру среды, если ее начальная температура равна нулю.

6.172. Из шара, радиус которого r_0 , во внешнюю среду диффундирует неустойчивый газ, распад которого пропорционален

концентрации (коэффициент пропорциональности α задан), плотность потока газа через поверхность шара постоянна и равна $q_0 e_r$. Определить концентрацию газа вне шара при $t > 0$, если начальная концентрация равна нулю.

6.173. Через поверхность шара, радиус которого r_0 , во внешнюю среду диффундирует неустойчивый газ (распад пропорционален концентрации, коэффициент пропорциональности α задан). Определить концентрацию газа вне шара, если начальная концентрация равна нулю, концентрация внутри шара постоянна и равна u_0 , а поверхность шара представляет собой полупроницаемую перегородку.

6.174. Найти температуру октанта ($0 < x, 0 < y, 0 < z$), начальная температура которого равна нулю, а грани поддерживаются при температуре u_0 .

6.175. Угольный пласт ($0 < x, 0 < y, |z| < H$) с непроницаемыми горизонтальными основаниями $z = \pm H$ заполнен газом. Начальное давление в пласте P_0 , давление вне пласта при любом $t > 0$ равно P_1 . Найти приближенное решение задачи фильтрации, полагая в коэффициенте при производной в уравнении (1.107), т. 1, $P = P_0$ (см. задачу 6.158).

6.176. Угольный пласт ($0 < x, 0 < y, |z| < H$) с непроницаемыми горизонтальными основаниями $z = \pm H$ заполнен газом. Начальное давление в пласте P_0 , давление вне пласта при любом $t > 0$ равно P_1 . В ходе выработки пласта его граница $x = 0$ перемещается с постоянной скоростью V_0 параллельно оси Oy . Найти приближенное решение задачи фильтрации, полагая в коэффициенте при производной в уравнении (1.107) $P = P_0$ (см. задачу 6.158).

6.177. Решить задачу

$$u_t = a^2 \Delta u, \quad -\infty < x, y < \infty, \quad 0 < z, \quad 0 < t, \\ u(x, y, 0, t) = u_0 \sin(\alpha x + \beta y), \quad u(x, y, z, 0) = 0, \quad |u| < \infty.$$

6.178. Решить задачу

$$u_t = a^2 \Delta u, \quad 0 < x, \quad 0 < y, \quad 0 < z, \quad 0 < t, \\ u(0, y, z, t) = u_0 \sin \alpha y, \quad u(x, 0, z, t) = 0, \quad u_z(x, y, 0, t) = 0, \\ u(x, y, z, 0) = 0, \quad |u| < \infty.$$

6.179. Полуограниченный стержень ($0 < x$) с теплоизолированной боковой поверхностью имеет нулевую температуру. С момен-

та времени $t = 0$ стержень нагревается тепловым потоком плотности $q(t)$, поступающим через торец. Известно, что температура торца изменяется по закону $\mu(t)$. Показать, что $q(t)$ является решением интегрального уравнения Абеля

$$\mu(t) = \frac{a}{k\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{q(\tau) d\tau}{\sqrt{t-\tau}}$$

и решить это уравнение.

6.180. При каком начальном распределении температуры в полуограниченном стержне ($0 < x$) с теплоизолированной поверхностью (включая торец) температура торца будет изменяться по закону $u_0 \exp(-\alpha^2 t)$?

6.181. Торцы полуограниченного стержня ($0 < x$) с теплоизолированной боковой поверхностью поддерживаются при нулевой температуре. При каком начальном распределении температуры стержня плотность потока, поступающего в стержень через торцы, равна $q_0 \exp(-\alpha^2 t)$?

6.3. Задачи для уравнений Пуассона и Гельмгольца

Пример 6.13. Пусть Ω — ограниченная область, $S = \partial\Omega$. Задача Дирихле ставится следующим образом: найти функцию $u \in C^2(\Omega) \cap C(\overline{\Omega})$, удовлетворяющую условиям

$$\begin{aligned} \Delta u(M) &= F(M), \quad M \in \Omega, \\ u(M)|_S &= f, \end{aligned}$$

где F — ограниченная интегрируемая в Ω функция, $f \in C(S)$. Функция Грина является решением следующей задачи:

$$\begin{aligned} \Delta G(M, P) &= -\delta(M, P), \quad M \in \Omega, \quad P \in \Omega, \\ G(M, P)|_{M \in S} &= 0, \quad G \in C^2(\Omega/\{P\}) \cap C(\overline{\Omega}/\{P\}). \end{aligned} \quad (6.17)$$

Один из методов построения функции Грина — метод электростатических изображений — основан на ее физической интерпретации: в трехмерном пространстве функция $G(M, P)$ представляет собой потенциал электростатического поля в точке M внутри проводящей заземленной поверхности S , обусловленный точечным зарядом $Q = 1/(4\pi)$, помещенным в точку $P \in \Omega$. Функцию Грина в двумерной области Ω с границей S можно трактовать как потенциал внутри цилиндрической поверхности,

параллельной оси Oz , с направляющей S в плоскости xOy , обусловленный линейным зарядом, распределенным с плотностью $q = 1/(4\pi)$ на прямой, параллельной оси Oz , след которой на плоскости xOy — точка $P \in \Omega$. Метод электростатических изображений заключается в построении системы вспомогательных зарядов, расположенных вне области Ω , поле которых внутри Ω было бы таким же, как поле зарядов, индуцированных на поверхности S (см. пример 6.9). Для построения функции Грина задачи Дирихле в круге, радиус которого r_0 , нужно найти потенциал линейного заряда $q = 1/(4\pi)$, расположенного параллельно оси заземленной поверхности $r = r_0$ на расстоянии $d < r_0$ от оси. В этом случае поле внутри поверхности оказывается эквивалентным полю двух линейных зарядов — данного q и вспомогательного $-q_1$, расположенного на том же луче, что и заряд q (вследствие аксиальной симметрии поля) на расстоянии d_1 от оси цилиндра (рис. 6.2). Это предположение будет оправдано,

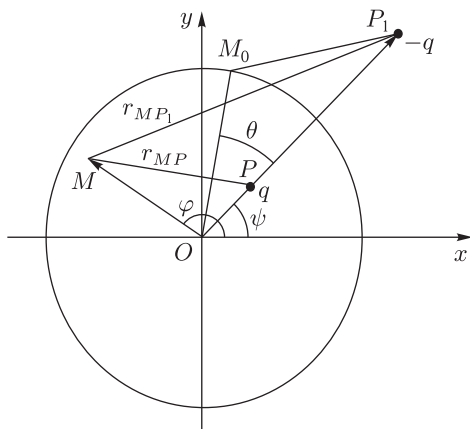


Рис. 6.2

если удастся найти неизвестные величины q_1 , d_1 (и C), которые определяются из условия равенства нулю потенциала на S

$$2q \ln \frac{1}{r_{M_0P}} - 2q_1 \ln \frac{1}{r_{M_0P_1}} + \ln C = 0, \quad M_0 \in S,$$

или

$$r_0^2 + d^2 - 2r_0d \cos \theta = C^{\frac{1}{q}} (r_0^2 + d_1^2 - 2r_0d_1 \cos \theta)^{\frac{q_1}{q}}. \quad (6.18)$$

После дифференцирования по θ тождество (6.18) принимает вид

$$d = C^{\frac{1}{q}} d_1^{\frac{q_1}{q}} (d_1^2 + r_0^2 - 2d_1r_0 \cos \theta)^{\frac{q_1}{q} - 1},$$

откуда $q_1 = q$, $C = \left(\frac{d}{d_1}\right)^q$. Теперь из тождества (6.18) вытекает, что $(r_0^2 + d^2)d_1 = (r_0^2 + d_1^2)d$, т. е. $dd_1 = r_0^2$. Итак,

$$G(M, P) = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{r_{MP}} - \ln \frac{r_0}{dr_{MP_1}} \right), \quad (6.19)$$

где $M = (r, \varphi)$, $P = (d, \psi)$, $P_1 = \left(\frac{r_0^2}{d}, \psi\right)$.

В задачах 6.182–6.196 построить функцию Грина задачи Дирихле для области Ω .

6.182. Ω — полуплоскость $y > 0$.

6.183. $\Omega = \{x, y: 0 < x, 0 < y\}$.

6.184. $\Omega = \left\{r, \varphi: 0 < r, 0 < \varphi < \frac{\pi}{n}\right\}$, $n \in \mathbb{N}$.

6.185. Ω — полукруг, радиус которого r_0 .

6.186. $\Omega = \left\{r, \varphi: r < r_0, 0 < \varphi < \frac{\pi}{n}\right\}$, $n \in \mathbb{N}$.

6.187. Ω — полуплоскость $0 < y$, из которой удален полукруг $\{x, y: x^2 + y^2 \leq r_0^2, 0 < y\}$.

6.188. Ω — полупространство $\{x, y, z: -\infty < x, y < \infty, 0 < z\}$.

6.189. $\Omega = \{x, y, z: 0 < x, 0 < y, -\infty < z < \infty\}$.

6.190. $\Omega = \left\{r, \varphi, z: 0 < r, 0 < \varphi < \frac{\pi}{n}\right\}$, $n \in \mathbb{N}$.

6.191. $\Omega = \{x, y, z: 0 < x, 0 < y, 0 < z\}$.

6.192. Ω — шар, радиус которого r_0 , в $\mathbb{R}^3$.

6.193. Ω — полушар, радиус которого r_0 , в $\mathbb{R}^3$.

6.194. Ω — внешность шара, радиус которого r_0 , в $\mathbb{R}^3$.

6.195. Ω — полупространство $\{x, y, z: -\infty < x, y < \infty, 0 < z\}$, из которого удален полушар $\{x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 \leq r_0^2, 0 < z\}$.

6.196. Ω — слой, ограниченный плоскостями $z = 0$, $z = l$.

6.197. На расстоянии d от центра шара, радиус которого $r_0 < d$, находится точечный источник тепла постоянной мощности Q . Найти стационарную температуру вне шара, если шар поддерживается при нулевой температуре.

6.198. Параллельно оси бесконечного проводящего цилиндра, радиус которого r_0 , на расстоянии $d > r_0$ от нее расположена

неограниченная нить с линейной плотностью заряда q . Методом изображений найти потенциал электростатического поля вне цилиндра.

6.199. Параллельно проводящей заземленной плоскости на расстоянии d от нее расположена прямая, на которой находятся диполи с постоянной плотностью момента $\mathbf{p}$. Методом изображений найти потенциал электростатического поля, если вектор $\mathbf{p}$ перпендикулярен к плоскости и направлен от нее.

6.200. Точечный диполь с моментом $\mathbf{P}$ расположен на расстоянии d от заземленной проводящей плоскости. Методом изображений найти потенциал электростатического поля, если вектор $\mathbf{P}$ параллелен плоскости.

6.201. Вне проводящего заземленного цилиндра, радиус которого r_0 , параллельно оси на расстоянии d от нее расположена прямая, на которой находятся диполи с плотностью момента $\mathbf{p} = p\mathbf{e}_d$. Методом изображений определить потенциал электростатического поля.

6.202. На расстоянии d от центра проводящей заземленной сферы, радиус которой $r_0 > d$, расположен точечный диполь, момент которого $\mathbf{P} = P\mathbf{e}_d$. Методом изображений определить потенциал электростатического поля.

6.203. На расстоянии d от центра проводящей заземленной сферы, радиус которой $r_0 < d$, расположен точечный заряд Q . Найти заряд, индуцированный на сфере.

6.204. Отрезок, длина которого $2l$, линейная плотность заряда q , расположен вне проводящей заземленной сферы, радиус которой r_0 ; точка O — центр сферы, точка O_1 — середина отрезка. Прямая, проходящая через точки O и O_1 , перпендикулярна к отрезку, $\overline{OO_1} = d$. Определить заряд, индуцированный на сфере.

6.205. Вне проводящей заземленной сферы, радиус которой r_0 , на расстоянии d от ее центра O расположена заряженная прямая. Перпендикуляр, опущенный из точки O на прямую, пересекает ее в точке O_1 , $\overline{OO_1} = d$. Определить заряд, индуцированный на сфере, если линейная плотность заряда прямой: 1) $\frac{Q}{\sqrt{d^2 + x^2}}$;

2) $\frac{Qx}{d^2 + x^2}$, где x — координата точки прямой относительно начала в точке O_1 .

6.206. Тонкое проводящее кольцо, радиус которого r_1 , заряд Q , расположено вне проводящей заземленной сферы, радиус которой r_0 ; расстояние центра O_1 кольца от центра O сферы равно d , плоскость кольца перпендикулярна к вектору $\overrightarrow{O_1O}$. Найти заряд, индуцированный на сфере.

6.207. Равномерно заряженный диск, радиус которого r_1 , заряд Q , расположен вне заземленной проводящей сферы, радиус которой r_0 . Расстояние центра O_1 диска до центра O сферы равно d , диск перпендикулярен к вектору $\overrightarrow{O_1O}$. Найти заряд сферы.

Пример 6.14. В ряде случаев метод изображений применим для построения функции Грина краевых задач для уравнения $\operatorname{div}(k \nabla u) = 0$, где k — кусочно-постоянная функция. Подобная ситуация возникает при отыскании векторного потенциала $\mathbf{A}$ прямого тока J , расположенного параллельно плоской границе раздела двух магнетиков с магнитными проницаемостями μ_1 и μ_2 на расстоянии $h = OP$ от границы (рис. 6.3). Функция $A(x, y)$ является решением задачи (см. задачу 1.420, т. 1)

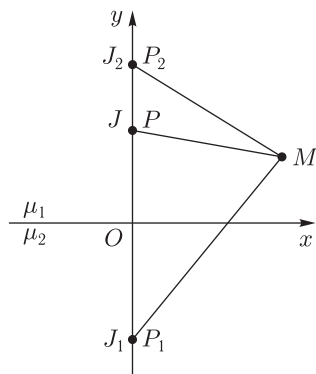


Рис. 6.3

$$\Delta A = -\frac{4\pi\mu_1}{c} J \delta(x) \cdot \delta(y - d), \quad 0 < y, \quad \Delta A = 0, \quad y < 0,$$

$$A|_{y=0} = A|_{y=+0}, \quad \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial A}{\partial y} \Big|_{y=-0} = \frac{1}{\mu_1} \frac{\partial A}{\partial y} \Big|_{y=+0},$$

$$A = O\left(\ln \frac{1}{r}\right), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty.$$

Метод изображений заключается в переходе к однородной среде, в которой наряду с током J размещаются вспомогательные токи. При $y < 0$ магнитное поле такое же, как поле тока J_2 , расположенного в точке $P_2(0, h_2)$; при этом все пространство заполнено однородным магнетиком с магнитной проницаемостью μ_2 . При $y > 0$ поле эквивалентно полю тока J и вспомогательного тока J_1 в точке $P_1(0, -h_1)$, находящихся в среде с магнитной проницаемостью μ_1 . Из симметрии поля следует, что токи J_1

и J_2 должны пересекать ось Oy . Таким образом, векторный потенциал

$$A = \begin{cases} \frac{2J_1\mu_1}{c} \ln \frac{1}{r_{MP}} + \frac{2J_1\mu_1}{c} \ln \frac{1}{r_{MP_1}} + C, & y > 0, \\ \frac{2J_2\mu_2}{c} \ln \frac{1}{r_{MP_2}}, & y < 0. \end{cases}$$

Граничные условия приводят к тождествам

$$\begin{cases} \frac{J\mu_1}{c} \ln(x^2 + h^2) + \frac{J_1\mu_1}{c} \ln(x^2 + h_1^2) - C = \frac{J_2\mu_2}{c} \ln(x^2 + h_2^2), \\ \frac{Jh}{x^2 + h^2} - \frac{J_1h_1}{x^2 + h_1^2} = \frac{J_2h_2^2}{x^2 + h_2^2}, \end{cases}$$

из которых следует, что

$$C = 0, \quad h_1 = h_2 = h, \quad J_1 = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} J, \quad J_2 = \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} J.$$

6.208. Диэлектрическая проницаемость пространства

$$\varepsilon(x, y, z) = \begin{cases} \varepsilon_1, & 0 < z, \\ \varepsilon_2, & z > 0; \end{cases}$$

построить функцию Грина для уравнения, описывающего потенциал зарядов, плотность которых $\rho(x, y, z)$.

6.209. Диэлектрическая проницаемость пространства

$$\varepsilon(x, y, z) = \begin{cases} \varepsilon_1, & 0 < y, \\ \varepsilon_2, & y > 0; \end{cases}$$

построить функцию Грина для уравнения, описывающего потенциал зарядов, плотность которых не зависит от z .

6.210. Диэлектрическая проницаемость пространства

$$\varepsilon(r) = \begin{cases} \varepsilon_1, & 0 \leq r < r_0, \\ \varepsilon_2, & r_0 < r, \end{cases}$$

где r — расстояние до оси Oz . Построить функцию Грина для уравнения, описывающего потенциал зарядов, плотность которых не зависит от z .

6.211. На плоской поверхности ($y = 0$) диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε , заполняющего полупространство ($y < 0$), находится (на оси Ox) бесконечная нить, заряд единицы длины которой q . Определить потенциал электростатического поля в пространстве.

6.212. На плоской поверхности ($z = 0$) диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε , заполняющего полупространство ($z < 0$), находится точечный электрический диполь, момент которого $\mathbf{p} = p\mathbf{e}_z$, координаты $x = y = 0$. Найти потенциал электростатического поля.

6.213. На плоской поверхности ($z = 0$) раздела двух сред с магнитными проницаемостями μ_1 (при $z > 0$) и μ_2 (при $z < 0$) находится точечный виток с током, магнитный момент которого $\mathbf{M} = M\mathbf{e}_z$, координаты $x = y = 0$. Найти векторный потенциал магнитного поля в пространстве.

6.214. Над плоской границей диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε , заполняющего полупространство $z > 0$, на расстоянии d от границы расположен точечный заряд Q . Найти силу, действующую на заряд.

6.215. Диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ε заполняет полупространство. Вне диэлектрика параллельно границе на расстоянии d от нее расположена бесконечная нить с линейной плотностью заряда q . Определить силу, действующую на единицу длины нити.

6.216. В диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ε , заполняющем все пространство, имеется цилиндрическая полость, радиус которой r_0 , диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1$. Внутри полости параллельно оси на расстоянии d от нее расположена нить с линейной плотностью заряда q . Найти силу, действующую на единицу длины нити.

6.217. Параллельно оси диэлектрического цилиндра (радиус r_0 , диэлектрическая проницаемость ε) на расстоянии $d > r_0$ от нее расположена бесконечная нить с линейной плотностью заряда q . Найти силу, действующую на единицу длины нити.

6.218. В среде с магнитной проницаемостью μ имеется цилиндрическая полость (радиус полости r_0 , $\mu = 1$), внутри которой параллельно оси на расстоянии d от нее расположен прямой ток J . Найти силу, действующую на единицу длины тока.

6.219. Определить силу, действующую на единицу длины прямого тока J , параллельного бесконечному цилиндру из магнетика с магнитной проницаемостью μ и расположенного от оси цилиндра на расстоянии $d > r_0$, где r_0 — радиус цилиндра.

Пример 6.15. Плотность заряда на проводнике определяется формулой

$$\sigma = - \frac{1}{4\pi} \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_S, \quad (6.20)$$

где u — потенциал электростатического поля, n — нормаль к поверхности S проводника. Если заземленный проводник находится в поле точечного заряда, то определение потенциала сводится к построению функции Грина, отличающейся от него лишь множителем.

Плотность заряда, индуцированного на поверхности полого проводящего заземленного цилиндра равномерно заряженной нитью (заряд единицы длины q), расположенной на расстоянии $d < r_0$ от оси, где r_0 — радиус цилиндра, определяется формулой (6.20), в которой (см. (6.19))

$$u(r, \varphi) = 2q \left(\ln \frac{1}{r_{MP}} - \ln \frac{r_0}{d r_{MP_1}} \right).$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{4\pi} \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \frac{q}{2\pi} \frac{\partial}{\partial r} \ln \frac{1}{\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos \varphi}} - \\ &- \frac{q}{2\pi} \frac{\partial}{\partial r} \ln \frac{1}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{r_0^2}{d}\right)^2 - \frac{2r_0^2 r}{d} \cos \varphi}} \Big|_{r=r_0} = -\frac{q}{2\pi r_0} \cdot \frac{r_0^2 - d^2}{r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi}. \end{aligned}$$

6.220. На расстоянии d от проводящей заземленной плоскости расположен точечный заряд Q . Определить плотность заряда и полный заряд Q' плоскости.

6.221. На расстоянии d от проводящей заземленной плоскости расположена нить с зарядом q на единицу длины. Найти плотность заряда и полный заряд q' полосы единичной ширины, расположенной на плоскости перпендикулярно к нити.

6.222. Внутри двугранного угла ($0 < x, 0 < y, -\infty < z < \infty$), образованного заземленными проводящими полуплоскостями, в точке $(x_0, y_0, 0)$ находится точечный заряд Q . Найти плотность заряда и полный заряд каждой полуплоскости.

6.223. Параллельно оси заземленного проводящего цилиндра, радиус которого r_0 , на расстоянии $d > r_0$ от оси расположена

бесконечная нить с зарядом q на единицу длины. Найти плотность заряда, заряд q' и дипольный момент $\mathbf{p}$ единицы длины цилиндра.

6.224. На расстоянии d от центра заземленной проводящей сферы, радиус которой r_0 , расположен точечный заряд Q . Определить плотность заряда, заряд Q' и дипольный момент $\mathbf{P}'$ сферы, если: 1) $r_0 > d$; 2) $r_0 < d$.

6.225. Параллельно оси полого заземленного цилиндрического проводника, поперечным сечением которого является полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), расположена нить с линейной плотностью заряда q . Найти плотность заряда на проводнике, если координаты нити $r = d < r_0$, $\varphi = \pi/2$.

6.226. Заземленный проводник имеет форму плоскости $x = 0$ с цилиндрическим выступом, параллельным оси Oz , поперечным сечением которого является полукруг ($x^2 + y^2 < r_0$, $x > 0$). Определить плотность заряда, индуцированного на проводнике бесконечной нитью, параллельной оси Oz ; линейная плотность заряда нити q , ее координаты $x = d > r_0$, $y = 0$.

Пример 6.16. Решение задачи Дирихле для уравнения Пуассона с однородным граничным условием

$$\begin{cases} \Delta u = F(M), & M \in \Omega, \\ u|_S = 0 \end{cases} \quad (6.21)$$

методом функции Грина основано на физической интерпретации этой функции и исходит из представления $F(M)$ в форме суперпозиции точечных источников, т. е.

$$F(M) = \int_{\Omega} F(P) \delta(M, P) d\mathbf{r}_P.$$

В соответствии с (2.128), т. 1, функция $-F(P)G(M, P)$ характеризует влияние одного из источников, а функция

$$u(M) = - \int_{\Omega} F(P)G(M, P) d\mathbf{r}_P, \quad (6.22)$$

учитывающая их суммарное влияние, представляет собой решение задачи (6.21).

Иллюстрацией может служить определение плотности заряда, индуцированного на полой проводящей заземленной цилиндрической поверхности радиуса r_0 , бесконечной нитью с плотностью

дипольного момента $\mathbf{p} = p \frac{\mathbf{d}}{d}$, расположенной параллельно оси цилиндра на расстоянии $d < r_0$ от оси.

Потенциал электростатического поля является решением задачи

$$\Delta u = 4\pi p \frac{\delta'(r-d)}{r} \cdot \delta(\varphi),$$

$$u|_{r=r_0} = 0.$$

По формуле (6.22)

$$u(r, \varphi) = - \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \frac{4\pi p}{r'} \delta'(r' - d) \delta(\psi) G(r, r', \varphi - \psi) r' dr' d\psi =$$

$$= 4\pi p \left. \frac{\partial G(r, r', \varphi)}{\partial r'} \right|_{r'=d},$$

где функция $G(r, r', \varphi)$ имеет вид (6.19). Плотность заряда на поверхности проводника вычисляется по формуле (6.20):

$$\sigma(\varphi) = p \left. \frac{\partial^2 G}{\partial r \partial r'} \right|_{r'=d, r=r_0} = -\frac{p}{\pi} \cdot \frac{(r_0^2 + d^2) \cos \varphi - 2r_0 d}{(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2}.$$

Заряд единицы длины цилиндра

$$q' = \int_0^{2\pi} \sigma(\varphi) r_0 d\varphi = 0,$$

дипольный момент единицы длины цилиндра

$$\mathbf{p}' = \frac{\mathbf{d}}{d} \int_0^{2\pi} \sigma(\varphi) r_0 \cos \varphi r_0 d\varphi = -\mathbf{p}.$$

6.227. Найти плотность заряда, индуцированного на проводящей заземленной плоскости $z = 0$ полубесконечной нитью L с зарядом q на единицу длины, если:

- 1) $L = \{x, y, z: x = y = 0, 0 < l < z\}$;
- 2) $L = \{x, y, z: 0 < x, y = 0, z = l > 0\}$.

6.228. На расстоянии d от проводящей заземленной плоскости расположена бесконечная нить, плотность дипольного момента которой $\mathbf{p}$ ($\mathbf{p}$ — постоянный вектор, перпендикулярный нити).

Найти плотность заряда, индуцированного на плоскости, если вектор $\mathbf{p}$: 1) параллелен плоскости; 2) перпендикулярен плоскости и направлен к ней.

6.229. Точечный диполь с моментом $\mathbf{P}$ расположен на расстоянии d от проводящей заземленной плоскости. Найти плотность заряда, индуцированного на плоскости, если вектор $\mathbf{P}$: 1) параллелен плоскости; 2) перпендикулярен плоскости и направлен от нее.

6.230. Параллельно оси проводящего заземленного цилиндра, радиус которого r_0 , расположена заряженная нить, координаты которой $r = d > r_0$, $\varphi = 0$. Определить плотность заряда, заряд q' и дипольный момент p' единицы длины цилиндра, если плотность дипольного момента нити $\mathbf{p} = p \mathbf{e}_d$.

6.231. Параллельно оси полого проводящего заземленного цилиндра, радиус которого r_0 , на расстоянии $d < r_0$ от оси расположена нить, дипольный момент единицы длины которой $\mathbf{p}$. Определить плотность заряда, заряд q' и дипольный момент $\mathbf{p}'$ единицы длины цилиндра, если постоянный вектор $\mathbf{p}$ перпендикулярен плоскости, содержащей нить и ось цилиндра.

6.232. На расстоянии d от центра проводящей заземленной сферы, радиус которой $r_0 > d$, расположен точечный диполь, момент которого $\mathbf{P} = P \mathbf{e}_d$. Каковы плотность заряда на сфере, ее полный заряд Q' и дипольный момент $\mathbf{P}'$?

6.233. В точке M , отстоящей от центра O проводящей заземленной сферы на расстоянии d , расположен диполь с моментом $\mathbf{P}$, перпендикулярным вектору $\overline{OM}$. Найти плотность заряда на сфере, ее полный заряд Q' и дипольный момент $\mathbf{P}'$, если радиус сферы: 1) больше d ; 2) меньше d .

6.234. Вне диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε , заполняющего полупространство $z < 0$, на расстоянии d от границы расположен точечный диполь с моментом $\mathbf{P}$. Определить силу, действующую на диполь, если вектор $\mathbf{P}$: 1) параллелен границе; 2) перпендикулярен границе.

6.235. Диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ε заполняет полупространство $z < 0$. Вне диэлектрика параллельно границе на расстоянии d от нее расположена нить, плотность дипольного момента которой постоянна и равна $\mathbf{p}$. Определить линейную плотность силы, действующей на нить, если вектор $\mathbf{p}$ лежит в плоскости, перпендикулярной нити.

6.236. В среде с диэлектрической проницаемостью ε имеется цилиндрическая полость (радиус r_0 , $\varepsilon = 1$). Внутри полости параллельно оси на расстоянии d от нее расположена нить, плотность дипольного момента которой постоянна и равна $\mathbf{p}$. Определить линейную плотность силы, действующей на нить, если вектор $\mathbf{p}$ лежит в плоскости, перпендикулярной нити.

6.237. Параллельно оси бесконечного цилиндра (радиус r_0 , диэлектрическая проницаемость ε) на расстоянии $d > r_0$ от оси расположена нить, плотность дипольного момента которой постоянна и равна $\mathbf{p}$. Определить линейную плотность силы, действующей на нить, если вектор $\mathbf{p}$ лежит в плоскости, перпендикулярной нити.

Пример 6.17. Решение задачи Дирихле для уравнения Лапласа в ограниченной области. Если задачу Дирихле

$$\Delta u(M) = 0, \quad M \in \Omega, \\ u|_S = f$$

поставить в эквивалентной форме (см. задачу 10.318)

$$\Delta u = -\frac{\partial(f\delta_S)}{\partial n}, \\ u|_S = 0,$$

то решение получается с помощью формул (6.22) и (10.19):

$$u(M) = \int_{\Omega} \frac{\partial(f\delta_S)}{\partial n_P} G(M, P) d\mathbf{r}_P = - \int_S f(P) \frac{\partial G(M, P)}{\partial n_P} ds_P. \quad (6.23)$$

К задаче Дирихле сводится определение стационарной температуры в двугранном угле ($0 < x$, $0 < y$), одна грань ($x = 0$) которого поддерживается при нулевой температуре, а температура другой грани равна $u_0\eta(l - x)$. Построение решения осуществляется по следующей схеме. Постановка задачи:

$$\Delta u(x, y) = 0, \quad 0 < x, \quad 0 < y, \\ u(0, y) = 0, \quad u(x, 0) = u_0\eta(l - x), \quad |u(x, y)| < \infty.$$

Построение функции Грина (методом изображений):

$$G(M, P) = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{r_{MP}} + \ln \frac{1}{r_{MP_1}} - \ln \frac{1}{r_{MP_2}} - \ln \frac{1}{r_{MP_3}} \right),$$

$M = (x, y)$, $P = (\xi, \eta)$, $P_1 = (-\xi, -\eta)$, $P_2 = (\xi, -\eta)$, $P_3 = (-\xi, \eta)$.
 Применение формулы (6.23):

$$u(M) = - \int_S f(P) \frac{\partial G}{\partial n_P} ds_P,$$

где S — граница области, n_P — внешняя нормаль к S в точке P .
 Так как $f(P) = 0$ на оси Oy , то

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \int_0^\infty f(\xi) \frac{\partial G}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} d\xi = \\ &= \frac{u_0}{\pi} \int_0^l \left(\frac{y}{(x-\xi)^2 + y^2} - \frac{y}{(x+\xi)^2 + y^2} \right) d\xi = \\ &= \frac{u_0}{\pi} \operatorname{arccctg} \frac{(x^2 + y^2)^2 - l^2(x^2 - y^2)}{2l^2xy} = \frac{u_0}{\pi} \operatorname{arccctg} \frac{r^2 - l^2 \cos 2\varphi}{l^2 \sin 2\varphi}, \end{aligned}$$

где $x = r \cos \varphi$, $y = r \sin \varphi$.

6.238. Решить задачу Дирихле для полуплоскости методом функции Грина.

6.239. Найти решение задачи Дирихле для уравнения Лапласа в полуплоскости ($y > 0$), если $u(x, 0) = f(x)$, где функция $f(x)$ равна:

$$\begin{aligned} &1) \eta(l - |x|); \quad 2) \frac{u_0 l^2}{x^2 + a^2}; \quad 3) \frac{u_0 l^2 \eta(x)}{x^2 + a^2}; \quad 4) \frac{u_0 l^2 \operatorname{sign} x}{x^2 + a^2}; \quad 5) \frac{u_0 l x \eta(x)}{x^2 + a^2}; \\ &6) \frac{u_0 l x}{x^2 + a^2}; \quad 7) \frac{u_0 l^2 \eta(x)}{(|x| + |a|)^2}; \quad 8) \frac{u_0 l \operatorname{sign} x}{(|x| + |a|)^2}. \end{aligned}$$

6.240. Решить задачу Дирихле

$$\begin{aligned} \Delta u(x, y) &= 0, \quad 0 < x, \quad 0 < y, \\ u(x, 0) &= u_0 \eta(l - x), \\ u(0, y) &= u_0 \eta(l - y). \end{aligned}$$

6.241. Найти стационарное распределение температуры внутри двугранного угла ($0 < x$, $0 < y$) с теплоизолированной гранью $y = 0$, если температура грани $x = 0$ равна $u_0 \eta(y - l)$.

6.242. Определить стационарную температуру внутри двугранного угла ($0 < r$, $0 < \varphi < \frac{\pi}{n}$), где $n \in \mathbb{N}$, если грань $\varphi = \pi/n$ имеет нулевую температуру, а грань $\varphi = 0$ — температуру $u_0 \eta(l - r)$.

6.243. Решить задачу Дирихле

$$\Delta u(x, y) = 0, \quad 0 < y < x, \\ u(x, 0) = u_0 \sin x, \quad u(x, x) = 0, \quad |u(x, y)| < \infty.$$

6.244. Решить задачу 3.35, т. 1, методом функции Грина.

6.245. Решить задачу Дирихле для уравнения Лапласа в круге, радиус которого r_0 , если на границе круга решение равно $f(\varphi)$. Рассмотреть случаи:

$$1) f(\varphi) = u_0(\cos^4 \varphi + \sin^4 \varphi); \quad 2) f(\varphi) = u_0 \sin^3 \varphi.$$

6.246. Решить внутреннюю задачу Дирихле

$$\Delta u(r, \varphi) = 0, \quad 0 < r < r_0, \quad 0 \leq \varphi < 2\pi, \\ |u(r, \varphi)| < \infty, \quad u(r_0, \varphi) = f(\varphi),$$

где функция $f(\varphi)$ равна:

$$1) \frac{u_0}{17 + 8 \cos \varphi}; \quad 2) \frac{u_0}{17 + 15 \sin \varphi}; \quad 3) \frac{u_0 \sin \varphi}{25 + 7 \cos \varphi}; \quad 4) \frac{u_0 \sin \varphi}{13 - 12 \sin \varphi}; \\ 5) \frac{u_0 \cos \varphi}{25 + 24 \sin \varphi}; \quad 6) \frac{u_0 \cos \varphi}{13 + 5 \cos \varphi}.$$

6.247. Решить задачу Дирихле для уравнения Лапласа вне круга, радиус которого r_0 , если на границе круга решение равно $f(\varphi)$. Рассмотреть случаи:

$$1) f(\varphi) = u_0 \sin^3 \varphi \cos \varphi; \quad 2) f(\varphi) = u_0 \sin(n\varphi + \alpha).$$

6.248. Решить внешнюю задачу Дирихле

$$\Delta u(r, \varphi) = 0, \quad r_0 < r, \quad 0 \leq \varphi < 2\pi, \\ |u(r, \varphi)| < \infty, \quad u(r_0, \varphi) = f(\varphi),$$

где функция $f(\varphi)$ равна:

$$1) \frac{u_0}{3 - \sqrt{5} \sin \varphi}; \quad 2) \frac{u_0}{2 + \sqrt{3} \cos \varphi}; \quad 3) \frac{u_0 \sin \varphi}{25 + 7 \cos \varphi}; \quad 4) \frac{u_0 \cos \varphi}{61 - 60 \sin \varphi}; \\ 5) \frac{u_0 \sin \varphi}{4 - \sqrt{7} \sin \varphi}; \quad 6) \frac{u_0 \cos \varphi}{7 + \sqrt{13} \cos \varphi}.$$

6.249. Определить стационарную температуру полупространства ($z > 0$), граница которого поддерживается при температуре $f(x, y)$. Рассмотреть случай $f(x, y) = u_0 \eta(x) \eta(y)$.

6.250. Определить стационарную температуру внутри двугранного угла ($0 < x, 0 < y$), грань $x = 0$ которого поддерживается при нулевой температуре, а температура грани $y = 0$ равна $u_0 \operatorname{sign} z$.

6.251. Решить задачу Дирихле

$$\begin{aligned}\Delta u(x, y, z) &= 0, \quad -\infty < x, y < \infty \quad 0 < z, \\ u(x, y, 0) &= u_0 \sin(\alpha x + \beta y), \quad |u(x, y, z)| < \infty.\end{aligned}$$

6.252. Внутри двугранного угла $(-\infty < x < \infty, 0 < y, 0 < z)$ через полосу $(|x| < l_1, y = 0, 0 \leq l_2 < z)$ на грани $y = 0$ поступает тепловой поток постоянной плотности q_0 , а остальная часть этой грани теплоизолирована. Какой должна быть плотность потока через грань $z = 0$, чтобы температура этой грани была постоянной?

6.253. Грани $x = 0, y = 0, z = 0$ октанта $(0 < x, 0 < y, 0 < z)$ поддерживаются при температуре u_1, u_2, u_3 соответственно. Найти стационарную температуру октанта.

6.254. Решить внутреннюю задачу Дирихле для шара, радиус которого r_0 , при условии, что на поверхности шара решение равно $f(\theta, \varphi)$. Рассмотреть случай $f(\theta, \varphi) = u_0 \sin^n \theta \cos n\varphi, n \in \mathbb{N}_0$.

6.255. Решить внешнюю задачу Дирихле для шара, радиус которого r_0 , при условии, что на поверхности шара решение равно $f(\theta, \varphi)$. Рассмотреть случай $f(\theta, \varphi) = u_0 \sin^n \theta \sin n\varphi, n \in \mathbb{N}$.

6.256. На расстоянии d от центра шара, радиус которого $r_0 < d$, находится точечный источник тепла мощности Q . Найти стационарное распределение температуры вне шара, если его поверхность поддерживается при температуре u_0 .

6.257. На расстоянии d от центра проводящего шара, радиус которого $r_0 < d$, находится точечный заряд Q . Определить плотность заряда на поверхности шара, если заряд шара Q_0 .

Пример 6.18. Функция Грина задачи Неймана для уравнения Лапласа в ограниченной области Ω с кусочно-гладкой границей $S = \partial\Omega$. Предстоит: 1) дать определение функции Грина; 2) получить выражение решения задачи Неймана через функцию Грина. Будут нужны следующие формулы. Если функция $u(M) \in C^2(\Omega) \cap C^1\overline{\Omega}, \Omega \subset \mathbb{R}^3$, то имеет место интегральное представление функции $u(M)$:

$$\forall M: u(M) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(\frac{1}{r_{MP}} \frac{\partial u}{\partial n} - u \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r_{MP}} \right) ds - \frac{1}{4\pi} \int \frac{\Delta u}{r_{MP}} d\mathbf{r}, \quad (6.24)$$

где r_{MP} — расстояние между точками M и P ; в случае $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ в этой формуле надо заменить $2\pi \rightarrow \pi, \frac{1}{r} \rightarrow \ln \frac{1}{r}$. Ес-

ли $u, v \in C^2(\Omega) \cap C^1\overline{\Omega}$, то справедлива вторая формула Грина для оператора Лапласа

$$\int_{\Omega} (v\Delta u - u\Delta v) d\mathbf{r} = \int_S \left(v \frac{\partial u}{\partial n} - u \frac{\partial v}{\partial n} \right) ds.$$

В обеих формулах n — внешняя нормаль к S .

Формулировка задачи Неймана. Найти функцию $u(M) \in C^2(\Omega) \cap C^1(\overline{\Omega})$, удовлетворяющую уравнениям

$$\Delta u = F(M), \quad M \in \Omega,$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} = f(P), \quad P \in S,$$

при условии разрешимости

$$\int_{\Omega} F d\mathbf{r} = \int_S f ds,$$

которое следует из второй формулы Грина при $v = 1$.

1) Определить функцию Грина этой задачи так же, как функцию Грина задачи Дирихле не удастся: если $F = -\delta(M, P)$, то условие разрешимости

$$1 + \int_S f ds = 0$$

при $f = 0$ не выполняется. Для $f = C$ задача имеет решение, если $1 + CS_0 = 0$, где S_0 — площадь поверхности S . Функцией Грина называется решение задачи

$$\Delta G = -\delta(M, P), \quad M, P \in \Omega,$$

$$\frac{\partial G}{\partial n} \Big|_S = -\frac{1}{S_0}.$$

Отсюда следует, что функция Грина задачи Неймана определена с точностью до аддитивной постоянной, которую можно фиксировать, потребовав ортогональность функции Грина с единицей: $\int_{\Omega} G d\mathbf{r} = 0$.

Так как $\frac{1}{r_{MP}}$ — частное решение уравнения $\Delta G = -\delta(M, P)$ в $\mathbb{R}^3$ (см. задачу 10.247, 1)), то

$$G(M, P) = \frac{1}{4\pi r_{MP}} + v,$$

где v — гармоническая функция в Ω . Если эту функцию внести во вторую формулу Грина, то получится соотношение

$$0 = \int_S \left(v \frac{\partial u}{\partial n} - u \frac{\partial v}{\partial n} \right) ds - \int_{\Omega} v \Delta u d\mathbf{r},$$

почленная сумма которого и интегрального представления (6.24) функции u приводит к выражению

$$u(M) = \int_S \left(\frac{1}{4\pi r_{MP}} + v \right) \frac{\partial u}{\partial n} ds + \int_S \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{4\pi r_{MP}} + v \right) u ds - \\ - \int_{\Omega} \left(\frac{1}{4\pi r_{MP}} + v \right) \Delta u d\mathbf{r},$$

или

$$u(M) = \int_S G \frac{\partial u}{\partial n} ds + \int_S \frac{\partial G}{\partial n} u ds - \int_{\Omega} G \Delta u d\mathbf{r}. \quad (6.25)$$

Пусть $u(M)$ — решение задачи Неймана, тогда $\frac{\partial u}{\partial n} \Big|_S = f$, $\Delta u = F$, а второй интеграл, в котором $\frac{\partial G}{\partial n} \Big|_S = -\frac{1}{S_0}$, равен некоторой константе, так что

$$u(M) = \int_S G f ds - \int_{\Omega} G F d\mathbf{r} + C.$$

6.258. Построить функцию Грина внутренней задачи Неймана для шара, радиус которого r_0 .

6.259. Получить решение задачи Неймана для шара.

6.260. Ток J втекает в шар $\{x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 = r_0^2\}$ через контакт в точке с координатами $x = y = 0, z = -r_0$ и вытекает через контакт в диаметрально противоположной точке. Найти плотность тока в шаре, если ток не зависит от времени.

6.261. Постоянный ток J втекает в шар $\{x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 = r_0^2\}$ через точку с координатами $x = r_0, y = z = 0$, а вытекает через точку с координатами $x = y = 0, z = r_0$. Найти плотность тока в шаре.

6.262. Определить функцию Грина внешней задачи Неймана для шара и найти эту функцию.

6.263. Получить решение внешней задачи Неймана для шара, если $u_r|_{r=r_0} = -f(\theta, \varphi)$.

6.264. На расстоянии d от центра O неподвижного твердого шара ($r \leq r_0 < d$) в точке P расположен источник идеальной несжимаемой жидкости, мощность которого Q_0 . Считая течение потенциальным, а обтекание полным, найти стационарную скорость жидкости на прямой OM и в точках поверхности шара, принадлежащих диаметральной плоскости, перпендикулярной к OM .

6.265. Построить функцию Грина внутренней задачи Неймана для круга $B(r_0)$.

6.266. Если известна функция Грина внутренней задачи Неймана для круга

$$\Delta u = 0, \quad r < r_0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial r}|_{r=r_0} = f(\varphi), \quad \int_0^{2\pi} f(\varphi) d\varphi = 0,$$

то решение этой задачи

$$u(r, \varphi) = C - \frac{r_0}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\psi) \ln \sqrt{r_0^2 + r^2 - 2r_0r \cos(\varphi - \psi)} d\psi.$$

Доказать это утверждение.

6.267. Через круглую пластинку, радиус которой r_0 , толщина d , проводимость σ , протекает постоянный ток J (рис. 6.4). Ток

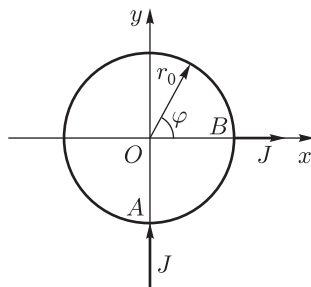


Рис. 6.4

втекает через образующую A и вытекает через образующую B , вдоль которых он распределен равномерно. Найти плотность тока в пластинке.

6.268. Решить задачу Неймана в круге, радиус которого r_0 для следующих граничных условий:

$$1) \frac{v_0 \sin \varphi}{(17+8 \cos \varphi)^2}; 2) \frac{v_0 \cos \varphi}{(13-5 \sin \varphi)^2}; 3) \frac{v_0 \sin \varphi}{(25+7 \cos \varphi)^2}; 4) \frac{v_0 \cos \varphi}{(17-25 \sin \varphi)^2}.$$

6.269. 1) Дать определение функции Грина внешней задачи Неймана для круга; 2) найти эту функцию.

6.270. Применив функцию Грина из задачи 6.269, решить внешнюю задачу Неймана для круга при условии $u_r|_{r=r_0} = f(\varphi)$.

6.271. Линейный источник $\{x, y, z: x = d > 0, y = 0, -\infty < z < \infty\}$ идеальной несжимаемой жидкости, мощность которого q_0 , расположен параллельно оси твердого неподвижного цилиндра $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2 < d^2, -\infty < z < \infty\}$. Считая течение потенциальным, а обтекание полным, найти стационарную скорость жидкости на его поверхности и в точках плоскости $y = 0$.

6.272. Решить внешнюю задачу Неймана для круга, радиус которого r_0 , если на окружности $u_r(r_0, \varphi) = -f(\varphi)$, где функция $f(\varphi)$ равна:

$$1) \frac{v_0 \sin \varphi}{(7 - 2\sqrt{6} \cos \varphi)^2}; 2) \frac{v_0 \cos \varphi}{(9 + 4\sqrt{2} \sin \varphi)^2};$$

$$3) \frac{v_0 \sin \varphi}{7 + 4\sqrt{3} \cos \varphi)^2}; 4) \frac{v_0 \cos \varphi}{(6 - \sqrt{11} \sin \varphi)^2}.$$

6.273. Определить функцию Грина задачи Неймана для полупространства и найти эту функцию.

6.274. Решить задачу Неймана для полупространства методом функции Грина.

6.275. Дать определение функции Грина задачи Неймана для полуплоскости и найти эту функцию.

6.276. Решить задачу Неймана для полуплоскости методом функции Грина.

6.277. Получить решение задачи Неймана для полуплоскости, если $u_y(x, 0) = -f(x)$, где $f(x)$ равна:

$$1) \frac{v_0 l^2 \eta(x)}{(|x| + |a|)^2}; 2) \frac{v_0 l^2 \operatorname{sign} x}{(|x| + |a|)^2}; 3) \frac{v_0 l^3 x \eta(x)}{(x^2 + a^2)^2}; 4) \frac{v_0 l^5 x}{(x^2 + a^2)^3}.$$

Пример 6.19. Уравнение Гельмгольца $\Delta u + k^2 u = 0$ описывает установившиеся волновые процессы, и его решение

удовлетворяет в $\mathbb{R}^3$ условиям излучения (1.83), которые служат для выделения расходящихся волн. Функция Грина для уравнения Гельмгольца в трехмерном пространстве определяется следующими условиями:

$$\Delta u + k^2 u = -\delta(\mathbf{r}), \quad (6.26)$$

$$u = O\left(\frac{1}{r}\right), \quad \frac{\partial u}{\partial r} + iku = o\left(\frac{1}{r}\right), \quad r \rightarrow \infty. \quad (6.27)$$

Подстановкой $u = v/r$ уравнение (6.26) преобразуется к виду

$$\frac{1}{r}\Delta v + 2\left(\nabla v \nabla \frac{1}{r}\right) + v \Delta \frac{1}{r} + k^2 \frac{v}{r} = -\delta(\mathbf{r}),$$

откуда (см. задачу 10.247, п. 2)

$$\Delta v - \frac{2}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + k^2 v = 0, \quad (6.28)$$

$$v(0) = \frac{1}{4\pi}. \quad (6.29)$$

Если уравнение (6.28) решать методом Фурье, полагая

$$v(r, \theta, \varphi) = \sqrt{r} w(r) Y_n^m(\theta, \varphi),$$

то для функции $w(r)$ получится уравнение Бесселя полуцелого порядка $n + 1/2$. Следовательно, ряд, представляющий решение, будет содержать функции

$$H_{n+\frac{1}{2}}^{(1,2)}(kr) Y_n^m(\theta, \varphi).$$

Условие (6.29) выполняется только при $n = 0$, а условиям излучения (6.27) удовлетворяет функция Ганкеля второго рода. В итоге

$$G(M, P) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi r_{MP}}} H_{\frac{1}{2}}^{(2)}(kr_{MP}) \frac{e^{-ikr_{MP}}}{4\pi r_{MP}}.$$

Условию излучения

$$\frac{\partial u}{\partial r} - iku = o\left(\frac{1}{r}\right)$$

соответствует функция Грина

$$G(M, P) = \frac{e^{ikr_{MP}}}{4\pi r_{MP}}.$$

6.278. Построить функцию Грина для уравнения Гельмгольца в двумерном пространстве.

6.279. Построить функцию Грина для уравнения Гельмгольца в полуплоскости ($0 < y$), если на границе $y = 0$ задано условие первого типа.

6.280. Построить функцию Грина для уравнения Гельмгольца в полупространстве ($0 < z$), если на границе $z = 0$ задано условие: 1) первого типа; 2) второго типа.

6.281. В однородной среде с коэффициентом диффузии D действует точечный источник неустойчивого газа (распад пропорционален концентрации) постоянной мощности Q . Найти стационарную концентрацию газа в процессе диффузии.

6.282. В однородной среде с коэффициентом диффузии D действуют источники неустойчивого газа, расположенные на некоторой прямой. Найти стационарную концентрацию газа в процессе диффузии, если мощность источников на единицу длины прямой постоянна и равна q .

6.283. На расстоянии d от непроницаемой плоскости расположен точечный источник неустойчивого газа постоянной мощности Q . Найти стационарную концентрацию газа в процессе диффузии.

6.284. Параллельно непроницаемой плоскости на расстоянии d от нее расположен линейный источник неустойчивого газа, мощность единицы длины которого постоянна и равна q . Определить стационарную концентрацию газа в процессе диффузии.

6.285. В неограниченной среде с поглощением ($\Sigma_c \ll \Sigma_s$) действует изотропный плоский источник (плоскость $x = 0$), испускающий в единицу времени с единицы площади Q_0 моноэнергетических (тепловых) нейтронов. Определить в диффузионном приближении стационарную плотность потока нейтронов, если их скорость (по абсолютной величине) не меняется.

6.286. Решить предыдущую задачу для линейного изотропного источника, расположенного на оси Oz , с единицы длины которого в единицу времени испускается q_0 моноэнергетических нейтронов.

6.287. Решить задачу 6.285 для изотропного точечного источника, мощность которого Q_0 , и определить средний квадрат расстояния $\overline{r^2}$ от точки рождения нейтрона до точки его поглощения. Проверить применимость диффузионного приближения (см. пример 1.13, т. 1).

6.288. В бесконечной среде с поглощением ($\Sigma_c \ll \Sigma_s$) действует изотропный сферический источник, радиус которого r' , с единицы площади которого в единицу времени испускается $Q_0/(4\pi r'^2)$ моноэнергетических (тепловых) нейтронов. Определить в диффузионном приближении стационарную плотность потока нейтронов, если их скорость (по абсолютной величине) не меняется.

6.289. Однородная среда с поглощением ($\Sigma_c \ll \Sigma_s$) занимает полупространство ($z > 0$) и граничит с вакуумом. В среде действует изотропный точечный источник, испускающий Q_0 моноэнергетических (тепловых) нейтронов в единицу времени; координаты источника $\mathbf{r}_0 = a\mathbf{e}_z$, где a — расстояние до экстраполированной границы $z = 0$ среды. Определить в диффузионном приближении стационарную плотность потока нейтронов, если их скорость (по абсолютной величине) в процессе диффузии не меняется.

6.290. Решить предыдущую задачу для изотропного линейного источника, с единицы длины которого в единицу времени испускается Q_0 моноэнергетических нейтронов; источник расположен в плоскости yOz на расстоянии a от экстраполированной границы $y = 0$ среды.

6.4. Функция Грина одномерной краевой задачи

Пример 6.20. Дан оператор

$$\mathcal{L} = - \left(\frac{d}{dx} p(x) \frac{d}{dx} - q(x) \right), \quad (6.30)$$

где $p(x) > 0$, $p(x) \in C^1(\overline{\Delta})$, $q(x) \geq 0$, $q \in C(\overline{\Delta})$, $\Delta = (a, b)$ — ограниченный промежуток. Оператор определен на линейном множестве $\mathcal{M}_{\mathcal{L}}$ функций класса $C^2(\Delta) \cap C^1(\overline{\Delta})$, удовлетворяющих однородным граничным условиям при $x = a$ и $x = b$, а Λ — множество собственных значений оператора. Если $\lambda = 0 \notin \Lambda$, то функцией Грина краевой задачи

$$\mathcal{L}u = f, \quad u \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}},$$

называется решение $G(x, \xi)$ уравнения

$$\mathcal{L}G = \delta(x - \xi), \quad x \in \Delta, \quad \xi \in \Delta, \quad (6.31)$$

удовлетворяющее тем же граничным условиям, что и $u \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}$.

Пусть оператор

$$\mathcal{L} = - \left(\frac{d}{dx}(x+3)^{\frac{3}{2}} \frac{d}{dx} - \frac{3}{(x+3)^{\frac{1}{2}}} \right), \quad x \in \Delta = (-2, 1),$$

определен на функциях $u \in C^2(\Delta) \cup C^1(\overline{\Delta})$, удовлетворяющих граничным условиям

$$2u'(-2) - 3u(-2) = 0, \quad (6.32)$$

$$2u'(1) + u(1) = 0. \quad (6.33)$$

В данном случае $\lambda = 0 \notin \Lambda$; действительно, уравнение задачи на собственные значения $\mathcal{L}u = \lambda u$, $u \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}$, при $\lambda = 0$ является уравнением Эйлера

$$(x+3)^2 u'' + \frac{3}{2}(x+3)u' - 3u = 0, \quad (6.34)$$

общее решение которого

$$u(x) = C_1(x+3)^{\frac{3}{2}} + C_2(x+3)^{-2}. \quad (6.35)$$

Это решение удовлетворяет граничным условиям (6.32), (6.33) при $C_1 = C_2 = 0$, т. е. $u \equiv 0$ и $\lambda = 0 \notin \Lambda$. Уравнение (6.31) имеет вид

$$\frac{d}{dx}(x+3)^{\frac{3}{2}} \frac{du}{dx} - \frac{3u}{(x+3)^{\frac{1}{2}}} = -\delta(x-\xi).$$

При $x < \xi$ общее решение (6.35) этого уравнения удовлетворяет граничному условию (6.32) при $C_2 = 0$, т. е.

$$G(x, \xi) = C_1 u_1(x), \quad u_1(x) = (x+3)^{\frac{3}{2}}.$$

Аналогично, при $x > \xi$

$$G(x, \xi) = C_2 u_2(x), \quad u_2(x) = (x+3)^{-2}.$$

При $x = \xi$ из уравнения (6.31), содержащего обобщенные производные, следует, что (см. (10.15)) $[G]|_{\xi} = 0$, $[G_{\xi}]|_{\xi} = -\frac{1}{p(\xi)}$, или

$$\begin{cases} C_2 u_2(\xi) - C_1 u_1(\xi) = 0, \\ C_2 u_2'(\xi) - C_1 u_1'(\xi) = -\frac{1}{p(\xi)}. \end{cases}$$

Определитель системы (с неизвестными C_1 и C_2) не равен нулю, так как является определителем Вронского W системы линейно независимых решений $u_1(x)$ и $u_2(x)$, следовательно,

$$C_1 = -\frac{u_2(\xi)}{p(\xi)W}, \quad C_2 = -\frac{u_1(\xi)}{p(\xi)W}.$$

Таким образом,

$$G(x, \xi) = -\frac{1}{p(\xi)W} \begin{cases} u_1(x) u_2(\xi), & a \leq x \leq \xi, \\ u_2(x) u_1(\xi), & \xi \leq x \leq b, \end{cases} \quad (6.36)$$

или

$$G(x, \xi) = \frac{2}{7} \begin{cases} \frac{(x+3)^{\frac{3}{2}}}{(\xi+3)^2}, & -2 \leq x \leq \xi, \\ \frac{(\xi+3)^{\frac{3}{2}}}{(x+3)^2}, & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

В задачах 6.291–6.303 построить функцию Грина оператора $\mathcal{L}$ на промежутке ($a < x < b$), на концах которого заданы однородные граничные условия.

6.291. $\mathcal{L} = -\frac{d}{dx}x^2\frac{d}{dx}, \quad u(1) = u(2) = 0.$

6.292. $\mathcal{L} = -\frac{d}{dx}(1-x^2)\frac{d}{dx}, \quad u(0) = 0, \quad |u(1)| < \infty.$

6.293. $\mathcal{L} = -\frac{d}{dx}(1+\sin x)\frac{d}{dx}, \quad u'(0) - u(0) = 0, \quad 2u'\left(\frac{\pi}{2}\right) + u\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0.$

6.294. $\mathcal{L} = -\frac{d}{dx}(\sin x + \cos x)\frac{d}{dx},$
 $\left|u\left(-\frac{\pi}{4}\right)\right| < \infty, \quad u'\left(\frac{\pi}{4}\right) + u\left(\frac{\pi}{4}\right) = 0.$

6.295. $\mathcal{L} = -\frac{d}{dx}(\sin^4 x)\frac{d}{dx}, \quad u'\left(\frac{\pi}{4}\right) - u\left(\frac{\pi}{4}\right) = 0, \quad u'\left(\frac{3\pi}{4}\right) = 0.$

6.296. $\mathcal{L} = -\frac{d}{dx}e^{x^2-2x}\frac{d}{dx}, \quad u'(1) - \frac{2}{\sqrt{\pi}}u(1) = 0, \quad u(2) = 0.$

6.297. $\mathcal{L} = -\frac{d}{dx}(1+x)\frac{d}{dx} + \frac{1}{4(1+x)},$
 $|u(-1)| < \infty, \quad u'(0) + \frac{1}{2}u(0) = 0.$

6.298. $\mathcal{L} = -\frac{d}{dx}(1-x)\frac{d}{dx} + \frac{1}{1-x}, \quad u'(0) - u(0) = 0, \quad |u(1)| < \infty.$

$$6.299. \mathcal{L} = -\frac{d}{dx}(1+x)^{-3} \frac{d}{dx} + \frac{5}{(1+x)^5}, \quad u'(-1)=0, \quad u'(0)+u(0)=0.$$

$$6.300. \mathcal{L} = -\frac{d}{dx}x^{-5} \frac{d}{dx} + \frac{16}{x^7}, \quad u'(1)-u(1)=0, \quad u'(2)+u(2)=0.$$

$$6.301. \mathcal{L} = -\frac{d}{dx}x \frac{d}{dx} + \frac{1}{4x}, \quad u(1)=u'(2)=0.$$

$$6.302. \mathcal{L} = -\frac{d}{dx}(1+x^2) \frac{d}{dx} + 2, \quad u(0)=0, \quad u'(1)+u(1)=0.$$

$$6.303. \mathcal{L} = -\frac{d}{dx} \frac{e^x}{x(2+x)} \frac{d}{dx} + \frac{2(1+x)e^x}{x^2(2+x)^2}, \quad u(0)=0, \quad u'(2)+u(2)=0.$$

Пример 6.21. Если $\lambda = 0$ — собственное значение оператора $\mathcal{L}$ (6.30), то определение (6.31) функции Грина не годится. Дело в том, что задача $\mathcal{L}u = f$, $u \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}$, в общем случае не имеет решения. Для ее разрешимости необходимо, чтобы функция $f(x)$ и собственная функция $u_0(x)$, соответствующая собственному значению $\lambda = 0$ (т. е. нетривиальное решение задачи $\mathcal{L}u = 0$, $u \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}$), были ортогональны. Действительно, в силу эрмитовости оператора

$$(f, u_0) = (\mathcal{L}u, u_0) = (u, \mathcal{L}u_0) = 0.$$

Для ортогонализации в правую часть уравнения (6.31) следует ввести слагаемое, заведомо не ортогональное функции $u_0(x)$: $-\delta(x-\xi) + C_0 u_0(x)$. Из ортогональности $(\delta(x-\xi) + C_0 u_0, u_0) = 0$ вытекает, что константа $C_0 = u_0 \xi / \|u_0\|^2$.

Таким образом, функция Грина удовлетворяет уравнению

$$\mathcal{L}G = -\delta(x-\xi) + \frac{u_0(\xi)u_0(x)}{\|u_0\|^2}, \quad x \in \Delta, \quad \xi \in \Delta, \quad (6.37)$$

и тем же граничным условиям, что и $u_0(x)$. Если $u_1(x)$, $u_2(x)$ есть фундаментальная система решений уравнения $\mathcal{L}u = 0$, а $U(x)$ при этом — частное решение неоднородного уравнения $\mathcal{L}u = C_0 u_0$, то

$$G(x, \xi) = \begin{cases} B_1 u_1(x) + B_2 u_2(x) + U(x), & a \leq x \leq \xi, \\ C_1 u_1(x) + C_2 u_2(x) + U(x), & \xi \leq x \leq b. \end{cases}$$

После применения граничных условий при $x = a$ и $x = b$ остаются две неизвестные константы. Соотношения $[G]_{\xi} = 0$ и $[G_x]_{\xi} = -1/p(\xi)$ дают лишь одно уравнение для определения этих констант. Поэтому одну из них можно выбрать произвольно или связать обе каким-либо дополнительным условием.

В качестве такового берут условие ортогональности $(f, u_0) = 0$, которое сохраняет симметрию функции Грина ([79], т. 2).

Множество собственных значений оператора $\mathcal{L} = -\frac{d^2}{dx^2}$, определенного на функциях $u(x) \in C^2(\Delta) \cap C^1(\overline{\Delta})$, $\Delta = (0, 1)$, $u'(0) = u'(1) = 0$, содержит собственное значение $\lambda = 0$, которому соответствует собственная функция $u_0(x) = 1$. Функция Грина оператора $\mathcal{L}$ удовлетворяет уравнениям

$$\begin{aligned} G_{xx} &= -\delta(x - \xi) + 1, & 0 < x < 1, \\ G_x|_{x=0} &= G_x|_{x=1} = 0, & (G, u_0) = 0. \end{aligned}$$

Это определение имеет следующий физический смысл: статическое состояние стержня со свободными концами или стационарное распределение температуры в теплоизолированном стержне возможны, если суммарное действие источников равно нулю. Решения уравнения (6.38) при $x < \xi$ и $x > \xi$, удовлетворяющие граничным условиям, формируют функцию Грина

$$G(x, \xi) = \begin{cases} \frac{x^2}{2} + B, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \frac{x^2}{2} - x + C, & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

Соотношения $[G]|_{\xi} = 0$ и $(G, u_0) = 0$ представляют собой систему уравнений относительно B и C :

$$\begin{cases} B - C = -\xi, \\ (B - C)\xi + C = \frac{1}{3} - \frac{\xi^2}{2}, \end{cases}$$

решение которой $B = \frac{\xi^2}{2} - \xi + \frac{1}{3}$, $C = \frac{\xi^2}{2} + \frac{1}{3}$. Таким образом,

$$G(x, \xi) = \frac{1}{2} \cdot \begin{cases} x^2 + (\xi - 1)^2 - \frac{1}{3}, & 0 \leq x \leq \xi, \\ (x - 1)^2 + \xi^2 - \frac{1}{3}, & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

В задачах 6.304–6.308 построить функцию Грина оператора $\mathcal{L}$.

6.304. $\mathcal{L} = -\frac{d}{dx}x\frac{d}{dx}$, $0 < x < 1$, $|u| < \infty$, $u'(1) = 0$.

6.305. $\mathcal{L} = -\frac{d}{dx}(1 - x^2)\frac{d}{dx}$, $-1 < x < 1$, $|u| < \infty$.

$$\mathbf{6.306.} \quad \mathcal{L} = -\left(\frac{d}{dx}x\frac{d}{dx} + 1\right), \quad 0 < x < \pi, \quad u(0) = u'(\pi) = 0.$$

$$\mathbf{6.307.} \quad \mathcal{L} = -\left(\frac{d}{dx}x\frac{d}{dx} + 1\right), \quad 0 < x < \frac{\pi}{2}, \quad u(0) = u'\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0.$$

$$\mathbf{6.308.} \quad \mathcal{L} = -\left(\frac{d}{dx}x\frac{d}{dx} + 1\right), \quad 0 < x < \pi, \quad u'(0) = u'(\pi) = 0.$$

Пример 6.22. Если $G(x, \xi)$ — функция Грина оператора $\mathcal{L}$, определенного выражением (6.30), и $\lambda = 0 \in \Lambda$, то решение одномерной краевой задачи

$$\mathcal{L}u = f, \quad u \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}$$

выражается интегралом

$$u(x) = \int_a^b G(x, \xi) f(\xi) d\xi. \quad (6.38)$$

Пусть дана краевая задача

$$u'' - 2xu' - (1 - x^2)u = (x^2 + 1)e^{x^2}, \quad 0 < x < 1, \quad (6.39)$$

$$u'(0) = u(1) = 0. \quad (6.40)$$

Чтобы воспользоваться выражением (6.38), нужно уравнение (6.39), имеющее форму

$$a(x)u'' + b(x)u' + c(x)u = F(x), \quad (6.41)$$

преобразовать к виду $\mathcal{L}u = f$, т. е.

$$\frac{d}{dx}p(x)\frac{du}{dx} - q(x)u = -f(x). \quad (6.42)$$

Сравнение коэффициентов уравнения (6.41) и уравнения (6.42), записанного в виде $p(x)u'' + p'(x)u' - q(x)u = f(x)$, показывает, что

$$\frac{b}{a} = \frac{p'}{p}, \quad \frac{c}{a} = -\frac{q}{p}, \quad \frac{F}{a} = -\frac{f}{p},$$

откуда

$$p = e^{\int \frac{b}{a} dx}, \quad q = -\frac{pc}{a}, \quad f = -\frac{pF}{a}. \quad (6.43)$$

В данном случае $p(x) = e^{-x^2}$, $q(x) = (1 - x^2)e^{-x^2}$, $f(x) = -(1 + x^2)$.

Для построения функции Грина нужно найти общее решение уравнения

$$u'' - 2xu' - (1 - x^2)u = 0.$$

Замена $u(x) = \exp\left(\int v(x)dx\right)$ преобразует уравнение к виду

$$v' + v^2 - 2xv - 1 + x^2 = 0.$$

Подстановка $v(x) = Ax^k$ приводит к равенству

$$A k x^{k-1} + A^2 x^{2k} - 2A x^{k-1} - 1 + x^2 = 0,$$

которое становится тождеством при $A = 1$, $k = 1$. Отсюда следует, что $u(x) = \exp(x^2/2)$ — частное решение уравнения. Если известно одно решение $u_1(x)$ уравнения

$$\frac{d}{dx}p(x)\frac{du}{dx} - q(x)u = 0,$$

то построение общего решения $u(x)$ сводится к квадратурам (это вытекает из формулы Остроградского–Лиувилля)

$$u = u_1 \left(C_1 \int \frac{dx}{p u_1^2} + C_2 \right). \quad (6.44)$$

Следовательно,

$$u(x) = C_1 e^{\frac{x^2}{2}} \int \frac{dx}{p(x)e^{x^2}} + C_2 e^{\frac{x^2}{2}} = C_1 x e^{\frac{x^2}{2}} + C_2 e^{\frac{x^2}{2}}.$$

Граничным условиям (6.40) удовлетворяют частные решения: $u_1(x) = \exp(x^2/2)$ при $x < \xi$ и $u_2(x) = (1-x)\exp(x^2/2)$ при $x > \xi$. Таким образом, согласно формуле (6.36)

$$G(x, \xi) = e^{\frac{x^2 + \xi^2}{2}} \cdot \begin{cases} 1 - \xi, & 0 \leq x \leq \xi, \\ 1 - x, & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

Решение задачи завершается вычислением интеграла (6.38):

$$\begin{aligned} u(x) &= -e^{\frac{x^2}{2}}(1-x) \int_0^x (1+\xi^2)e^{\frac{\xi^2}{2}} d\xi - e^{\frac{x^2}{2}} \int_x^1 (1-\xi)(1+\xi^2)e^{\frac{\xi^2}{2}} d\xi = \\ &= -e^{\frac{x^2}{2}}(1-x) \int_0^x d\left(\xi e^{\frac{\xi^2}{2}}\right) - e^{\frac{x^2}{2}} \int_x^1 (1-\xi)d\left(\xi e^{\frac{\xi^2}{2}}\right) = e^{x^2} - e^{\frac{x^2}{2}}. \end{aligned}$$

Методом функции Грина найти решения одномерных краевых задач 6.309–6.321 на промежутке $a < x < b$, на концах которого заданы однородные граничные условия.

6.309. $2(x-1)^2 u'' + 3(x-1)u' - u = \sqrt{x-1},$
 $|u(1)| < \infty, \quad u'(2) + u(2) = 0.$

$$\mathbf{6.310.} \quad x^2 u'' - 2u = x^4, \quad |u(0)| < \infty, \quad u(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.311.} \quad 3x^2 u'' - 2xu' - 2u = 5x^3 - 3x^2 \sqrt[3]{x^2}, \\ |u(0)| < \infty, \quad u(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.312.} \quad (\sin x + \cos x)u'' + (\sin x - \cos x)u' = (\sin x + \cos x)^3, \\ u\left(\frac{\pi}{4}\right) = u\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0.$$

$$\mathbf{6.313.} \quad x^2 u'' + 2xu' - 6u = x(3 - 4 \ln x), \\ |u(0)| < \infty, \quad u(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.314.} \quad u'' + 2tg xu' = tg x, \quad u(0) = u'\left(\frac{\pi}{4}\right) = 0.$$

$$\mathbf{6.315.} \quad u'' + 2ctg xu' = 2ctg x, \quad u\left(\frac{\pi}{4}\right) = u\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0.$$

$$\mathbf{6.316.} \quad ch xu'' + e^x u' = 1, \quad u(0) = u'(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.317.} \quad xu'' + 2u' = e^{-x^2}, \quad |u(0)| < \infty, \quad u'(1) + u(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.318.} \quad (2-x)^3 u'' + 3(2-x)^2 u' - 5(2-x)u = \frac{1}{2}(8x^2 - 17x - 10), \\ 2u'(0) - u(0) = 0, \quad 2u'(1) + u(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.319.} \quad u'' + 2(x+1)u' = e^{-x^2}, \quad u(-1) = u'(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.320.} \quad (x \cos x - \sin x)u'' + x \sin x u' - \sin x u = -x, \\ u'\left(-\frac{\pi}{2}\right) - u\left(-\frac{\pi}{2}\right) = 0, \quad u'(0) = 0.$$

$$\mathbf{6.321.} \quad u'' - 2xu' - 2u = 2x - 1, \quad u'(0) = u(1) = 0.$$

Пример 6.23. Пусть $G(x, \xi)$ — функция Грина оператора $\mathcal{L}$, определенного выражением (6.30), и $\lambda = 0 \in \Lambda$, тогда задача на собственные значения

$$\mathcal{L}u = \lambda \rho u, \quad u \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}, \quad (6.45)$$

где $\rho(x) > 0$, $\rho(x) \in C(\overline{\Delta})$, эквивалентна интегральному уравнению

$$u(x) = \lambda \int_a^b G(x, \xi) \rho(\xi) u(\xi) d\xi. \quad (6.46)$$

Для демонстрации методики перехода к уравнению (6.46) предлагается задача на собственные значения, определенная на промежутке $1 < x < \frac{3}{2}$:

$$x^2(1-2\ln x)u'' + x(1+2\ln x)u' - 4u + \lambda x^4(1-2\ln x)^2u = 0, \quad (6.47)$$

$$u(1) = u'\left(\frac{3}{2}\right) = 0. \quad (6.48)$$

Преобразование уравнения (6.47) к виду

$$\frac{d}{dx}p(x)\frac{du}{dx} - q(x)u + \lambda\rho(x)u = 0$$

осуществляется с помощью формул (6.43), согласно которым

$$p(x) = \frac{1}{x(1-2\ln x)}, \quad q(x) = \frac{4}{x^3(1-2\ln x)^2}, \quad \rho(x) = x.$$

Чтобы построить функцию Грина задачи (6.47)–(6.48), нужно найти общее решение уравнения

$$x^2(1-2\ln x)u'' + x(1+2\ln x)u' - 4u = 0.$$

Это уравнение имеет частное решение вида $u_1(x) = x^k$. Действительно, при подстановке x^k в уравнение получается равенство $2k(k-2)\ln x - (k^2-4) = 0$, которое становится тождеством при $k = 2$. Располагая частным решением, можно найти общее решение по формуле (6.44):

$$u(x) = C_1 x^2 \int \frac{dx}{x^4 p(x)} + C_2 x^2 = C_1 \ln x + C_2 x^2.$$

Граничным условиям (6.48) удовлетворяют решения

$$\begin{aligned} u_1(x) &= \ln x, & x < \xi, \\ u_2(x) &= 2x^2 - 9\ln x, & \xi < x. \end{aligned}$$

Функция Грина определяется выражением (6.36):

$$G(x, \xi) = \frac{1}{2} \cdot \begin{cases} (2\xi^2 - 9\ln \xi) \ln x, & 1 \leq x \leq \xi, \\ (2x^2 - 9\ln x) \ln \xi, & \xi \leq x \leq \frac{3}{2}. \end{cases}$$

Итак, задача Штурма–Лиувилля (6.49), (6.50) эквивалентна интегральному уравнению

$$u(x) = \lambda \int_1^{\frac{3}{2}} G(x, \xi) \xi u(\xi) d\xi.$$

Методом функции Грина свести задачи 6.322–6.337 на собственные значения к эквивалентным интегральным уравнениям.

$$\mathbf{6.322.} \quad x^2 u'' + 4xu' - 4u + \lambda u = 0, \quad 1 < x < 4, \\ u'(1) - u(1) = 0, \quad u'(4) + u(4) = 0.$$

$$\mathbf{6.323.} \quad u'' + u' + \lambda x^2 e^{-x} u = 0, \quad 0 < x < 1, \\ u(0) = 0, \quad u'(1) + u(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.324.} \quad (x^2 + 2)u'' + 2xu' + \lambda xu = 0, \quad 0 < x < 1, \\ u(0) = u'(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.325.} \quad u'' + 2u' + \lambda e^{-2x} u = 0, \quad 0 < x < \pi, \\ u(0) = u'(\pi) = 0.$$

$$\mathbf{6.326.} \quad u'' + u' + \lambda x^3 u = 0, \quad 0 < x < \frac{\pi}{2}, \\ u'(0) - u(0) = 0, \quad u'\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0.$$

$$\mathbf{6.327.} \quad u'' + 5u' - 6u + \lambda x e^{-x} u = 0, \quad 0 < x < 1, \\ u(0) = 0, \quad u'(1) + 6u(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.328.} \quad u'' - 2u' - 8u + \lambda e^x u = 0, \quad 0 < x < 1, \\ u(0) = 0, \quad u'(1) + 2u(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.329.} \quad x^2 u'' + 2xu' - 12u + \lambda xu = 0, \quad 0 < x < 1, \\ u(0) = u(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.330.} \quad u'' - u' + \lambda \sqrt{x} e^x u = 0, \quad 0 < x < 1, \\ u(0) = 0, \quad u'(1) + u(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.331.} \quad u'' + 4 \operatorname{ctg} x u' + \lambda x^3 u = 0, \quad 0 < x < \frac{\pi}{2}, \\ |u(0)| < \infty, \quad u\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0.$$

$$\mathbf{6.332.} \quad 8u'' - 2xu' - 2u + \lambda u = 0, \quad 0 < x < 1, \\ u'(0) = u(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.333.} \quad u'' + 2xu' + \lambda u = 0, \quad -1 < x < 1, \\ u(-1) = u(1) = 0.$$

$$\mathbf{6.334.} \quad x^2(1 - \ln x)u'' + xu' - u + \lambda x^3(1 - \ln x)^3 u = 0, \quad 1 < x < e, \\ u'(1) - u(1) = 0, \quad u'(e) = 0.$$

$$\mathbf{6.335.} \quad (x+1)u'' + xu' - u + \lambda(x+1)^2 u = 0, \quad 0 < x < 4, \\ u(0) = 0, \quad u'(4) + u(4) = 0.$$

$$\mathbf{6.336.} \quad u^{(4)} - \lambda u = 0, \quad 0 < x < l, \\ u(0) = u'(0) = u''(l) = u'''(l) = 0.$$

$$\mathbf{6.337.} \quad u^{(4)} - \lambda u = 0, \quad 0 < x < l, \\ u(0) = u'(0) = u(l) = u'(l) = 0.$$

6.338. Пусть $G(x, \xi)$ — функция Грина задачи

$$\frac{d}{dx}p(x)\frac{du}{dx} - q(x)u + \lambda\rho(x)u = 0, \quad a < x < b, \\ \alpha_1 u'(a) - \beta_1 u(a) = 0, \quad \alpha_2 u'(b) + \beta_2 u(b) = 0, \\ \alpha_i \geq 0, \quad \beta_i \geq 0, \quad \alpha_i + \beta_i > 0, \quad i = 1, 2,$$

собственные значения которой $\lambda_n > 0$, $n \in \mathbb{N}$. Доказать, что наименьшее собственное значение

$$\lambda_1 \geq \left[\iint_a^b G^2(x, \xi) \rho(x) \rho(\xi) dx d\xi \right]^{-\frac{1}{2}}.$$

Пример 6.24. Если $\lambda = 0$ — собственное значение оператора $\mathcal{L}$ (6.30), то для вывода интегрального уравнения, эквивалентного задаче на собственные значения

$$\mathcal{L}u = \lambda u, \quad u \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}},$$

следует переписать эту задачу в равносильной форме

$$(\mathcal{L} + \mu)u = (\lambda + \mu)u, \quad u \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}, \quad \mu > 0.$$

Построение функции Грина $G_\mu(x, \xi)$ оператора $\mathcal{L}_\mu = \mathcal{L} + \mu$, собственные значения которого положительны, дано в примере 6.12, а соответствующее интегральное уравнение имеет вид

$$u(x) = (\lambda + \mu) \int_a^b G_\mu(x, \xi) \rho(\xi) d\xi.$$

Задача на собственные значения

$$\begin{aligned} u'' + \lambda u &= 0, \quad 0 < x < 1, \\ u'(0) &= u'(1) = 0 \end{aligned}$$

имеет при $\lambda = 0$ нетривиальное решение $u_0(x) \equiv 1$, следовательно, $\lambda = 0$ — собственное значение. Собственные значения эквивалентной задачи

$$\begin{aligned} u'' - u + (\lambda + 1)u &= 0, \quad 0 < x < 1, \\ u'(0) &= u'(1) = 0 \end{aligned} \quad (6.49)$$

положительны, поэтому соответствующая функция Грина $G_1(x, \xi)$ удовлетворяет системе условий

$$\begin{aligned} G_{1xx} - G_1 &= -\delta(x - \xi), \quad 0 < x < l, \\ G_{1x}|_{x=0} &= G_{1x}|_{x=1} = 0. \end{aligned}$$

В данном случае $u_1(x) = \operatorname{ch} x$, $u_2(x) = \operatorname{ch}(1 - x)$ и согласно формуле (6.36)

$$G_1(x, \xi) = \frac{1}{\operatorname{sh}(1)} \cdot \begin{cases} \operatorname{ch}(1 - \xi) \operatorname{ch} x, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \operatorname{ch} \xi \operatorname{ch}(1 - x), & \xi \leq x \leq 1, \end{cases}$$

а интегральное уравнение, эквивалентное задаче (6.49), запишется в виде

$$u(x) = (\lambda + 1) \int_0^1 G_1(x, \xi) d\xi.$$

6.339. Получить интегральное уравнение, эквивалентное задаче на собственные значения для уравнения Лежандра

$$\begin{aligned} (1 - x^2)u'' - 2xu' + \lambda u &= 0, \quad x \in \Delta = (-1; 1), \\ u &\in C^2(\Delta) \cap C(\overline{\Delta}). \end{aligned}$$

6.340. Свести к эквивалентному интегральному уравнению задачу на собственные значения для уравнения Чебышева–Лагерра

$$xu'' + (1 + \alpha - x)u' + \lambda u = 0, \quad x \in \Delta = (0; +\infty), \quad \alpha \geq 0,$$

$$u \in C^2(\Delta) \cap C(\overline{\Delta}), \quad \int_0^\infty u^2 x^\alpha e^{-x} dx < \infty.$$

6.341. Получить интегральное уравнение, эквивалентное задаче на собственные значения для уравнения Чебышева–Эрмита

$$u'' - 2xu' + \lambda u = 0, \quad x \in \mathbb{R},$$

$$u \in C^2(\mathbb{R}), \quad \int_{-\infty}^{\infty} u^2 e^{-x^2} dx < \infty.$$

6.342. Для решения нелинейных уравнений применяется оператор Шредингера (см. главу 9)

$$\mathcal{L} = -\frac{d^2}{dx^2} + u(x), \quad \mathcal{M}_{\mathcal{L}} = \{\psi: \psi \in C^2(\mathbb{R})\},$$

в котором функция $u(x)$ удовлетворяют условиям

$$u(x) \in C^1(\mathbb{R}), \quad \lim_{|x| \rightarrow \infty} |x|^{m+\alpha} |u^{(m)}(x)| = 0, \quad (6.50)$$

где $\alpha > 0$, $m = 0, 1$. Решения $f^+(x, k)$ и $f^-(x, k)$ уравнения $\mathcal{L}\psi = k^2\psi$ при вещественных k , удовлетворяющие условиям

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} e^{ikx} f^- = 1, \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} e^{-ikx} f^+ = 1,$$

называются решениями Йоста. Доказать, что функции f^+ и f^- являются решениями интегральных уравнений

$$f^{\pm}(x, k) = e^{\pm ikx} + \frac{1}{k} \int_x^{\pm\infty} u(\xi) \sin k(\xi - x) f^{\pm}(\xi, k) d\xi. \quad (6.51)$$

6.343. Дан матричный оператор

$$\mathcal{L} = i \begin{pmatrix} D & -q(x) \\ r(x) & -D \end{pmatrix}, \quad D = \frac{d}{dx}, \quad (6.52)$$

определенный на функциях

$$\psi(x) = \begin{pmatrix} \psi_1(x) \\ \psi_2(x) \end{pmatrix} \in C^1(\mathbb{R}),$$

где $q(x)$ и $r(x)$ принадлежат множеству функций

$$f \in C^2(\mathbb{R}), \quad |f^{(m)}| \leq M e^{-2\beta_0|x|}, \quad \beta_0 > 0, \quad m = 0, 1, 2. \quad (6.53)$$

Решения Йоста уравнения $\mathcal{L}\psi = k^2\psi$ (при вещественных k) выделяются условиями

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} e^{-ikx} f^+(x, k) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, & \lim_{x \rightarrow -\infty} e^{ikx} f^-(x, k) &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \lim_{x \rightarrow +\infty} e^{ikx} \tilde{f}^+(x, k) &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, & \lim_{x \rightarrow -\infty} e^{-ikx} \tilde{f}^-(x, k) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Доказать, что функции $f^\pm$, $\tilde{f}^\pm$ удовлетворяют интегральным уравнениям

$$\begin{aligned} f^+(x, k) &= e^{ikx} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \int_x^\infty P(x, \xi, k) f^+(\xi, k) d\xi, \\ f^-(x, k) &= e^{-ikx} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \int_{-\infty}^x P(x, \xi, k) f^-(\xi, k) d\xi, \\ \tilde{f}^+(x, k) &= e^{-ikx} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} - \int_x^\infty P(x, \xi, k) \tilde{f}^+(\xi, k) d\xi, \\ \tilde{f}^-(x, k) &= e^{ikx} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \int_{-\infty}^x P(x, \xi, k) \tilde{f}^-(\xi, k) d\xi, \end{aligned} \tag{6.54}$$

где

$$P(x, \xi, k) = \begin{pmatrix} 0 & q(\xi)e^{ik(\xi-x)} \\ r(\xi)e^{-ik(\xi-x)} & 0 \end{pmatrix}.$$

6.344. Показать, что частоты собственных колебаний однородной струны ($0 < x < l$) с закрепленными концами связаны с характеристическими числами уравнения

$$u(x) = \mu \int_0^1 K(x, \xi) u(\xi) d\xi, \quad K(x, \xi) = \begin{cases} (1 - \xi)x, & 0 \leq x \leq \xi, \\ (1 - x)\xi, & \xi \leq x \leq 1, \end{cases}$$

соотношением $\omega_n^2 = \frac{a^2}{l^2} \mu_n$, $n \in \mathbb{N}$.

6.345. Однородный цилиндрический стержень ($0 < x < l$), один конец $x = 0$ которого закреплен, а другой — свободен, совершает продольные колебания. Показать, что частоты собственных

колебаний $\omega_n = \sqrt{\frac{a}{l}} \mu_n$, где μ_n — характеристическое число уравнения

$$u(x) = \mu \int_0^1 K(x, \xi) u(\xi) d\xi$$

с ядром

$$K(x, \xi) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \xi, & \xi \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (6.55)$$

6.346. Тяжелая струна, длина которой l , плотность ρ_0 , подвешена в поле тяжести за один из концов. Получить интегральное уравнение для описания колебаний струны и установить связь между частотами собственных колебаний и характеристическими числами уравнения.

6.347. Круглый вал ($0 < x < l$) с характеристиками $G(x)$, $I(x)$, $K(x)$ совершает крутильные колебания; торец $x = 0$ закреплен, а торец $x = l$ свободен. Вывести интегральное уравнение для определения собственных колебаний вала.

6.348. Тонкий однородный стержень ($0 < x < l$) с прямоугольным поперечным сечением (рис. 1.19, т. 1) совершает малые поперечные колебания в плоскости zOx . Свести задачу для определения собственных колебаний к интегральному уравнению, если: 1) торцы стержня закреплены; 2) торец $x = 0$ закреплен, а торец $x = l$ свободен.

6.349. Интеграл

$$A_m = \int_a^b K_m(\xi, \xi) d\xi,$$

где $K_m(\xi, \xi)$ — ядро оператора $\mathcal{K}^m$, $m \in \mathbb{N}$, называется m -м следом ядра $K(x, \xi)$. Приближенное вычисление наименьшего (по модулю) характеристического числа μ_1 ядра $K(x, \xi)$ основано на неравенствах (метод следов)

$$\frac{1}{\sqrt[m]{A_m}} \leq |\mu_1| \leq \sqrt{\frac{A_{2n}}{A_{2n+1}}}, \quad m = 2, 3, 4, \dots, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.56)$$

Вычислить приближенное значение (при $m = 2$, $n = 1$) частоты основного тона струны длиной l и сравнить с частотой, полу-

ченной методом Фурье, если: 1) один конец струны закреплен, а другой свободен (задача 2.6, т. 1); 2) струна подвешена в поле тяжести (задача 2.562, т. 1).

6.350. Применяя оценку (6.56) при $m = 2$, $n = 1$, найти приближенное значение частоты основного тона струны длины l , один конец которой закреплен, а другой свободен (см. задачу 1.45, т. 1); плотность струны $\rho(x) = \rho_0 \left(1 + \frac{x}{l}\right)$.

6.5. Ответы

6.1. $\tilde{G}(x, t) = e^{-ht} G(x, t)$, $h = \frac{R}{L}$, $a = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, где

$$G(x, t) = \frac{1}{2a} \eta \left(t - \frac{|x|}{a} \right). \quad (6.57)$$

У к а з а н и е. Замена $\tilde{G} = e^{-ht} G$ приводит к задаче из примера 6.1.

6.2. $\psi(x, t) = -\frac{a^2 Q}{\rho_0 S} G(x, t)$, где $G(x, t)$ имеет вид (6.57).

У к а з а н и е. См. задачу 1.289.

$$\mathbf{6.3.} \quad 1) G(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi a} \frac{\eta \left(t - \frac{r}{a} \right)}{\sqrt{(at)^2 - r^2}}, \quad r^2 = x^2 + y^2; \quad (6.58)$$

$$2) G(\mathbf{r}, t) = \frac{\delta \left(t - \frac{r}{a} \right)}{4\pi a^2 r}, \quad r^2 = x^2 + y^2 + z^2. \quad (6.59)$$

6.4. $\psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{a^2 Q}{\rho_0} G(\mathbf{r}, t)$, где $G(\mathbf{r}, t)$ имеет вид (6.58).

6.5. $\psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{a^2 Q}{\rho_0} G(\mathbf{r}, t)$, где $G(\mathbf{r}, t)$ имеет вид (6.59).

6.6. $u(x, t) = \frac{I}{\rho} G(x, t)$, где

$$G(x, t) = \frac{1}{2a} e^{-\beta t} I_0 \left(\beta \sqrt{t^2 - \frac{x^2}{a^2}} \right) \eta \left(t - \frac{|x|}{a} \right), \quad \beta = \frac{\alpha}{2\rho}. \quad (6.60)$$

У к а з а н и е. Применить преобразования Лапласа и Фурье; для определения оригинала воспользоваться ответом к задаче 3.26, п.1) и соответствием (3.32).

6.7. Функция Грина $G(x, t)$ имеет вид (6.60) при $\beta = \frac{R}{2L}$, $a = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

6.8. $G(x, t) = \frac{1}{2a} e^{-\beta t} I_0 \left(\alpha \sqrt{t^2 - \frac{x^2}{a^2}} \right) \eta \left(t - \frac{|x|}{a} \right)$,
где $\beta = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{G}{C} \right)$, $\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} - \frac{G}{C} \right)$.

У к а з а н и е. Решать так же, как задачу 6.6.

6.9. $u(x, t) = \frac{I}{\rho} G(x, t)$, где функция Грина

$$G(x, t) = \frac{1}{2a} J_0 \left(c \sqrt{t^2 - \frac{x^2}{a^2}} \right) \eta \left(t - \frac{|x|}{a} \right), \quad a^2 = \frac{T}{\rho}, \quad c^2 = \frac{k}{\rho}.$$

У к а з а н и е. Применить преобразование Лапласа и воспользоваться соотношением (3.110), т. 1.

6.10. $G(x, t) = \frac{1}{2a} I_0 \left(c \sqrt{t^2 - \frac{x^2}{a^2}} \right) \eta \left(t - \frac{|x|}{a} \right).$

У к а з а н и е. Применить преобразование Лапласа и воспользоваться соотношением (3.32), т. 1.

6.11. 1) $G(x, y, t) = \frac{1}{2\pi a^2} \frac{\cos \left(k \sqrt{t^2 - \frac{r^2}{a^2}} \right)}{\sqrt{t^2 - \frac{r^2}{a^2}}} \eta \left(t - \frac{r}{a} \right);$

2) $G(x, y, t) = \frac{1}{2\pi a^2} \frac{ch \left(k \sqrt{t^2 - \frac{r^2}{a^2}} \right)}{\sqrt{t^2 - \frac{r^2}{a^2}}} \eta \left(t - \frac{r}{a} \right), \quad \text{где } r = \sqrt{x^2 + y^2}.$

У к а з а н и е. Применить преобразование Фурье; при восстановлении прообраза употребить формулы (3.68), (3.69) в т. 1.

6.12. 1) $G(x, y, z, t) = \frac{1}{4\pi a^2} \left[\frac{\delta \left(t - \frac{r}{a} \right)}{r} - \frac{k}{a} \frac{J_1 \left(k \sqrt{t^2 - \frac{r^2}{a^2}} \right)}{\sqrt{t^2 - \frac{r^2}{a^2}}} \eta \left(t - \frac{r}{a} \right) \right],$

2) $G(x, y, z, t) = \frac{1}{4\pi a^2} \left[\frac{\delta \left(t - \frac{r}{a} \right)}{r} + \frac{k}{a} \frac{I_1 \left(k \sqrt{t^2 - \frac{r^2}{a^2}} \right)}{\sqrt{t^2 - \frac{r^2}{a^2}}} \eta \left(t - \frac{r}{a} \right) \right],$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

У к а з а н и е. Применить преобразования Лапласа и Фурье. В интеграле обратного преобразования Фурье перейти к сферическим координатам. Переход к оригиналу $f(t) \leftrightarrow F(p) = \exp(-\tau \sqrt{p^2 \pm 1})$, где $\tau > 0$, осуществляется с помощью теоремы дифференцирования изображения, соотношения (3.32) или (3.110) и теоремы дифференцирования оригинала (т. 1).

6.13. $G(x, t) = \frac{\eta(t)}{2\pi a} \int_{-\infty}^{\infty} \sin a \lambda^2 t e^{i\lambda x} \frac{d\lambda}{\lambda^2}, \quad a^2 = \frac{EJ}{\rho S}.$

6.14. $G(x, \xi, t) = \begin{cases} \frac{a_1 E_2}{a_2 (a_1 E_2 + a_2 E_1)} \eta \left(t + \frac{x}{a_1} - \frac{\xi}{a_2} \right), & x \leq 0, \xi \geq 0, \\ \frac{a_1 E_2 - a_2 E_1}{2a_2 (a_1 E_2 + a_2 E_1)} \eta \left(t - \frac{x + \xi}{a_2} \right) + \frac{1}{2a_2} \eta \left(t - \frac{|x - \xi|}{a_2} \right), & x \geq 0, \xi \geq 0. \end{cases}$

Если $\xi \leq 0$, то $G(x, \xi, t)$ получается из приведенного выражения заменами: $\xi \rightarrow -\xi$, $x \rightarrow -x$, $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 1$.

$$6.15. \quad u(x, t) = \frac{I}{\rho} \tilde{G}(x, t) = \frac{1}{\rho} \cdot \begin{cases} \left[1 - e^{-h\left(t - \frac{|\xi - x|}{a}\right)} \right] G(x - \xi, t), & x, \xi \leq 0, \\ G(x - \xi, t) - e^{-h\left(t - \frac{|x + \xi|}{a}\right)} G(x + \xi, t), & x, \xi \geq 0, \end{cases}$$

где $h = \frac{2a\rho}{m}$, $a^2 = \frac{I}{\rho}$, а функция $G(x, t)$ определена выражением (6.57).

$$6.16. \quad u(x, t) = Q \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \cdot \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{L_1 C_2} + \sqrt{L_2 C_1}} \delta\left(t - \frac{\xi}{a_2} + \frac{x}{a_1}\right), & x < 0, \\ \delta\left(t - \frac{|x - \xi|}{a_2}\right) - \frac{1}{2} \frac{\sqrt{L_2 C_1} - \sqrt{L_1 C_2}}{\sqrt{L_2 C_1} + \sqrt{L_1 C_2}} \delta\left(t - \frac{x + \xi}{a_2}\right), & 0 < x, \end{cases}$$

где $\xi > 0$. Если $\xi < 0$, то в полученном выражении нужно заменить $x \rightarrow -x$, $\xi \rightarrow -\xi$, $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 1$.

$$6.17. \quad u(x, t) = \frac{F_0}{2\alpha a \rho} \left[1 - e^{-\alpha\left(t - \frac{|x|}{a}\right)} \right] \eta\left(t - \frac{|x|}{a}\right).$$

$$6.18. \quad u(x, t) = \frac{F_0 \left[1 - \cos \omega \left(t - \frac{|x|}{a} \right) \right]}{2a\omega\rho} \eta\left(t - \frac{|x|}{a}\right).$$

$$6.19. \quad u(x, t) = \frac{F_0}{2a\rho} \cdot \begin{cases} 0, & t \leq \frac{|x|}{a}, \\ t_0, & \frac{|x|}{a} \leq t < t_0 + \frac{|x|}{a}, \\ t - \frac{|x|}{a}, & t_0 + \frac{|x|}{a} < t. \end{cases}$$

$$6.20. \quad \psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{a}{2\pi\rho_0} \int_0^t d\tau \int_{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| < a(t - \tau)} \frac{q(\mathbf{r}', \tau) d\mathbf{r}'}{\sqrt{a^2(t - \tau)^2 - |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2}}.$$

$$6.21. \quad 1) \quad \psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{a}{2\pi\rho_0} \int_0^{t - \frac{r}{a}} \frac{q(\tau) d\tau}{\sqrt{a^2(t - \tau)^2 - r^2}};$$

$$2) \quad \psi(\mathbf{r}, t) = \frac{q_0}{2\pi\rho_0} \ln \frac{at + \sqrt{a^2 t^2 - r^2}}{r} \eta\left(t - \frac{r}{a}\right), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

$$6.22. \quad \psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{a}{2\pi\rho_0} \int_0^{t^*} \frac{q(\tau) d\tau}{\sqrt{a^2(t - \tau)^2 - (\mathbf{r} - \mathbf{v}_0 \tau)^2}} \eta\left(t - \frac{r}{a}\right),$$

$$\text{где } t^* = t - \frac{(x - v_0 t)v_0 + a\sqrt{(x - v_0 t)^2 + (1 - \beta^2)y^2}}{a^2 - v_0^2}, \quad \beta = \frac{v_0}{a}, \quad \mathbf{v}_0 = v_0 \mathbf{e}_x.$$

У к а з а н и е. Применив функцию Грина (6.58), записать потенциал скоростей в виде

$$\psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{a}{2\pi\rho_0} \int_0^t \frac{\eta\left(t - \tau - \frac{\sqrt{(x - v_0 t)^2 + y^2}}{a}\right)}{\sqrt{a^2(t - \tau)^2 - (x - v_0 t)^2 - y^2}} q(\tau) d\tau.$$

Функция $h(\tau) = t - \tau - \frac{\sqrt{(x - v_0 t)^2 + y^2}}{a}$ убывает. Если $h(0) = t - \frac{r}{a} < 0$,

то $\psi = 0$; если $h(0) = t - \frac{r}{a} > 0$, то на промежутке $[0, t]$ функция $h(\tau)$ имеет один нуль $\tau = t^*$. Для $\xi = \frac{a}{t} - \tau$ получается уравнение

$$(a^2 - v_0^2)\xi^2 - 2v_0(x - v_0t)\xi - (x - v_0t)^2 - y^2 = 0,$$

положительный корень которого определяет t^* .

$$6.23. \quad \psi(\mathbf{r}, t) = \int_{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| \leq at} \frac{q(\mathbf{r}', t - \frac{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}{a})}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} d\mathbf{r}'.$$

$$6.24. \quad \psi(\mathbf{r}, t) = \frac{q_0\sqrt{\pi}}{8a^3\rho_0r} \{2\operatorname{erf}(\alpha r) - \operatorname{erf}[\alpha(r+at)] - \operatorname{erf}[\alpha(r-at)]\}.$$

$$6.25. \quad \psi(\mathbf{r}, t) = \frac{aq}{8\pi\rho_0rr'} \left[\eta\left(t - \frac{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}{a}\right) - \eta\left(t - \frac{r+r'}{a}\right) \right].$$

$$6.26. \quad 1) \psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{a}{8\pi\rho_0rr'} \int_{t-\frac{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}{a}}^{t-\frac{r+r'}{a}} q(\tau) d\tau;$$

$$2) \psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{aq_0}{8\pi\rho_0rr'} \left[\left(t - \frac{r+r'}{a}\right) \eta\left(t - \frac{r+r'}{a}\right) - \left(t - \frac{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}{a}\right) \eta\left(t - \frac{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}{a}\right) \right].$$

$$6.27. \quad \psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{4\pi\rho_0} \frac{Q(t - \frac{r}{a})}{r}.$$

$$6.28. \quad \psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{4\pi\rho_0r^*} Q\left(t - \frac{\beta(z - v_0t) + r^*}{a(1 - \beta^2)}\right),$$

где $\beta = \frac{v_0}{a}$, $\mathbf{v}_0 = v_0 \mathbf{e}_z$, $r^* = \sqrt{(z - v_0t)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + y^2)}$.

У к а з а н и е. Потенциал скоростей

$$u(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{4\pi\rho_0} \int_{\mathbb{R}^3} \frac{\delta\left[\mathbf{r}' - \mathbf{v}\left(t - \frac{|\mathbf{r}'-\mathbf{r}|}{a}\right)\right] Q\left(t - \frac{|\mathbf{r}'-\mathbf{r}|}{a}\right) d\mathbf{r}'}{|\mathbf{r}'-\mathbf{r}|}$$

после замен $\mathbf{r}' - \mathbf{r} = \mathbf{s}$ и $\mathbf{r} + \mathbf{s} - \mathbf{v}t + \frac{\mathbf{v}}{a}s = \mathbf{R}$, где $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y, z)$, $\mathbf{s} = \mathbf{s}(\xi, \eta, \zeta)$, $\mathbf{R} = \mathbf{R}(X, Y, Z)$, приобретает форму

$$u(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{4\pi\rho_0} \frac{Q\left(t - \frac{s(X, Y, Z)}{a}\right)}{s(X, Y, Z)} \frac{D(\xi, \eta, \zeta)}{D(X, Y, Z)} \bigg|_{\mathbf{R}=0}.$$

Преобразование $\mathbf{s}(\xi, \eta, \zeta) \rightarrow \mathbf{R}(X, Y, Z)$ имеет вид

$$x + \xi = X, \quad y + \eta = Y, \quad z + \zeta - vt = \beta\sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2} = Z,$$

откуда

$$\frac{D(\xi, \eta, \zeta)}{D(X, Y, Z)} = 1 + \frac{\beta\zeta}{s}.$$

Чтобы найти значение функции s при $\mathbf{R} = 0$, нужно воспользоваться формулой замены переменных: $\mathbf{r} + \mathbf{s} - \mathbf{v}t + \frac{\mathbf{v}}{a}s = 0$, или $\mathbf{s}^2 = \left(\mathbf{r} - \mathbf{v}t + \frac{\mathbf{v}}{a}s\right)^2 = 0$. Для s получается уравнение

$$s^2(1 - \beta^2) - 2\beta(z - vt)s - [x^2 + y^2 + (z - vt)^2] = 0,$$

решение которого

$$s = \frac{\beta(z - vt) + r^*}{1 - \beta^2}.$$

Значение функции ζ при $\mathbf{R} = 0$ определяется из уравнения, связывающего переменные ζ и Z : $\zeta = -(z - vt) - \beta s$.

$$6.29. \quad u(x, t) = \frac{1}{2a} \int_0^{t - \frac{|x|}{a}} d\tau \int_{x-a(t-\tau)}^{x+a(t-\tau)} f(\xi, \tau) J_0 \left(c \sqrt{(t-\tau)^2 - \frac{(\xi-x)^2}{a^2}} \right) d\xi.$$

$$6.30. \quad u(x, t) = \frac{1}{2a} \int_0^{t - \frac{|x|}{a}} f(\tau) J_0 \left(c \sqrt{(t-\tau)^2 - \frac{(\xi-x)^2}{a^2}} \right) d\xi \eta \left(t - \frac{|x|}{a} \right) d\xi,$$

где $c^2 = \frac{k}{\rho}$, $f(t) = \frac{F_0(t)}{\rho}$.

$$6.31. \quad u(x, t) = \begin{cases} f\left(t + \frac{x}{a_2}\right) + \frac{\sqrt{E_2 \rho_2} - \sqrt{E_1 \rho_1}}{\sqrt{E_2 \rho_2} + \sqrt{E_1 \rho_1}} f\left(t - \frac{x}{a_2}\right) \eta\left(t - \frac{x}{a_2}\right), & x \geq 0, \\ \frac{2\sqrt{E_2 \rho_2}}{\sqrt{E_2 \rho_2} + \sqrt{E_1 \rho_1}} f\left(t + \frac{x}{a_1}\right) \eta\left(t + \frac{x}{a_1}\right), & x < 0. \end{cases}$$

Волна не отражается, если $E_2 \rho_2 = E_1 \rho_1$.

$$6.32. \quad u(x, t) = \frac{u_0(x - at) + u_0(x + at)}{2} + \frac{k}{2a} \int_{x-at}^{x+at} u_0(\xi) J_1 \left(k \sqrt{t^2 - \frac{(\xi-x)^2}{a^2}} \right) \times \\ \times \frac{t d\xi}{\sqrt{t^2 - \frac{(\xi-x)^2}{a^2}}} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} u_1(\xi) J_0 \left(k \sqrt{t^2 - \frac{(\xi-x)^2}{a^2}} \right) d\xi.$$

$$6.33. \quad u(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi a} \frac{\partial}{\partial t} \int_{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| < at} \frac{u_0(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'}{\sqrt{a^2 t^2 - |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2}} + \frac{1}{2\pi a} \int_{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| < at} \frac{u_1(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'}{\sqrt{a^2 t^2 - |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2}},$$

$\mathbf{r} = x\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y$.

$$6.34. \quad \rho(0, t) = \rho_0 \left\{ 1 + \frac{s_0}{1 + a^2 t^2} \left[1 - \frac{at}{\sqrt{1 + a^2 t^2}} \ln(at + \sqrt{1 + a^2 t^2}) \right] \right\}.$$

$$6.35. \quad u(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi a^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|=at} \frac{u_0(\mathbf{r}')}{t} ds + \frac{1}{4\pi a^2} \int_{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|=at} \frac{u_1(\mathbf{r}')}{t} ds.$$

$$6.36. \quad \frac{\rho(r, t)}{\rho_0} = 1 + s(x, t), \quad \frac{s(x, t)}{s_0} = \frac{r - at}{2r} [\eta(r_0 + r - at) - \eta(|r_0 - r| - at)] + \\ + \eta(r_0 - r - at).$$

$$6.37. \quad u(x, t) = \frac{u_0}{\sqrt{4(1 + a^2 t^2)}} e^{-\frac{\alpha x^2}{4a(1 + \alpha^2 t^2)}} \cos \left[\frac{\alpha^2 x^2 t}{4a(1 + \alpha^2 t^2)} - \delta \right], \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{\alpha t}{1 + \sqrt{1 + \alpha^2 t^2}}.$$

У к а з а н и е. Построение решения связано с вычислением интегралов. Чтобы установить равенство

$$\int_0^\infty e^{kx^2} = \frac{i}{2} \sqrt{\frac{\pi}{k}}, \quad \frac{\pi}{2} \leq \varphi_0 = \arg k \leq \frac{3\pi}{2}, \quad (6.61)$$

нужно показать, что значение интеграла не изменится при деформации контура интегрирования в луч, образующий угол $(\pi - \varphi_0)/2$ с положительным направлением оси Ox (рис. 6.5, а). Для этого следует применить теорему Коши для сектора радиуса R , где подынтегральная функция аналитична. Интеграл

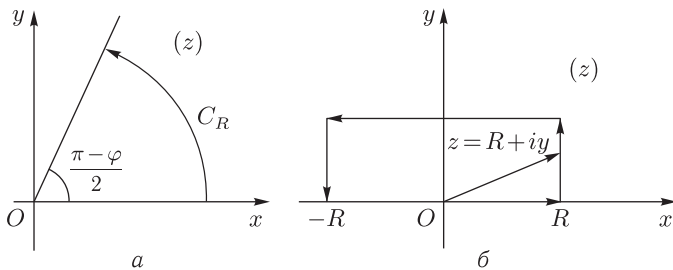


Рис. 6.5

по дуге C_R стремится к нулю при $R \rightarrow \infty$, что вытекает (после замены $2\varphi + \varphi_0 = \pi - \psi$) из неравенства $\cos \psi \geq 1 - \frac{2}{\pi}|\psi|$, $|\psi| < \frac{\pi}{2}$ и оценки

$$\begin{aligned} \left| \int_{C_R} e^{kz^2} dz \right| &\leq R \int_0^{\frac{\pi - \varphi_0}{2}} e^{|k|R^2 \cos(2\varphi + \varphi_0)} d\varphi = \\ &= R \int_0^{|\pi - \varphi_0|} e^{-|k|R^2 \cos \psi} d\psi \leq R \int_0^{|\pi - \varphi_0|} e^{-|k|R^2(1 - \frac{2}{\pi}\psi)} d\psi = O\left(\frac{1}{R}\right). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\int_0^\infty e^{kx^2} dx = \lim_{R \rightarrow \infty} \int_0^R e^{kz^2} dz.$$

Последний интеграл заменой $\sqrt{k}z = ir$ сводится, с точностью до множителя, к интегралу Пуассона, вычисление которого завершает доказательство соотношения (6.61). Из доказанного равенства следует, что

$$\int_{-\infty}^\infty e^{i\beta x} \cdot \begin{Bmatrix} \cos \alpha x^2 \\ \sin \alpha x^2 \end{Bmatrix} dx = \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} \left(\cos \frac{\beta^2}{4\alpha} \pm \sin \frac{\beta^2}{4\alpha} \right), \quad \alpha > 0. \quad (6.62)$$

Для вывода соотношения

$$\int_{-\infty}^\infty e^{k(x+b)^2} dx = i\sqrt{\frac{\pi}{k}}, \quad \frac{\pi}{2} \leq \arg k \leq \frac{3\pi}{2}, \quad (6.63)$$

где $b = b_1 + ib_2$ есть любое комплексное число, если $\operatorname{Re} k = \operatorname{Re}(k_1 + ik_2) = k_1 < 0$, а если $k_1 = 0$, $k_2 \neq 0$, то $b_2 k_2 \geq 0$, следует ввести новую переменную интегрирования $z = x + b$, что приводит к интегралу

$$\int_{-\infty + ib_2}^{\infty + ib_2} e^{kz^2} dz.$$

При деформации контура в действительную ось значение интеграла не изменится. Для доказательства надо применить теорему Коши к прямоугольнику (рис. 6.5, б) (внутри него подынтегральная функция аналитична) и убедиться, что интегралы по контурам L_{1R} , L_{2R} стремятся к нулю при $R \rightarrow \infty$. Например, для интеграла по L_{2R} это вытекает из оценки

$$\left| \int_{L_{2R}} e^{kz^2} dz \right| \leq e^{k_1(R^2 - b_2^2)} \left| \int_0^{b_2} e^{-2k_2 Ry} dy \right|.$$

Доказательство соотношения (6.63) следует теперь из (6.61).

С помощью (6.63) устанавливается следующий результат:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{\alpha \xi^2}{4a} + i \frac{(x-\xi)^2}{4at}} d\xi = i \sqrt{\frac{\pi}{k}} e^{-\frac{i \alpha x^2}{16ka^2t}}, \text{ где } \alpha \geq 0, a \geq 0, k = \frac{i - \alpha t}{4at}, \frac{\pi}{2} \leq \arg k < \pi.$$

$$6.38. G(x, \xi, t) = \frac{1}{2a} \left[\eta \left(t - \frac{|\xi - x|}{a} \right) \mp \eta \left(t - \frac{\xi + x}{a} \right) \right].$$

$$6.39. G(x, \xi, t) = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \frac{1}{2a} \eta \left(t - \frac{\xi + x}{a} \right) + \eta \left(t - \frac{|\xi - x|}{a} \right), \quad \alpha = \frac{ka}{ES}.$$

$$6.40. u(x, t) = \frac{1}{a\rho S} \left[1 - e^{-\frac{a\rho S}{m} \left(t - \frac{x}{a} \right)} \right] \cdot \eta \left(t - \frac{x}{a} \right).$$

$$6.41. G(x, \xi, t) = \frac{1}{2a} \eta \left(t - \frac{|\xi - x|}{a} \right) + \frac{1}{a} \left(\frac{1}{2} - e^{-h \left(t - \frac{\xi + x}{a} \right)} \right) \eta \left(t - \frac{\xi + x}{a} \right),$$

$$h = \frac{1}{aLC_0}, \quad a = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

$$6.42. q(t) = \frac{2u_0 h C_0}{h^2 + \omega^2} (h \sin \omega t - \omega \cos \omega t + \omega e^{-ht}), \quad h = \frac{1}{C_0} \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

$$6.43. u(x, t) = \mp f(at - x) \eta(at - x).$$

$$6.44. u(x, t) = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} f(at - x) \eta(at - x), \quad \alpha = \frac{ka}{ES}.$$

$$6.45. u(x, t) = \frac{F_0}{2a\omega\rho} \left\{ \left[1 - \cos \omega \left(t - \frac{|x - x_0|}{a} \right) \right] \eta \left(t - \frac{|x - x_0|}{a} \right) - \right.$$

$$\left. - \left[1 - \cos \omega \left(t - \frac{x + x_0}{a} \right) \right] \eta \left(t - \frac{x + x_0}{a} \right) \right\}.$$

$$6.46. \tilde{G}(x, \xi, t) = e^{-\beta t} [G(x - \xi, t) - G(x + \xi, t)], \quad \beta = \frac{R}{L}, \quad a = \frac{1}{\sqrt{CL}},$$

функция $G(x, t)$ определена выражением (6.57).

$$6.47. \tilde{G}(x, \xi, t) = G(x - \xi, t) + G(x + \xi, t) \quad \text{где } G(x, t) \text{ определена выражением (6.60), в котором } \beta = \frac{R}{2L}, \quad a^2 = \frac{1}{LC}.$$

$$6.48. u(x, t) = \mu \left(t - \frac{x}{a} \right) \eta \left(t - \frac{x}{a} \right).$$

Решение. Задача

$$u_{tt} = a^2 u_{xx}, \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(0, t) = \mu(t), \quad u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0,$$

эквивалентна (см. (10.15)) задаче с однородным граничным условием

$$u_{tt} = a^2 u_{xx} - a^2 \mu(t) \delta'(x), \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(0, t) = u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0.$$

Решение выражается через функцию Грина по формуле

$$u(x, t) = \int_0^t d\tau \int_0^{\infty} (-a^2 \mu(\tau) \delta'(\xi)) G(x, \xi, t - \tau) d\xi = a^2 \int_0^t \mu(\tau) G_\xi(x, 0, t - \tau) d\tau.$$

В данном случае (см. задачу 6.38) $G_\xi(x, 0, t - \tau) = \frac{1}{a^2} \delta \left(t - \tau - \frac{x}{a} \right)$, следовательно,

$$u(x, t) = \int_0^t \mu(\tau) \delta \left(t - \tau - \frac{x}{a} \right) d\tau = \mu \left(t - \frac{x}{a} \right) \eta \left(t - \frac{x}{a} \right).$$

$$6.49. \quad u(x, t) = \beta e^{-\beta(t - \frac{x}{a})} \int_0^{t - \frac{x}{a}} \mu(\tau) e^{\beta\tau} d\tau \cdot \eta\left(t - \frac{x}{a}\right), \quad \beta = \frac{k}{S\sqrt{\rho E}}, \quad a^2 = \frac{E}{\rho}.$$

$$6.50. \quad i(x, t) = E_0 \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\beta t} I_0\left(\beta \sqrt{t^2 - \frac{x^2}{a^2}}\right) \eta\left(t - \frac{|x|}{a}\right), \quad \beta = \frac{R}{2L}, \quad a^2 = \frac{1}{LC}.$$

$$6.51. \quad G(x, t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} e^{-\frac{x^2}{4a^2 t} - ht}.$$

У к а з а н и е. В уравнении для функции Грина сделать замену $G = g e^{-ht}$.

$$6.52. \quad u(x, t) = \frac{Q}{2} \sqrt{\frac{R}{\pi C(t - \tau)}} e^{-\frac{RC(x - \xi)^2}{4(t - \tau)}}.$$

У к а з а н и е. Вывести уравнение сохранения заряда $i_x + Cu_t + Gu = q(x, t)$, где $q(x, t)$ — плотность заряда.

$$6.53. \quad u(x, t) = \frac{Q}{2} \sqrt{\frac{R}{\pi C(t - \tau)}} e^{-\frac{RC(x - \xi)^2}{4(t - \tau)} - \frac{G}{C}(t - \tau)}.$$

$$6.54. \quad G(x, t) = \frac{q}{2\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt} - ht}.$$

$$6.55. \quad u(r, t) = \frac{Q e^{-\frac{r^2}{4Dt} - \alpha t}}{8(\pi Dt)^{\frac{3}{2}}}.$$

$$6.56. \quad G(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{(x - v_0 t)^2}{4Dt}}.$$

У к а з а н и е. Сделать замену $\xi = x - v_0 t$.

$$6.57. \quad u(x, t) = \frac{a^2 Q}{k_2 S_0} \cdot \begin{cases} \frac{2a_1 k_2}{a_1 k_2 + a_2 k_1} \cdot \frac{1}{2a_2 \sqrt{\pi t}} e^{-\frac{1}{4t} \left(\frac{x}{a_1} - \frac{\xi}{a_2}\right)^2}, \\ \frac{a_1 k_2 - a_2 k_1}{a_1 k_2 + a_2 k_1} \cdot \frac{1}{2a_2 \sqrt{\pi t}} e^{-\frac{(x + \xi)^2}{4a_2^2 t}} + \frac{1}{2a_2 \sqrt{\pi t}} e^{-\frac{(x - \xi)^2}{4a_2^2 t}}, \end{cases}$$

где 1-я строка соответствует $x \leq 0$, $\xi \geq 0$, 2-ая — $x > 0$, $\xi \geq 0$. При $\xi < 0$ решение получается заменами: $\xi \rightarrow -\xi$, $x \rightarrow -x$, $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 1$.

У к а з а н и е. Применить преобразование Лапласа.

$$6.58. \quad u(x, t) = Q \sqrt{\frac{R_2}{C_2}} \cdot \begin{cases} \frac{\sqrt{C_2 R_1}}{\sqrt{C_1 R_2} + \sqrt{C_2 R_1}} \frac{e^{-\frac{1}{4t} \left(\frac{\xi}{a_2} - \frac{x}{a_1}\right)^2}}{\sqrt{\pi t}}, & x < 0, \\ e^{-\frac{(x - \xi)^2}{4a_2^2 t}} - \frac{\sqrt{C_2 R_1}}{\sqrt{C_1 R_2} + \sqrt{C_2 R_1}} \frac{e^{-\frac{(x + \xi)^2}{4a_2^2 t}}}{2\sqrt{\pi t}}, & 0 < x, \end{cases}$$

где $\xi > 0$. Если $\xi < 0$, то в полученных выражениях надо сделать замены: $x \rightarrow -x$, $\xi \rightarrow -\xi$, $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 1$.

У к а з а н и е. Применить функцию Грина задачи 6.57).

6.59.

$$u(x, t) = \begin{cases} \frac{Q}{\rho CS} \left[G_1(x, \xi, t) + \frac{C\rho S}{C_0} e^{\alpha^2 t + \frac{\alpha}{a}|x + \xi|} \operatorname{Erf} \left(\frac{|x + \xi|}{2a\sqrt{t}} + \alpha\sqrt{t} \right) \right], \\ \frac{Q}{C_0} e^{\alpha^2 t + \frac{\alpha}{a}|x - \xi|} \operatorname{Erf} \left(\frac{|x - \xi|}{2a\sqrt{t}} + \alpha\sqrt{t} \right), \end{cases} \quad (6.64)$$

где 1-я строка соответствует $x, \xi \geq 0$, 2-я — $x, \xi \leq 0$,

$$G_1(x, \xi, t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} \left(e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2 t}} - e^{-\frac{(x+\xi)^2}{4a^2 t}} \right), \quad \alpha = \frac{2kS}{aC_0}.$$

$$\mathbf{6.60.} \quad u(x, t) = \frac{Q}{S} \cdot \begin{cases} G_2(x, \xi, t) - he^{2h|\xi+x|+4Dh^2t} \operatorname{Erf} \left(\frac{|x+\xi|}{2\sqrt{Dt}} + 2h\sqrt{Dt} \right), & x, \xi \leq 0 \\ he^{2h|x-\xi|+4Dh^2t} \operatorname{Erf} \left(\frac{|x-\xi|}{2\sqrt{Dt}} + 2h\sqrt{Dt} \right), & x, \xi \geq 0, \end{cases}$$

$$G_2(x, \xi, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \left(e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4Dt}} + e^{-\frac{(x+\xi)^2}{4Dt}} \right).$$

6.61.

$$u(r, t) = \frac{Q_0}{4\pi kt} I_0 \left(\frac{rr'}{2a^2 t} \right) e^{-\frac{r^2+r'^2}{4a^2 t}}. \quad (6.65)$$

У к а з а н и е. См. задачу 3.316.

6.62.

$$u(r, z, t) = \frac{Q}{C\rho} \frac{1}{(2a\sqrt{\pi t})^3} I_0 \left(\frac{rr'}{2a^2 t} \right) e^{-\frac{r^2+r'^2+z^2}{4a^2 t}}. \quad (6.66)$$

У к а з а н и е. Применить преобразования Фурье и Ганкеля.

$$\mathbf{6.64, 6.65, 6.66.} \quad n(r, t) = Q_0 \frac{e^{-\frac{r^2}{4vDt} - \Sigma_c vt}}{(4\pi Dvt)^{\frac{n}{2}}}, \quad \text{где } n = 1, 2, 3 \text{ соответственно.}$$

$$\mathbf{6.67, 6.68, 6.69.} \quad q(r, \tau) = \frac{Q_0 \varphi(u) e^{-\frac{r^2}{4\tau(u)}}}{(4\pi\tau(u))^{\frac{n}{2}}}, \quad \text{где } n = 1, 2, 3 \text{ соответственно, функция } \varphi(u) \text{ имеет вид (1.149), } \tau \text{ и } u \text{ связаны соотношением (1.66). Если } n = 3, \text{ то } r^2(u) = 6\tau(u).$$

У к а з а н и е. Средний квадрат

$$\overline{r^2(u)} = \int_0^\infty w(r, u) r^2 dr,$$

где $w(r, u) dr$ — вероятность того, что нейтрон приобретет летаргию u в сферическом слое $(r, r + dr)$, равная $w(r, u) dr = \frac{q(r, u) 4\pi r^2 dr}{\int_0^\infty q(r, u) 4\pi r^2 dr}$.

$$\mathbf{6.70.} \quad G(\mathbf{r}, t) = \left(-\frac{im}{2\pi\hbar t} \right)^{\frac{n}{2}} e^{\frac{imr^2}{2\hbar t}}.$$

$$\mathbf{6.71.} \quad u(x, t) = \frac{Q|x|}{2kS} \left[\psi \left(\frac{|x|}{2\sqrt{t}} \right) - \psi \left(\frac{|x|}{2\sqrt{t-t_0}} \right) \eta(t-t_0) \right], \quad \text{где}$$

$$\psi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\xi} e^{-\xi^2} - \operatorname{Erf} \xi. \quad (6.67)$$

$$\mathbf{6.72.} \quad u(x, t) = \frac{a^2 Q}{4kl} \left(\operatorname{erf} \frac{l+x}{2a\sqrt{t}} + \operatorname{erf} \frac{l-x}{2a\sqrt{t}} \right).$$

$$\mathbf{6.73.} \quad u(x, t) = \frac{q_0 a^2 t}{2k} \left[\psi \left(\frac{l+x}{2a\sqrt{t}} \right) + \psi \left(\frac{l-x}{2a\sqrt{t}} \right) \right],$$

$$\psi(\xi) = \operatorname{erf} \xi + 2\xi \left(\frac{1}{\pi} e^{-\xi^2} - |\xi| \operatorname{Erf} |\xi| \right).$$

$$\mathbf{6.74.} \quad u(x, t) = \frac{q_0|x|}{2k} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \left[\psi\left(\frac{\sqrt{\alpha}|x|}{\sqrt{1+4a^2\alpha t}}\right) - \psi(\sqrt{\alpha}|x|) \right], \quad \psi(\xi) \text{ имеет вид (6.67).}$$

$$\mathbf{6.75.} \quad u(\mathbf{r}, t) = \frac{Q}{4\pi k r} \left[\operatorname{Erf}\left(\frac{r}{2a\sqrt{t}}\right) - \eta(t-t_0) \operatorname{Erf}\left(\frac{r}{2a\sqrt{t-t_0}}\right) \right].$$

$$\mathbf{6.76.} \quad u(x, t) = \frac{Q}{4S\sqrt{Dh}} \left[e^{-|x|\sqrt{\frac{h}{D}}} \operatorname{Erf}\left(\frac{|x|}{2\sqrt{Dt}} - \sqrt{ht}\right) - e^{|x|\sqrt{\frac{h}{D}}} \operatorname{Erf}\left(\frac{|x|}{2\sqrt{Dt}} + \sqrt{ht}\right) \right].$$

У к а з а н и е. Решение выражается через интеграл

$$I(\beta) = \int_y^\infty e^{-\alpha^2 \xi^2 - \frac{\beta^2}{\xi^2}} d\xi, \quad \alpha > 0, \beta \geq 0.$$

Функция $I(\beta)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$I'(\beta) + 2\alpha I(\beta) = 2e^{2\alpha\beta} \operatorname{Erf}\left(\alpha y + \frac{\beta}{y}\right),$$

которое получается дифференцированием интеграла $I(\beta)$ по параметру β с последующей заменой $\alpha\xi - \frac{\beta}{\xi} = t$ и начальному условию $I(0) = \frac{1}{\alpha} \operatorname{Erf}(\alpha y)$.

Отсюда

$$\int_y^\infty e^{-\alpha^2 \xi^2 - \frac{\beta^2}{\xi^2}} d\xi = \frac{1}{2\alpha} \left[e^{2\alpha\beta} \operatorname{Erf}\left(\alpha y + \frac{\beta}{y}\right) + e^{-2\alpha\beta} \operatorname{Erf}\left(\alpha y - \frac{\beta}{y}\right) \right]. \quad (6.68)$$

$$\mathbf{6.77.} \quad u(x, t) = tv(x, t) - v(x, t-t_0)\eta(t-t_0), \text{ где}$$

$$v(x, t) = \frac{Q_0 a e^{\alpha t}}{4Sk\sqrt{h+\alpha}} \left[e^{-\frac{\sqrt{h+\alpha}|x|}{a}} \operatorname{Erf}\left(\frac{|x|}{2a\sqrt{t}} - \sqrt{(h+\alpha)t}\right) + e^{\frac{\sqrt{h+\alpha}|x|}{a}} \operatorname{Erf}\left(\frac{|x|}{2a\sqrt{t}} + \sqrt{(h+\alpha)t}\right) \right].$$

$$\mathbf{6.78.} \quad u(r, t) = tv(x, t, h) + \frac{\partial v(x, t, h)}{\partial h} - [tv(x, t-t_0, h) + \frac{\partial v(x, t-t_0, h)}{\partial h}], \text{ где}$$

$$v(x, t) = \frac{Q_0 a}{4Sk t_0 \sqrt{h}} \left[e^{-\frac{\sqrt{h}|x|}{a}} \operatorname{Erf}\left(\frac{|x|}{2a\sqrt{t}} - \sqrt{ht}\right) - e^{\frac{\sqrt{h}|x|}{a}} \operatorname{Erf}\left(\frac{|x|}{2a\sqrt{t}} + \sqrt{ht}\right) \right].$$

$$\mathbf{6.79.} \quad u(r, t) = \frac{Q}{8\pi Dr} \left[e^{\sqrt{\frac{\alpha}{D}} r} \operatorname{Erf}\left(\frac{r}{2\sqrt{Dt}} + \sqrt{\alpha t}\right) + e^{-\sqrt{\frac{\alpha}{D}} r} \operatorname{Erf}\left(\frac{r}{2\sqrt{Dt}} - \sqrt{\alpha t}\right) \right].$$

У к а з а н и е. Решение выражается через интеграл (6.68).

$$\mathbf{6.80.} \quad u(x, t) = \frac{Q_0}{2C\rho v_0} e^{-\frac{v_0(x-v_0 t)}{2a^2}} \left[e^{-\frac{v_0|x-v_0 t|}{2a^2}} \operatorname{Erf}\left(\frac{|x-v_0 t|}{2a\sqrt{t}} - \frac{v_0\sqrt{t}}{2a}\right) - e^{\frac{v_0|x-v_0 t|}{2a^2}} \operatorname{Erf}\left(\frac{|x-v_0 t|}{2a\sqrt{t}} + \frac{v_0\sqrt{t}}{2a}\right) \right]. \text{ У к а з а н и е. Применить (6.68).}$$

$$\mathbf{6.81.} \quad u(r, t) = \frac{Q}{8klr_0^2\pi t} \int_0^{r_0} I_0\left(\frac{rr'}{2a^2 t}\right) e^{-\frac{r^2+r'^2}{4a^2 t}} r' dr' \left(\operatorname{erf} \frac{l+z}{2a\sqrt{t}} + \operatorname{erf} \frac{l-z}{2a\sqrt{t}} \right).$$

У к а з а н и е. Функция Грина определена выражением (6.66), где $Q = C\rho$.

$$6.82. \Phi(x) = \frac{Q_0 L \varphi_T e^{\frac{\tau_T}{L^2}}}{4D} \left[2 \operatorname{ch} \frac{r}{L} + e^{-\frac{x}{L}} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\tau}} - \frac{\sqrt{\tau}}{L} \right) - e^{\frac{x}{L}} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\tau}} + \frac{\sqrt{\tau}}{L} \right) \right],$$

где $\varphi_T = \varphi(u_T) = e^{-\int_0^{u_T} \frac{\Sigma_a(u') du'}{\xi \Sigma_s(u')}} \quad (\text{см. (1.66)})$, $\tau(u) = \int_0^u \frac{D(u') du'}{\xi \Sigma_s(u')} \quad (\text{см. (1.66)})$,

u_T — летаргия теплового нейтрона.

Решение (фрагменты). Постановка дана в задаче 1.267, т. 1:

$$\Phi''(x) - \frac{1}{L^2} \Phi(x) = -\frac{1}{D} q(x, u_T), \quad -\infty < x < \infty,$$

$$\Phi(x) \rightarrow 0 \quad \text{при } x \rightarrow \infty.$$

Плотность замедления удовлетворяет условиям

$$\frac{\partial q}{\partial u} = \frac{D(u)}{\xi \Sigma(u)} q_{xx} - \frac{\Sigma_a(u)}{\xi \Sigma(u)} q + Q_0 \delta(x) \cdot \delta(u),$$

$$q(\mathbf{r}, u) \rightarrow 0 \quad \text{при } r \rightarrow \infty.$$

Плотность потока тепловых нейтронов

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\zeta - x) \frac{q(\zeta, u_T)}{D} d\zeta,$$

где $q(x, u_T)$ — решение задачи 6.82 при $u = u_T$.

$$6.83. \Phi(r) = \frac{Q_0 \varphi_T e^{\frac{\tau_T}{L^2}}}{8\pi D r} \left[e^{\frac{r}{L}} \operatorname{erf} \left(\frac{r}{2\sqrt{\tau}} + \frac{\sqrt{\tau}}{L} \right) + e^{-\frac{r}{L}} \operatorname{erf} \left(\frac{r}{2\sqrt{\tau}} - \frac{\sqrt{\tau}}{L} \right) - 2 \operatorname{sh} \frac{r}{L} \right].$$

Указание. Задача сводится к вычислению интеграла

$$\Phi(r) = \frac{Q_0 \varphi_T}{4\pi D} \int_{\mathbb{R}^3} \frac{e^{-\frac{\rho^2}{4\tau} - \frac{|\rho - \mathbf{r}|}{L}}}{(4\pi\tau)^{\frac{3}{2}} |\rho - \mathbf{r}|} d\rho. \quad \text{См. также решение предыдущей задачи.}$$

$$6.84. \quad 1) u(0, t) = \frac{u_0 l}{2a\sqrt{t}} e^{\frac{l^2}{4a^2 t}} \operatorname{Erf} \frac{l}{2a\sqrt{t}}; \quad 2) u(0, t) = \frac{u_0 l \sqrt{\pi}}{2a\sqrt{t}} \operatorname{erf} \frac{a\sqrt{t}}{l}.$$

$$6.85. \quad q(0, t) = -\frac{k l u_0}{2a^2 \sqrt{\pi} t} e^{\frac{l^2}{4a^2 t}} \operatorname{Erf} \frac{l}{2a\sqrt{t}}.$$

$$6.86. \quad u(x, t) = u_0 \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2} \sqrt{\frac{RC}{t}} \right).$$

$$6.87. \quad u(x, t) = \frac{u_0}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{l + vt + h}{\sqrt{2Dt}} - \operatorname{erf} \frac{l + vt - h}{\sqrt{2Dt}} \right).$$

$$6.88. \quad u(x, t) = \frac{u_0}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{l+x}{2a\sqrt{t}} + \operatorname{erf} \frac{l-x}{2a\sqrt{t}} \right).$$

$$6.89. \quad u(x, t) = \frac{u_0}{2} \left[\left(1 + \frac{x}{l} \right) \operatorname{erf} \frac{l+x}{2a\sqrt{t}} + \left(1 - \frac{x}{l} \right) \operatorname{erf} \frac{l-x}{2a\sqrt{t}} - \frac{2x}{l} \operatorname{erf} \frac{x}{2a\sqrt{t}} - \frac{l}{a} \sqrt{\frac{t}{\pi}} \left(e^{-\frac{(l+x)^2}{4a^2 t}} + e^{-\frac{(l-x)^2}{4a^2 t}} - 2e^{-\frac{x^2}{4a^2 t}} \right) \right].$$

$$6.90. \quad u(x, t) = \frac{u_0}{2} e^{\alpha^2 a^2 t} \left[e^{\alpha x} \operatorname{Erf} \left(\alpha a \sqrt{t} + \frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) + e^{-\alpha x} \operatorname{Erf} \left(\alpha a \sqrt{t} - \frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) \right];$$

$$u(x, t) = \frac{u_0 ch \alpha x}{\alpha a \sqrt{\pi t}} \left(1 + O \left(\frac{1}{t} \right) \right), \quad t \rightarrow \infty.$$

$$6.91. \quad u(x, t) = \frac{u_0}{\sqrt{1 + 4\alpha a^2 t}} e^{-\frac{\alpha x^2}{1 + 4\alpha a^2 t}}.$$

$$6.92. \quad u(x, t) = \frac{Ax}{(1 + 4\alpha a^2 t)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{\alpha x^2}{1 + 4\alpha a^2 t}}; \quad u(x, t) = \frac{Ax}{(4\alpha a^2 t)^{\frac{3}{2}}} \left(1 + O\left(\frac{1}{t}\right)\right), \quad t \rightarrow \infty.$$

$$6.93. \quad u(x, t) = u_0 \sin \beta x e^{-\beta^2 a^2 t}.$$

$$6.94. \quad u(x, t) = u_0 \frac{e^{-\frac{\alpha x^2 + \beta^2 a^2 t}{1 + 4\alpha a^2 t}}}{\sqrt{1 + 4\alpha a^2 t}} \cos \frac{\beta x}{1 + 4\alpha a^2 t}.$$

$$6.95. \quad u(x, t) = \left[\frac{u_1 + u_2}{2} + \frac{u_2 - u_1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) \right] e^{-ht}.$$

$$6.96. \quad u(x, t) = u_0(1 - e^{-ht}) + u_1 \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) e^{-ht}.$$

$$6.97. \quad u(x, t) = u_0(1 - e^{-ht}) \eta(x) - \frac{u_0}{4} \left[e^{\frac{\sqrt{h}|x|}{a}} \operatorname{Erf} \left(\frac{|x|}{2a\sqrt{t}} + \sqrt{h}t \right) + \right. \\ \left. + e^{-\frac{\sqrt{h}|x|}{a}} \operatorname{Erf} \left(\frac{|x|}{2a\sqrt{t}} - \sqrt{h}t \right) - 2e^{-ht} \operatorname{Erf} \frac{|x|}{2a\sqrt{t}} \right] \operatorname{sign} x.$$

6.98. Если $\alpha \neq \sqrt{h}$, то

$$u(x, t) = \frac{hu_0}{h - \alpha^2 a^2} \left\{ e^{-\alpha|x|} - \frac{1}{2} e^{-(h - \alpha^2 a^2)t} \left[e^{\alpha|x|} \operatorname{Erf} \left(\alpha a\sqrt{t} + \frac{|x|}{2a\sqrt{t}} \right) + \right. \right. \\ \left. + e^{-\alpha|x|} \operatorname{Erf} \left(\alpha a\sqrt{t} - \frac{|x|}{2a\sqrt{t}} \right) \right] + \frac{\alpha a}{2\sqrt{h}} \left[e^{\frac{\sqrt{h}|x|}{a}} \operatorname{Erf} \left(\frac{|x|}{2a\sqrt{t}} + \sqrt{ht} \right) + \right. \\ \left. + e^{-\frac{\sqrt{h}|x|}{a}} \operatorname{Erf} \left(\frac{|x|}{2a\sqrt{t}} - \sqrt{ht} \right) \right] \right\}.$$

Если $\alpha a = \sqrt{h}$, то

$$u(x, t) = \frac{u_0}{4} \left[(1 + \alpha|x|) e^{-\alpha|x|} \operatorname{Erf} \left(\frac{|x|}{2a\sqrt{t}} - \alpha a\sqrt{t} \right) - \right. \\ \left. - (1 - \alpha|x|) e^{\alpha|x|} \operatorname{Erf} \left(\frac{|x|}{2a\sqrt{t}} - \alpha a\sqrt{t} \right) \right] - \frac{\alpha a u_0}{\sqrt{\pi}} e^{-\alpha^2 a^2 t - \frac{x^2}{4a^2 t}}.$$

$$6.99. \quad u(x, t) = \frac{hu_0}{h + \alpha^2 a^2} \left[1 - e^{-(h + \alpha^2 a^2)t} \right] \sin \alpha x, \quad \alpha^2 = \sum_{j=1}^n \alpha_j^2, \quad \alpha x = \sum_{j=1}^n \alpha_j x_j.$$

$$6.100. \quad u(x, t) = \frac{u_0}{1 + \alpha} \begin{cases} 1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}} \right), & x \leq 0, \\ 1 + \alpha \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a_2\sqrt{t}} \right), & x \geq 0, \end{cases} \quad \alpha = \frac{k_1 a_2}{k_2 a_1}.$$

У к а з а н и е. Применить функцию Грина задачи (6.57).

$$6.101. \quad u(x, t) = \frac{u_0}{2} \operatorname{Erf} \left(\frac{x - v_0 t}{2\sqrt{Dt}} \right).$$

У к а з а н и е. Функция Грина дана в ответе к задаче 6.56.

$$6.102. \quad u(x, t) = \frac{u_0}{\sqrt{1 + 4\alpha D t}} e^{-\frac{\alpha(x - v_0 t)^2}{1 + 4\alpha D t}}.$$

У к а з а н и е. Функция Грина дана в ответе к задаче 6.56.

$$6.103. \quad u(0, t) = \frac{u_0}{k_1 a_2 + k_2 a_1} \left[k_1 a_2 e^{\alpha^2 a_1^2 t} \operatorname{Erf}(\alpha a_1 \sqrt{t}) + k_2 a_1 e^{\alpha^2 a_2^2 t} \operatorname{Erf}(\alpha a_2 \sqrt{t}) \right];$$

$$u(0, t) = u_0 \frac{k_1 a_2^2 + k_2 a_1^2}{k_1 a_2 + k_2 a_1} \cdot \frac{1}{\alpha a_1 a_2 \sqrt{\pi t}} + O\left(\frac{1}{t^{\frac{3}{2}}}\right), \quad t \rightarrow \infty.$$

У к а з а н и е. Функция Грина дана в ответе к задаче 6.57, где $Q = \frac{C_1 \rho_1}{S_0}$ при $\xi < 0$, $Q = \frac{C_2 \rho_2}{S_0}$ при $\xi \geq 0$.

$$6.104. \quad 1) \quad u(0, t) = u_0(1 - e^{\alpha^2 t} \operatorname{Erf}(\alpha \sqrt{t})), \quad \alpha = \frac{2kS}{aC_0},$$

$$\frac{u(0, t)}{u_0} = 2\alpha \sqrt{\frac{t}{\pi}} - \alpha^2 t + O(t^{\frac{3}{2}}), \quad t \rightarrow 0,$$

$$\frac{u(0, t)}{u_0} = 1 - \frac{1}{\alpha \sqrt{\pi t}} + O\left(\frac{1}{t^{\frac{3}{2}}}\right), \quad t \rightarrow \infty;$$

$$2) \quad \frac{u(0, t)}{u_0} = \frac{1}{2} \left[1 + e^{\alpha^2 t} \operatorname{Erf}(\alpha \sqrt{t}) \right],$$

$$\frac{u(0, t)}{u_0} = 1 - \alpha \sqrt{\frac{t}{\pi}} + O(t), \quad t \rightarrow 0,$$

$$\frac{u(0, t)}{u_0} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\alpha \sqrt{\pi t}} + O\left(\frac{1}{t^{\frac{3}{2}}}\right) \right), \quad t \rightarrow \infty.$$

У к а з а н и е. Функция Грина имеет вид (6.64) при $Q = C\rho$.

$$6.105. \quad 1) \quad u(x, y, t) = \frac{Axy}{(1 + 4\alpha a^2 t)^3} e^{-\frac{\alpha(x^2 + y^2)}{1 + 4\alpha a^2 t}};$$

$$2) \quad u(x, y, t) = \frac{u_0}{1 + 4\alpha a^2 t} e^{-\frac{\alpha(x^2 + y^2)}{1 + 4\alpha a^2 t}};$$

$$3) \quad u(x, y, t) = \frac{u_0}{\sqrt{1 + 4\beta^2 a^4 t^2}} \sin \frac{\beta xy}{1 + 4\beta^2 a^4 t^2} e^{-\frac{\beta^2 a^2 (x^2 + y^2) t}{1 + 4\beta^2 a^4 t^2}}.$$

$$6.106. \quad u(x, t) = 1 + 4\alpha a^2 t \frac{u_0 e^{-\frac{(\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i)^2}{1 + 4\alpha a^2 t}}}{\sqrt{1 + 4\alpha a^2 t}}, \quad \alpha^2 = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2.$$

У к а з а н и е. Перенести начало координат в точку x и повернуть систему координат так, чтобы одна из новых осей была коллинеарна вектору α .

$$6.107. \quad u(0, t) = u_0 \left(1 - e^{-\frac{r_0^2}{4a^2 t}} \right).$$

У к а з а н и е. Функция Грина имеет вид (6.65) при $Q = C\rho$.

$$6.108. \quad u(0, t) = u_0 [1 - \alpha a \sqrt{\pi t} e^{\alpha^2 a^2 t} \operatorname{Erf}(\alpha a t)];$$

$$u(0, t) = \frac{u_0}{2\alpha^2 a^2 t} + O\left(\frac{1}{t^2}\right), \quad t \rightarrow \infty.$$

У к а з а н и е. См. предыдущую задачу.

$$6.109. \quad 1) \quad u(r, t) = u_0 \frac{e^{-\frac{\alpha r^2}{1 + 4\alpha a^2 t}}}{(1 + 4\alpha a^2 t)^3} [r^2 + 4a^2 t(1 + 4\alpha a^2 t)];$$

$$2) \quad u(r, t) = u_0 \frac{e^{-\frac{4\alpha^2 a^2 r^2 t}{1 + 16\alpha^2 a^4 t^2}}}{\sqrt{1 + 16\alpha^2 a^4 t^2}} \cos \left(\frac{\alpha r^2}{1 + 16\alpha^2 a^4 t^2} + \delta \right), \quad \operatorname{tg} \delta = 4\alpha a^2 t;$$

$$3) u(r, t) = \frac{u_0}{2a} \sqrt{\frac{\pi}{t}} e^{-\frac{r^2}{8a^2t}} \left[I_0\left(\frac{r^2}{8a^2t}\right) - \frac{e^{-\frac{\alpha r^2}{2(1+4\alpha a^2t)}}}{\sqrt{1+4\alpha a^2t}} I_0\left(\frac{r^2}{8a^2t(1+4\alpha a^2t)}\right) \right].$$

У к а з а н и е к п. 2. Воспользоваться формулой

$$\int_0^\infty I_0(\xi) e^{-\gamma \xi^2} d\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\gamma}} e^{\frac{1}{8\gamma}} I_0\left(\frac{1}{8\gamma}\right), \quad \gamma > 0.$$

Для ее доказательства $I_0(\xi)$ представить в интегральной форме, проинтегрировать по ξ и снова воспользоваться интегральным представлением.

$$6.111. u(x, t) = \frac{u_0}{(1+4\alpha a^2t)^{\frac{n}{2}}} e^{-\frac{\alpha x^2}{1+4\alpha a^2t}}, \quad x^2 = \sum_{k=1}^{k=n} x_k^2.$$

$$6.112. 1) u(x, y, t) = \frac{4u_0}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin \gamma_n x}{2n+1} e^{-(\beta^2 + \gamma_n^2) a^2 t} \times \frac{\cos \beta y e^{-\frac{\alpha z^2}{1+4\alpha a^2t}}}{\sqrt{1+4\alpha a^2t}}, \quad \gamma_n = \frac{\pi(2n+1)}{l};$$

$$2) u(x, y, z, t) = \frac{u_0 \cos \frac{\pi x}{2l} \sin \frac{\beta y z}{1+4\beta^2 a^4 t^2}}{\sqrt{1+4\beta^2 a^4 t^2}} e^{-\frac{\beta^2 a^2 (y^2 + z^2) t}{1+4\beta^2 a^4 t^2}}.$$

$$6.113. u(x, y, z, t) = \frac{8u_0 e^{-ht}}{\pi^2} \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n} \cos \frac{\pi(2m+1)x}{2l_1} \cos \frac{\pi(2n+1)y}{2l_2} e^{-\lambda_{mn} a^2 t}}{(2m+1)(2n+1)} \operatorname{erf} \frac{z}{2a\sqrt{t}},$$

$$\lambda_{mn} = \frac{\pi^2}{4} \left[\frac{(2m+1)^2}{l_1^2} + \frac{(2n+1)^2}{l_2^2} \right].$$

$$6.114. u(r, z, t) = 8u_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{\mu_n r}{r_0}\right) e^{-\left(\frac{\mu_n a}{r_0}\right)^2 t}}{\mu_n^3 J_1(\mu_n)} \left(\operatorname{erf} \frac{l+z}{2a\sqrt{t}} + \operatorname{erf} \frac{l-z}{2a\sqrt{t}} \right).$$

6.115.

$$1) G_1(x, \xi, t) = G(x - \xi, t) - G(x + \xi, t); \quad (6.69)$$

$$2) G_2(x, \xi, t) = G(x - \xi, t) + G(x + \xi, t). \quad (6.70)$$

$G(x, t)$ определена формулой (6.13) при $n = 1$.

$$6.116. u(x, t) = \frac{Q}{C} e^{-ht} G_1(x, x_0, t), \quad a^2 = \frac{1}{RC}, \quad h = \frac{G}{C}, \quad G_1(x, \xi, t) \text{ имеет вид (6.69).}$$

6.117.

$$u(r, t) = \frac{1}{8\pi a r r' \sqrt{\pi t}} \left[e^{-\frac{(r-r')^2}{4a^2t}} - e^{-\frac{(r+r')^2}{4a^2t}} \right]. \quad (6.71)$$

$$6.118. u(r, t) = \frac{Q}{c\rho} G(r, r', t),$$

$$G(r, r', t) = \frac{1}{8\pi a r r' \sqrt{\pi t}} \left(e^{-\frac{(r-r')^2}{4a^2t}} - e^{-\frac{(r+r'-2r_0)^2}{4a^2t}} \right). \quad (6.72)$$

У к а з а н и е. Замены $u(r, t) = v(r, t)/r$, $r - r_0 = \xi$ приводят к задаче для уравнения теплопроводности на полупрямой $\xi > 0$ с нулевым граничным условием.

$$6.119. u(r, \tau) = \frac{Q_0 \varphi(u)}{2V} \left(\operatorname{erf} \frac{r_0 + r}{2\sqrt{\tau}} + \operatorname{erf} \frac{r_0 - r}{2\sqrt{\tau}} - \frac{4}{r} \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \sin \frac{rr_0}{2\tau} e^{-\frac{r^2 + r_0^2}{4\tau}} \right),$$

$$V = \frac{4\pi r_0^3}{3}, \quad \varphi(u) = e^{-\int_0^u \frac{\Sigma_a(u') du'}{\xi \Sigma(u')}}.$$

У к а з а н и е. Применить функцию Грина сферического источника из задачи 6.117. См. также задачу 1.269, т.1.

6.120. $G_1(x, \xi, t)$ имеет вид (6.69).

6.121. $\tilde{G}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta, t) = G_1(x, \xi, t) G_1(y, \eta, t) G_1(z, \zeta, t)$, где $G_1(x, \xi, t)$ определена выражением (6.69).

$$6.122. 1) G_1(x, \xi, t) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} X_n(\xi) X_n(x) e^{-a^2 \lambda_n t}, \quad X_n(x) = \sin \left(\frac{\pi n}{l} \right)^2 x;$$

$$2) G_1(x, \xi, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [G(x - \xi + 2nl, t) - G(x + \xi + 2nl, t)],$$

где функция $G(x, t)$ определена формулой (6.13) при $n = 1$.

$$6.123. 1) G_2(x, \xi, t) = \frac{2}{l} \sum_{n=0}^{\infty} X_n(\xi) X_n(x) e^{-a^2 \lambda_n t}, \quad X_n(x) = \cos \left(\frac{\pi(2n+1)}{2l} \right)^2 x;$$

$$2) G_2(x, \xi, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n [G(x - \xi + 2nl, t) + G(x + \xi + 2nl, t)],$$

где функция $G(x, t)$ определена формулой (6.13) при $n = 1$.

$$6.124. q(x, y, z, \tau) = \frac{Q_0 \varphi(u) e^{-\frac{x^2 + y^2}{4\tau}}}{(4\pi\tau)^{\frac{3}{2}}} \left[e^{-\frac{(z-a)^2}{4\tau}} - e^{-\frac{(z+a)^2}{4\tau}} \right], \text{ функция } \tau = \tau(u)$$

определена соотношением (1.66), $\varphi(u)$ имеет вид (1.149), т. 1.

$$6.125. q(r, \tau) = \frac{Q_0 \varphi(u)}{8rr' \sqrt{\pi\tau}} \left[e^{-\frac{(r-r')^2}{4\tau}} - e^{-\frac{(r+r')^2}{4\tau}} \right], \text{ где функция } \tau = \tau(u) \text{ определена соотношением (1.66), } \varphi(u) \text{ имеет вид (1.149), т. 1.}$$

6.126. $u(x, t) = \frac{Q}{S} e^{-\beta t} G(x, \xi, t)$, где $G(x, \xi, t)$, функция Грина определена формулой (6.15), в которой $a^2 = D$.

$$6.127. G(x, \xi, t) = \frac{e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2 t}} - e^{-\frac{(x+\xi)^2}{4a^2 t}}}{2a\sqrt{\pi t}} +$$

$$+ \frac{k}{a^2 C_0} e^{\frac{k}{a^2 C_0}(x+\xi) + \frac{k^2 t}{a^2 C_0^2}} \operatorname{Erf} \left(\frac{x+\xi}{2a\sqrt{t}} + \frac{k\sqrt{t}}{aC_0} \right),$$

функция $G(x, \xi, t)$ имеет вид (6.15) при $h = \frac{kS}{a^2 C_0}$.

$$6.128. q(t) = q_0 e^{\frac{Ct}{C_0^2 R}} \operatorname{Erf} \left(\frac{1}{C_0} \sqrt{\frac{Ct}{R}} \right).$$

$$6.129. q(t) = q_0 e^{\frac{Cx_0}{C_0} + \frac{Ct}{C_0^2 R}} \operatorname{Erf} \left(\frac{x_0}{2} \sqrt{\frac{CR}{t}} + \frac{1}{C_0} \sqrt{\frac{Ct}{R}} \right);$$

$$q(t) = \frac{2q_0}{x_0} \sqrt{\frac{t}{RC}} e^{-\frac{RCx_0^2}{4t}} (1 + O(t)), \quad t \rightarrow 0,$$

$$q(t) = C_0 \sqrt{\frac{R}{\pi Ct}} \left(1 + O\left(\frac{1}{t}\right) \right), \quad t \rightarrow \infty.$$

$$6.130. \quad i(0, t) = \frac{q_0}{R_0} \sqrt{\frac{R}{C}} e^{-\frac{G}{C}} \left[\frac{e^{-\frac{RCx_0^2}{4t}}}{\sqrt{\pi t}} - \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{R}{C}} e^{\frac{Rx_0}{R_0} + \frac{Rt}{R_0^2 C}} \times \right. \\ \left. \times \operatorname{Erf} \left(\frac{x_0}{2} \sqrt{\frac{Rt}{C}} + \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{RC}{t}} \right) \right].$$

6.131.

$$u(r, t) = \frac{Q}{c\rho} G(r, r', t), \quad G(r, r', t) = \frac{1}{8\pi a r r' \sqrt{\pi t}} \left[e^{-\frac{(r-r')^2}{4a^2 t}} + e^{-\frac{(r+r'-2r_0)^2}{4a^2 t}} - \right. \\ \left. - 2b e^{b(r+r'-2r_0)+b^2 a^2 t} \operatorname{Erf} \left(\frac{r+r'-2r_0}{2a\sqrt{t}} + b\sqrt{t} \right) \right], \quad (6.73)$$

$$1) b = \frac{1}{r_0}; \quad 2) b = \frac{1}{r_0} + h.$$

У к а з а н и е. Замены $u(r, t) = v(r, t)/r$, $r - r_0 = \xi$ приводят к смешанной задаче на полупрямой ($\xi > 0$).

$$6.132. \quad 1) u(x, t) = \frac{u_0}{2} \left[2 \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x+l}{2a\sqrt{t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x-l}{2a\sqrt{t}} \right) \right];$$

$$2) u(x, t) = \frac{u_0}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x+l}{2a\sqrt{t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x-l}{2a\sqrt{t}} \right) \right];$$

$$3) u(x, t) = u_0 \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x+l}{2a\sqrt{t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x-l}{2a\sqrt{t}} \right) \right].$$

$$6.133. \quad 1) u(x, t) = \frac{u_0}{2} e^{\alpha^2 a^2 t} \left[e^{-\alpha x} \operatorname{Erf} \left(\alpha a \sqrt{t} - \frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) - \right. \\ \left. - e^{\alpha x} \operatorname{Erf} \left(\alpha a \sqrt{t} + \frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) \right];$$

$$2) u(x, t) = \frac{u_0}{\sqrt{1+4\alpha a^2 t}} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t(1+4\alpha a^2 t)}} \right) e^{-\frac{\alpha x}{1+4\alpha a^2 t}}.$$

$$6.134. \quad 1) u(x, t) = \frac{u_0}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{l+x}{2\sqrt{Dt}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{l-x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right];$$

$$2) u(x, t) = \frac{u_0}{2} e^{\alpha^2 Dt} \left[e^{\alpha x} \operatorname{Erf} \left(\alpha \sqrt{Dt} + \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) + \right. \\ \left. + e^{-\alpha x} \operatorname{Erf} \left(\alpha \sqrt{Dt} - \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right].$$

$$6.135. \quad u(x, t) = \frac{u_0}{2} \left[\operatorname{Erf} \left(\frac{l+x}{2\sqrt{Dt}} \right) + \operatorname{Erf} \left(\frac{l-x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right].$$

$$6.136. \quad u(x, t) = u_0 \left[\operatorname{Erf} \left(\frac{x+l}{2a\sqrt{t}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{x-l}{2a\sqrt{t}} \right) \right].$$

$$6.137. \quad u(r, z, t) = \frac{q_0}{2ak\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2+z^2}{4a^2\tau}}}{t\sqrt{\tau}} d\tau \int_0^{r_0} I_0 \left(\frac{rr'}{2a^2\tau} \right) e^{-\frac{r'^2}{4a^2\tau}} r' dr'.$$

У к а з а н и е. Функция Грина получается методом продолжений и равна сумме влияний двух мгновенных точечных источников: $G(r, r', z - z', t) + G(r, r', z + z', t)$, где $G(r, r', z, t)$ имеет вид (6.66) при $Q = C\rho$.

6.138. В цилиндрической системе координат с началом в центре кольца

$$\text{температура полупространства } u(r, z) = \frac{Q}{4\pi ak\pi\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{e^{-\frac{r_0^2 + r^2 + z^2}{4a^2\tau}}}{\tau\sqrt{\tau}} I_0\left(\frac{rr_0}{2a^2\tau}\right) d\tau,$$

$$u(0, z) = \frac{Q}{4\pi k\sqrt{r_0^2 + z^2}} \operatorname{Erf} \frac{\sqrt{r_0^2 + z^2}}{2a\sqrt{t}}.$$

$$\begin{aligned} \mathbf{6.139.} \quad 1) \quad u(r, t) = \frac{u_0}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{r+r_0}{2a\sqrt{t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{r-r_0}{2a\sqrt{t}} \right) + \right. \\ \left. + \frac{2a}{r} \sqrt{\frac{t}{\pi}} \left(e^{-\frac{(r+r_0)^2}{4a^2t}} - e^{-\frac{(r-r_0)^2}{4a^2t}} \right) \right]; \end{aligned}$$

$$2) \quad u(r, t) = \frac{Ae^{-\frac{\alpha r^2}{\beta^2}}}{\beta^3 r} \left[\left(\frac{r^2}{\beta^2} + 2a^2t \right) \operatorname{erf} \left(\frac{r}{2\beta a\sqrt{t}} \right) + \frac{2a}{\beta} \sqrt{\frac{t}{\pi}} r e^{-\frac{r^2}{4\beta^2 a^2 t}} \right],$$

где $\beta = \sqrt{1 + 4\alpha a^2 t}$.

У к а з а н и е. Воспользоваться функцией Грина (6.71).

$$\begin{aligned} \mathbf{6.140.} \quad u(r, t) = \frac{3a^2 Q}{8\pi k r_0^3} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{r+r_0}{2a\sqrt{t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{r-r_0}{2a\sqrt{t}} \right) - \right. \\ \left. - \frac{2a}{r} \sqrt{\frac{t}{\pi}} \left(e^{-\frac{(r+r_0)^2}{4a^2t}} - e^{-\frac{(r-r_0)^2}{4a^2t}} \right) \right] \end{aligned}$$

определена соотношением (1.66).

$$\mathbf{6.141.} \quad \Phi(r) = \frac{Q_0 \varphi_T}{8\pi D r} \left[e^{-\frac{r}{L}} \operatorname{Erf} \left(\frac{\sqrt{\tau_T}}{L} - \frac{r}{2\sqrt{\tau_T}} \right) - e^{\frac{r}{L}} \operatorname{Erf} \left(\frac{\sqrt{\tau_T}}{L} + \frac{r}{2\sqrt{\tau_T}} \right) \right],$$

где $\tau_T = \tau(u_T)$ (см. (1.66), т. 1), $\varphi_T = \varphi(u_T)$ (см. (1.149), т. 1), u_T — летаргия теплового нейтрона.

У к а з а н и е. Плотность потока тепловых нейтронов $\Phi(r)$ удовлетворяет условиям (см. задачи 1.267 и 6.69)

$$\Delta \Phi - \frac{1}{L^2} \Phi = \frac{Q_0 \phi_T}{L} \frac{e^{\frac{r^2}{4\tau_T}}}{(4\pi\tau_T)^{\frac{3}{2}}}, \quad 0 < r < \infty, \quad |\Phi(r)| < \infty.$$

Соответствующая функция Грина является решением задачи.

$$\mathbf{6.142.} \quad u(r, t) = u_0 \left[1 - \frac{r_0}{r} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2a\sqrt{t}} \right) \right].$$

У к а з а н и е. Функция Грина определена выражением (6.72).

$$\begin{aligned} \mathbf{6.143.} \quad u(r, t) = \frac{u_0 r_0}{2r} e^{\alpha^2 a^2 t} \left[e^{-\alpha(r-r_0)} \operatorname{Erf} \left(\alpha a\sqrt{t} - \frac{r-r_0}{2a\sqrt{t}} \right) - \right. \\ \left. - e^{\alpha(r-r_0)} \operatorname{Erf} \left(\alpha a\sqrt{t} + \frac{r-r_0}{2a\sqrt{t}} \right) \right]. \end{aligned}$$

$$u(r, t) = \frac{u_0 r_0 (r-r_0)}{2\alpha^2 a^3 t \sqrt{\pi t} r} \left(1 + O\left(\frac{1}{t}\right) \right), \quad t \rightarrow \infty.$$

$$u(r, t) = \frac{u_0 r_0}{r} e^{-\alpha(r-r_0) + \alpha^2 a^2 t} + O\left(\frac{e^{-\frac{r^2}{4a^2 t}}}{r}\right), \quad r \rightarrow \infty.$$

$$\begin{aligned} \mathbf{6.144.} \quad u(r, t) = \frac{u_0 r_0}{2r} \left[e^{-\sqrt{\frac{\alpha}{D}}(r-r_0)} \operatorname{Erf} \left(\sqrt{\alpha t} - \frac{r-r_0}{2\sqrt{Dt}} \right) - \right. \\ \left. - e^{\sqrt{\frac{\alpha}{D}}(r-r_0)} \operatorname{Erf} \left(\sqrt{\alpha t} + \frac{r-r_0}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]. \end{aligned}$$

У к а з а н и е. Функция Грина равна $e^{-\alpha t} G(r, r', t)$, $G(r, r', t)$ имеет вид (6.72).

$$\mathbf{6.145.} \quad u(r, t) = \frac{Q}{r\alpha^2 r} \left\{ e^{-\alpha r_0} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2a\sqrt{t}} \right) - e^{-\alpha r} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} e^{-\alpha r_0 + \alpha^2 a^2 t} \left[e^{-\alpha(r-r_0)} \operatorname{Erf} \left(\alpha a \sqrt{t} - \frac{r-r_0}{2a\sqrt{t}} \right) - e^{\alpha(r-r_0)} \operatorname{Erf} \left(\alpha a \sqrt{t} + \frac{r-r_0}{2a\sqrt{t}} \right) \right] \right\}.$$

У к а з а н и е. Функция Грина определена выражением (6.72).

$$\mathbf{6.146.} \quad u(x, t) = u_1 + (u_0 - u_1) e^{-ht} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) - \\ - \frac{u_1}{2} \left[e^{\frac{\sqrt{h}x}{a}} \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} + \sqrt{ht} \right) + e^{-\frac{\sqrt{h}x}{a}} \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} - \sqrt{ht} \right) \right].$$

$$\mathbf{6.147.} \quad u_{1,2}(x, t) = \frac{Q_0}{2kS} \left[|x - x_0| \psi \left(\frac{|x - x_0|}{2a\sqrt{t}} \right) \mp (x + x_0) \psi \left(\frac{x + x_0}{2a\sqrt{t}} \right) \right],$$

функция $\psi(\xi)$ определена выражением (6.67).

$$\mathbf{6.148.} \quad u(x, t) = \frac{q_0}{2\alpha^2 k} e^{\alpha^2 a^2 t} \left[e^{\alpha x} \operatorname{Erf} \left(\alpha a \sqrt{t} + \frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) - \right. \\ \left. - e^{-\alpha x} \operatorname{Erf} \left(\alpha a \sqrt{t} - \frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) \right] + \frac{q_0}{\alpha^2 k} \left(\operatorname{Erf} \frac{x}{2a\sqrt{t}} - e^{-\alpha x} \right).$$

$$\mathbf{6.149.} \quad u(x, y, t) = u_0 \operatorname{erf} \frac{x}{2a\sqrt{t}} \operatorname{erf} \frac{y}{2a\sqrt{t}}.$$

$$\mathbf{6.150.} \quad u(y, z, t) = u_0 \operatorname{erf} \frac{y}{2a\sqrt{t}} \operatorname{erf} \frac{z}{2a\sqrt{t}}.$$

$$\mathbf{6.151.} \quad q(t) = Q \left[\operatorname{Erf} \left(\frac{x_0}{2\sqrt{Dt}} \right) - e^{hx_0 + h^2 Dt} \operatorname{Erf} \left(\frac{x_0}{2\sqrt{Dt}} + h\sqrt{Dt} \right) \right];$$

$$q(t) = Q \left[1 - \left(x_0 + \frac{1}{h} \right) \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} \right] + O \left(\frac{1}{t\sqrt{t}} \right), \quad t \rightarrow +\infty.$$

$$\mathbf{6.152.} \quad u(r, t) = u_0 \left\{ 1 - \frac{r_0}{br} \left[\operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2a\sqrt{t}} \right) - e^{b^2 a^2 t + b(r-r_0)} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2a\sqrt{t}} + ba\sqrt{t} \right) \right] \right\},$$

$$b = \frac{1}{r_0} + h.$$

У к а з а н и е. Функция Грина имеет вид (6.72), где $b = \frac{1}{r_0} + h$.

$$\mathbf{6.153.} \quad 1) \quad u(x, t) = u_0 \left[1 - e^{hx + h^2 a^2 t} \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} + ha\sqrt{t} \right) \right], \quad h = \frac{kS}{a^2 C_0};$$

$$2) \quad u(0, t) = 2\alpha u_0 \sqrt{\frac{t}{\pi}} \left[1 - \alpha \sqrt{\pi t} e^{\alpha^2 t} \operatorname{Erf}(\alpha \sqrt{t}) \right];$$

$$u(0, t) \frac{u_0}{\alpha \sqrt{\pi t}} \left(1 + O \left(\frac{1}{t} \right) \right), \quad t \rightarrow \infty.$$

У к а з а н и е. См. задачу 6.127.

$$\mathbf{6.154.} \quad u(x, t) = u_0 e^{\alpha^2 a^2 t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0 \left(\frac{\mu_n r}{r_0} \right) e^{-\left(\frac{\mu_n a}{r_0} \right)^2 t}}{\mu_n J_1(\mu_n)} \times \\ \times \left[e^{-\alpha z} \operatorname{Erf} \left(\alpha a \sqrt{t} - \frac{z}{2a\sqrt{t}} \right) - e^{\alpha z} \operatorname{Erf} \left(\alpha a \sqrt{t} + \frac{z}{2a\sqrt{t}} \right) \right].$$

$$6.155. \quad u(x, t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{x \mu(\tau) e^{-\frac{x^2}{4a^2(t-\tau)}} d\tau}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}}.$$

$$6.156. \quad u(x, t) = u_0 \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right).$$

$$6.157. \quad H(z, t) = H_0 \operatorname{Erf} \left(\frac{z}{c} \sqrt{\frac{\pi \mu \sigma}{t}} \right).$$

$$6.158. \quad P^2(x, t) = P_1^2 + (P_0^2 - P_1^2) \operatorname{erf} \frac{x}{2a\sqrt{t}}, \quad a^2 = \frac{kP_0}{\mu} \left[m + \frac{abRT}{(1 + aP_0)^2} \right]^{-1}.$$

$$6.159. \quad u(x, t) = u_0 \left[\operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) - \eta(t - t_0) \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t - t_0}} \right) \right].$$

$$6.160. \quad u(x, t) = A \left(t + \frac{x^2}{2a^2} \right) \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) - \frac{Ax}{a} \sqrt{\frac{t}{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4a^2t}}.$$

$$6.161. \quad u(x, t) = -\frac{\partial v(x, t, \beta)}{\partial \beta} + \frac{\partial v(x, t - t_0, \beta)}{\partial \beta} \eta(t - t_0), \quad \text{где } v(x, t, \beta) = \\ = \frac{x e^{\alpha t}}{4a\sqrt{\alpha}} \left(e^{-2\sqrt{\alpha\beta}} \operatorname{Erf} \left(\sqrt{\frac{\beta}{t}} - \sqrt{\alpha t} \right) - e^{2\sqrt{\alpha\beta}} \operatorname{Erf} \left(\sqrt{\frac{\beta}{t}} + \sqrt{\alpha t} \right) \right), \quad \beta = \frac{x}{2a}.$$

$$6.162. \quad 1) \quad u(x, t) = \frac{q_0 x}{D} \psi \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right);$$

$$2) \quad u(x, t) = \frac{q_0 x}{D} \left[\psi \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) - \eta(t - t_0) \psi \left(\frac{x}{2\sqrt{D(t - t_0)}} \right) \right],$$

где $\psi(\xi)$ определена выражением (6.67).

$$6.163. \quad u(x, t) = a^2 h \int_0^t \mu(\tau) \tilde{G}(x, 0, t - \tau) d\tau, \quad \text{функция } \tilde{G}(x, \xi, t) \text{ определена}$$

выражением (6.15). В частном случае

$$u(x, t) = A \left(t + \frac{x^2}{4a^2} + \frac{x}{a^2 h} + \frac{1}{a^2 h^2} \right) \operatorname{Erf} \frac{x}{2a\sqrt{t}} - A \sqrt{\frac{t}{\pi}} \left(\frac{x}{a} + \frac{2}{ah} \right) e^{-\frac{x^2}{4a^2t}} - \\ - \frac{A}{a^2 h^2} e^{a^2 h^2 t + hx} \operatorname{Erf} \left(ah\sqrt{t} + \frac{x}{2a\sqrt{t}} \right).$$

$$6.164. \quad u(x, t) = \frac{E_0}{2} \left[e^{\sqrt{RG}x} \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2} \sqrt{\frac{RC}{t}} + \sqrt{\frac{Gt}{C}} \right) + \right. \\ \left. + e^{-\sqrt{RG}x} \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2} \sqrt{\frac{RC}{t}} - \sqrt{\frac{Gt}{C}} \right) \right].$$

$$6.165. \quad u(x, t) = E_0 \left[\operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2} \sqrt{\frac{RC}{t}} \right) - e^{\frac{Rx}{R_0} + \frac{Rt}{R_0^2 C}} \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2} \sqrt{\frac{RC}{t}} + \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{Gt}{C}} \right) \right].$$

$$6.166. \quad u(r, t) = \frac{u_0 r_0}{r} \operatorname{Erf} \left(\frac{r - r_0}{2a\sqrt{t}} \right), \quad r \geq r_0.$$

$$6.167. \quad u(r, t) = \frac{Ar_0}{r} \left\{ \left[t + \frac{(r - r_0)^2}{2a^2} \right] \operatorname{Erf} \left(\frac{r - r_0}{2a\sqrt{t}} \right) - \frac{r - r_0}{a} \sqrt{\frac{t}{\pi}} e^{-\frac{r - r_0}{4a^2t}} \right\}.$$

У к а з а н и е. Функция Грина определена формулой (6.67).

$$6.168. \quad u(x, t) = \frac{u_0}{2} \left[\operatorname{Erf} \left(\frac{x - v_0 t}{2a\sqrt{t}} - \frac{v_0 \sqrt{t}}{2a} \right) + e^{\frac{v_0(x - v_0 t)}{a^2}} \operatorname{Erf} \left(\frac{x - v_0 t}{2a\sqrt{t}} + \frac{v_0 \sqrt{t}}{2a} \right) \right].$$

$$\mathbf{6.169.} \quad P^2(x, t) = P_1^2 + \frac{1}{2}(P_0^2 - P_1^2) \left[1 + \operatorname{erf} \frac{x}{2a\sqrt{t}} - e^{-\frac{V_0(x-2V_0t)}{a^2}} \times \right. \\ \left. \times \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} - \frac{V_0\sqrt{t}}{a} \right) \right],$$

$$a^2 = \frac{kP_0}{\mu} \left[m + \frac{abRT}{(1+aP_0)^2} \right]^{-1}.$$

$$\mathbf{6.170.} \quad u(x, t) = u_0 \left[\operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) - e^{hx+h^2Dt} \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + h\sqrt{Dt} \right) \right].$$

$$\mathbf{6.171.} \quad u(r, t) = \frac{q_0 r_0^2}{kr} \left[\operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2a\sqrt{t}} \right) - e^{\frac{r-r_0}{r_0} + \frac{a^2 t}{r_0^2}} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2a\sqrt{t}} + \frac{a\sqrt{t}}{r_0} \right) \right].$$

У к а з а н и е. Функция Грина имеет вид (6.73), где $b = \frac{1}{r_0}$.

6.172. Если $\alpha r_0^2 \neq D$, то

$$u(r, t) = \frac{q_0 r_0^2}{2Dr} \left[\frac{e^{-\sqrt{\frac{\alpha}{D}}(r-r_0)}}{\sqrt{\frac{\alpha}{D}} + 1} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2\sqrt{Dt}} - \sqrt{\alpha t} \right) - \right. \\ \left. - \frac{e^{\sqrt{\frac{\alpha}{D}}(r-r_0)}}{\sqrt{\frac{\alpha}{D}} - 1} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2\sqrt{Dt}} + \sqrt{\alpha t} \right) + \frac{2e^{\frac{r-r_0}{r_0} + \left(\frac{D}{r_0^2} - \alpha\right)t}}{\frac{\alpha r_0^2}{D} - 1} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2\sqrt{Dt}} + b\sqrt{Dt} \right) \right].$$

Если $\alpha r_0^2 = D$, то

$$u(r, t) = \frac{q_0 r_0^2}{2Dr} \left[\frac{1}{2} e^{-\frac{r-r_0}{r_0}} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2\sqrt{Dt}} - \frac{\sqrt{Dt}}{r_0} \right) - \right. \\ \left. - \left(\frac{1}{2} + \frac{r-r_0}{r_0} + \frac{2Dt}{r_0^2} \right) e^{\frac{r-r_0}{r_0}} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2\sqrt{Dt}} + \frac{\sqrt{Dt}}{r_0} \right) \right].$$

У к а з а н и е. Функция Грина определена формулой (6.73) при $b = \frac{1}{r_0}$.

6.173. Если $\alpha \neq b^2 D$, где $b = \frac{1}{r_0} + h$, то

$$u(r, t) = \frac{u_0 h r_0}{2r} \left[\frac{e^{-\sqrt{\frac{\alpha}{D}}(r-r_0)}}{\sqrt{\frac{\alpha}{D}} + b} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2\sqrt{Dt}} - \sqrt{\alpha t} \right) - \right. \\ \left. - \frac{e^{\sqrt{\frac{\alpha}{D}}(r-r_0)}}{\sqrt{\frac{\alpha}{D}} - b} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2\sqrt{Dt}} + \sqrt{\alpha t} \right) + \frac{2b e^{b(r-r_0) + (b^2 D - \alpha)t}}{\frac{\alpha}{D} - b^2} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2\sqrt{Dt}} + b\sqrt{Dt} \right) \right].$$

Если $\alpha = b^2 D$, то

$$u(r, t) = \frac{u_0 h r_0}{2r} \left\{ \frac{1}{2} e^{-b(r-r_0)} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2\sqrt{Dt}} - b\sqrt{Dt} \right) - \right. \\ \left. - \left[\frac{1}{2} + b(r-r_0) + 2b^2 Dt \right] e^{b(r-r_0)} \operatorname{Erf} \left(\frac{r-r_0}{2\sqrt{Dt}} + b\sqrt{Dt} \right) \right\}.$$

У к а з а н и е. Функция Грина имеет вид (6.72), где $b = \frac{1}{r_0} + h$.

$$6.174. \quad u(x, y, z, t) = u_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) \operatorname{erf} \left(\frac{y}{2a\sqrt{t}} \right) \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2a\sqrt{t}} \right) \right].$$

$$6.175. \quad P^2(x, y, t) = P_1^2 + (P_0^2 - P_1^2) \operatorname{erf} \frac{x}{2a\sqrt{t}} \operatorname{erf} \frac{y}{2a\sqrt{t}},$$

$$a^2 = \frac{kP_0}{\mu} \left[m + \frac{abRT}{(1 + aP_0)^2} \right]^{-1}.$$

$$6.176. \quad P^2(x, y, t) = P_1^2 + \frac{1}{2}(P_0^2 - P_1^2) \operatorname{erf} \frac{y}{2a\sqrt{t}} \times \\ \times \left[1 + \operatorname{erf} \frac{x}{2a\sqrt{t}} - e^{-\frac{V_0(x-2V_0t)}{a^2}} \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} - \frac{V_0\sqrt{t}}{a} \right) \right],$$

$$\text{где } a^2 = \frac{kP_0}{\mu} \left[m + \frac{abRT}{(1 + aP_0)^2} \right]^{-1}.$$

$$6.177. \quad u(x, y, z, t) = u_0 \sin(\alpha x + \beta y) \left[\operatorname{ch} \gamma z - \frac{1}{2} e^{\gamma z} \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2a\sqrt{t}} + \gamma a\sqrt{t} \right) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} e^{-\gamma z} \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2a\sqrt{t}} - \gamma a\sqrt{t} \right) \right], \quad \text{где } \gamma = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}.$$

$$6.178. \quad u(x, y, z, t) = \frac{u_0}{2} \sin \alpha y \left[2 \operatorname{ch} \alpha x - \right. \\ \left. - e^{\alpha x} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} + \alpha a\sqrt{t} \right) - e^{-\alpha x} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} - \alpha a\sqrt{t} \right) \right].$$

$$6.179. \quad q(t) = \frac{k}{a\sqrt{\pi}} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{\mu(\tau) d\tau}{\sqrt{t-\tau}}.$$

$$6.180. \quad u(x, 0) = u_0 \cos \frac{\alpha}{a} x.$$

$$6.181. \quad u(x, 0) = \frac{qa}{k\alpha} \sin \frac{\alpha}{a} x.$$

$$6.182. \quad G(M, P) = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{r_{MP}} - \ln \frac{1}{r_{MP_1}} \right),$$

$$M = (x, y), \quad P = (\xi, \eta), \quad P_1 = (\xi, -\eta), \quad y \geq 0, \quad \eta \geq 0.$$

$$6.183. \quad G(M, P) = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{r_{MP}} - \ln \frac{1}{r_{MP_1}} - \ln \frac{1}{r_{MP_2}} + \ln \frac{1}{r_{MP_3}} \right), \quad M = (x, y), \\ P = (\xi, \eta), \quad P_1 = (\xi, -\eta), \quad P_2 = (-\xi, \eta), \quad P_3 = (-\xi, -\eta), \\ x \geq 0, \quad y \geq 0, \quad \xi \geq 0, \quad \eta \geq 0.$$

$$6.184. \quad G(r, \varphi, \rho, \psi) = \frac{1}{4\pi} \ln \frac{r^{2n} + \rho^{2n} - 2r^n \rho^n \cos n(\varphi + \psi)}{r^{2n} + \rho^{2n} - 2r^n \rho^n \cos n(\varphi - \psi)}, \\ 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{n}, \quad 0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{n}.$$

$$\text{У к а з а н и е. Применить формулу: } z^n - r^n e^{in\varphi} = \prod_{m=0}^{n-1} \left[z - r e^{i\left(\varphi + \frac{2\pi m}{n}\right)} \right].$$

$$6.185. \quad G(M, P) = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{r_{MP'}}{r_{MP}} - \ln \frac{r_{MP_1'}}{r_{MP_1}} \right), \quad M = (r, \varphi), \quad P = (\rho, \psi),$$

$$P' = (\rho, -\psi), \quad P_1 = \left(\frac{r_0^2}{\rho}, \psi \right), \quad P_1' = \left(\frac{r_0^2}{\rho}, -\psi \right), \\ r \leq r_0, \quad \rho \leq r_0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi, \quad 0 \leq \psi \leq \pi.$$

$$\mathbf{6.186.} \quad G(r, \varphi, \rho, \psi) = \frac{1}{4\pi} \left(\ln \frac{r^{2n} + \rho^{2n} - 2r^n \rho^n \cos n(\varphi + \psi)}{r^{2n} + \rho^{2n} - 2r^n \rho^n \cos n(\varphi - \psi)} - \ln \frac{r^{2n} + \rho_1^{2n} - 2r^n \rho_1^n \cos n(\varphi + \psi)}{r^{2n} + \rho_1^{2n} - 2r^n \rho_1^n \cos n(\varphi - \psi)} \right),$$

$$r \leq r_0, \quad \rho \leq r_0, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{n}, \quad 0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{n}, \quad \rho_1 = \frac{r_0^2}{\rho}.$$

$$\mathbf{6.187.} \quad G(M, P) = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{r_{MP'}}{r_{MP}} - \ln \frac{r_{MP_1'}}{r_{MP_1}} \right), \quad M = (r, \varphi), \quad P = (\rho, \psi),$$

$$P' = (\rho, -\psi), \quad P_1 = \left(\frac{r_0^2}{\rho}, \psi \right), \quad P_1' = \left(\frac{r_0^2}{\rho}, -\psi \right),$$

$$r \leq r_0, \quad \rho \leq r_0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi, \quad 0 \leq \psi \leq \pi.$$

$$\mathbf{6.188.} \quad G(M, P) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{MP}} - \frac{1}{r_{MP_1}} \right),$$

$$M = (x, y, z), \quad P = (\xi, \eta, \zeta), \quad P_1(\xi, \eta, -\zeta), \quad z \geq 0, \quad \zeta \geq 0.$$

$$\mathbf{6.189.} \quad G(M, P) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{MP}} - \frac{1}{r_{MP_1}} - \frac{1}{r_{MP_2}} + \frac{1}{r_{MP_3}} \right), \quad M = (x, y, z),$$

$$P = (\xi, \eta, \zeta), \quad P_1 = (\xi, -\eta, \zeta), \quad P_2 = (-\xi, \eta, \zeta), \quad P_3 = (-\xi, -\eta, \zeta),$$

$$x \geq 0, \quad y \geq 0, \quad \xi \geq 0, \quad \eta \geq 0.$$

$$\mathbf{6.190.} \quad G(M, P) = \frac{1}{4\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \left(\frac{1}{r_{MP_k}} - \frac{1}{r_{MQ_k}} \right), \quad M = (r, \varphi, z)$$

$$P_k = \left(\rho, \frac{2k\pi}{n} + \psi, \zeta \right), \quad Q_k = \left(\rho, \frac{2k\pi}{n} - \psi, \zeta \right),$$

$$r \geq 0, \quad \rho \geq 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{n}, \quad 0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{n}.$$

$$\mathbf{6.191.} \quad G(M, P) = \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^4 \left(\frac{1}{r_{MP_k}} - \frac{1}{r_{MP'_k}} \right), \quad M = (x, y, z), \quad P_1 = (\xi, \eta, \zeta),$$

$$P_2 = (-\xi, -\eta, \zeta), \quad P_3 = (-\xi, \eta, -\zeta), \quad P_4 = (\xi, -\eta, -\zeta), \quad P'_k(\mathbf{r}) = P_k(-\mathbf{r}),$$

$$x \geq 0, \quad y \geq 0, \quad z \geq 0, \quad \xi \geq 0, \quad \eta \geq 0, \quad \zeta \geq 0.$$

$$\mathbf{6.192.} \quad G(M, P) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{MP}} - \frac{r_0}{\rho} \frac{1}{r_{MP_1}} \right),$$

$$M = (r, \theta, \varphi), \quad P = (\rho, \theta', \varphi'), \quad P_1 = \left(\frac{r_0^2}{\rho}, \theta', \varphi' \right), \quad r \leq r_0, \quad \rho \leq r_0$$

$$\mathbf{6.193.} \quad G(M, P) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{MP}} - \frac{1}{r_{MP'}} - \frac{r_0}{\rho} \frac{1}{r_{MP_1}} + \frac{r_0}{\rho} \frac{1}{r_{MP'_1}} \right), \quad M = (r, \theta, \varphi),$$

$$P = (\rho, \theta', \varphi'), \quad P_1 = \left(\frac{r_0^2}{\rho}, \theta', \varphi' \right), \quad P' = (\rho, \pi - \theta', \varphi'), \quad P'_1 = \left(\frac{r_0^2}{\rho}, \pi - \theta', \varphi' \right),$$

$$r \leq r_0, \quad \rho \leq r_0, \quad \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad \theta' \leq \frac{\pi}{2}.$$

$$\mathbf{6.194.} \quad G(M, P) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{MP}} - \frac{r_0}{\rho} \frac{1}{r_{MP_1}} \right),$$

$$M = (r, \theta, \varphi), \quad P = (\rho, \theta', \varphi'), \quad P_1 = \left(\frac{r_0^2}{\rho}, \theta', \varphi' \right), \quad r \geq r_0, \quad \rho \geq r_0.$$

$$6.195. \quad G(M, P) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{MP}} - \frac{1}{r_{MP'}} - \frac{r_0}{\rho} \frac{1}{r_{MP_1}} + \frac{r_0}{\rho} \frac{1}{r_{MP'_1}} \right),$$

$$M = (r, \theta, \varphi), \quad P = (\rho, \theta', \varphi'), \quad P_1 = \left(\frac{r_0^2}{\rho}, \theta', \varphi' \right), \quad P' = (\rho, \pi - \theta', \varphi'),$$

$$P'_1 = \left(\frac{r_0^2}{\rho}, \pi - \theta', \varphi' \right), \quad r \geq r_0, \quad \rho \geq r_0, \quad \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad \theta' \leq \frac{\pi}{2}.$$

$$6.196. \quad G(M, P) = \frac{1}{4\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{r_{MP_k}} - \frac{1}{r_{MQ_k}} \right), \quad M = (x, y, z),$$

$$P_k = (\xi, \eta, \zeta + 2kl), \quad Q_k = (\xi, \eta, -\zeta + 2kl), \quad 0 \leq z \leq l, \quad 0 \leq \zeta \leq l.$$

$$6.197. \quad u(r, \theta) = \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos \theta}} - \frac{r_0}{d} \cdot \frac{1}{\sqrt{r^2 + d_1^2 - 2rd_1 \cos \theta}} \right), \quad d_1 = \frac{r_0^2}{d}.$$

$$6.198. \quad u(r, \theta) = q \left[\ln \frac{1}{r^2 + d^2 - 2rd \cos \varphi} - \ln \frac{1}{r^2 + d_1^2 - 2rd_1 \cos \varphi} \right] + C, \quad d_1 = \frac{r_0^2}{d}.$$

$$6.199. \quad u(x, y) = p \frac{4y(x^2 + y^2 - h^2)}{(x^2 + y^2 + h^2)^2 - 4y^2 h^2}.$$

$$6.200. \quad u(x, y, z) = Px \left[\frac{1}{(x^2 + y^2 + (z-h)^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{(x^2 + y^2 + (z+h)^2)^{\frac{3}{2}}} \right].$$

$$6.201. \quad u(r, \varphi) = 2p \left(\frac{r \cos \varphi - d}{r^2 + d^2 - 2rd \cos \varphi} + \frac{r}{d} \cdot \frac{r - d_1 \cos \varphi}{r^2 + d_1^2 - 2rd_1 \cos \varphi} \right), \quad d_1 = \frac{r_0^2}{d}.$$

$$6.202. \quad u(r, \theta) = P \left[\frac{r \cos \theta - d}{(r^2 + d^2 - 2rd \cos \theta)^{\frac{3}{2}}} + \frac{r_0 r}{d^2} \cdot \frac{r - d_1 \cos \theta}{(r^2 + d_1^2 - 2rd_1 \cos \theta)^{\frac{3}{2}}} \right], \quad d_1 = \frac{r_0^2}{d}.$$

$$6.203. \quad Q' = -\frac{r_0}{d} Q.$$

$$6.204. \quad Q' = -\frac{2r_0 q}{\ln} \frac{l + \sqrt{l^2 + d^2}}{d}.$$

$$6.205. \quad 1) \quad Q' = -\frac{\pi r_0}{d} Q; \quad 2) \quad Q' = -\frac{2r_0}{d} Q.$$

$$6.206. \quad Q' = -\frac{r_0}{\sqrt{d^2 + r_1^2}} Q.$$

$$6.207. \quad Q' = -\frac{2Qr_0}{r_1^2} (\sqrt{d^2 + r_1^2} - d^2).$$

$$6.208. \quad G(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\varepsilon_1} \left(\frac{1}{r_{MP}} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \frac{1}{r_{MP_1}} \right), & z \geq 0, \quad \zeta \geq 0, \\ \frac{1}{4\pi\varepsilon_2} \frac{1}{r_{MP}}, & z \leq 0, \quad \zeta \geq 0, \end{cases}$$

$$r_{MP} = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}, \quad r_{MP_1} = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta)^2}.$$

Функция Грина при $\zeta \leq 0$ получается заменами $z \rightarrow -z$, $\zeta \rightarrow -\zeta$, $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 1$.

$$6.209. \quad G(x, y, \xi, \eta) = \frac{1}{2\pi} \cdot \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon_1} \left(\ln \frac{1}{r_{MP}} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \ln \frac{1}{r_{MP_1}} \right), & y \geq 0, \quad \eta \geq 0, \\ \frac{2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \ln \frac{1}{r_{MP}}, & y \leq 0, \quad \eta \geq 0, \end{cases}$$

$r_{MP} = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$, $r_{MP_1} = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y+\eta)^2}$. Функция Грина при $\eta \leq 0$ получается заменами $y \rightarrow -y$, $\eta \rightarrow -\eta$, $\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_2$, $\varepsilon_2 \rightarrow \varepsilon_1$.

$$6.210. \quad G(\mathbf{r}, \rho) = \frac{1}{2\pi} \cdot \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon_1} \left(\ln \frac{1}{r_{MP}} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \ln \frac{r_0}{\rho r_{MP_1}} \right), & r \leq r_0, \rho \leq r_0, \\ \frac{1}{\varepsilon_2} \left(\frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \ln \frac{1}{r_{MP}} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \ln \frac{r_0}{r} \right), & r \geq r_0, \rho \leq r_0, \\ \frac{2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \ln \frac{1}{r_{MP}}, & r \leq r_0, \rho \geq r_0, \\ \frac{1}{\varepsilon_2} \left(\ln \frac{1}{r_{MP}} + \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \ln \frac{r}{\rho r_{MP_1}} \right), & r \geq r_0, \rho \geq r_0, \end{cases}$$

$$M = (r, \varphi), \quad P = (\rho, \psi), \quad P_1 = \left(\frac{r_0^2}{\rho}, \psi \right).$$

$$6.211. \quad u(x, y) = \frac{4q}{\varepsilon + 1} \ln \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} + C.$$

$$6.212. \quad u(x, y, z) = \frac{2pz}{(\varepsilon + 1)(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

$$6.213. \quad \mathbf{A}(r, \theta) = \frac{2\mu_1\mu_2 \sin \theta}{c(\mu_1 + \mu_2)r^3} \mathbf{e}_\varphi.$$

$$6.214. \quad \mathbf{F} = \frac{Q^2}{4d^2} \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \mathbf{e}_d.$$

$$6.215. \quad \mathbf{F} = \frac{q^2}{d} \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \mathbf{e}_d.$$

$$6.216. \quad \mathbf{F} = 2q^2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \frac{\mathbf{d}}{r_0^2 - d^2} \mathbf{e}_d.$$

$$6.217. \quad \mathbf{F} = \frac{2q^2}{d^2} \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \frac{r_0^2 \mathbf{d}}{d^2 - r_0^2} \mathbf{e}_d.$$

$$6.218. \quad \mathbf{F} = \frac{2J^2}{c^2} \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \frac{\mathbf{d}}{r_0^2 - d^2} \mathbf{e}_d.$$

$$6.219. \quad \mathbf{F} = \frac{2J^2}{c^2} \frac{1 - \mu}{1 + \mu} \frac{r_0^2 \mathbf{d}}{d^2 - r_0^2} \mathbf{e}_d.$$

$$6.220. \quad \sigma(x, y) = -\frac{Qd}{2\pi(x^2 + y^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad Q' = -Q.$$

$$6.221. \quad \sigma(x) = -\frac{qd}{\pi(x^2 + d^2)}, \quad q' = -q.$$

$$6.222. \quad 1) \quad \sigma(x, y) = -\frac{Q y_0}{2\pi} \left\{ [(x - x_0)^2 + y_0^2 + z^2]^{-\frac{3}{2}} - [(x + x_0)^2 + y_0^2 + z^2]^{-\frac{3}{2}} \right\},$$

$$Q_x = -\frac{2Q}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{x_0}{y_0};$$

$$2) \quad \sigma(x, y) = -\frac{Q x_0}{2\pi} \left\{ [x_0^2 + (y - y_0)^2 + z^2]^{-\frac{3}{2}} - [x_0^2 + (y + y_0)^2 + z^2]^{-\frac{3}{2}} \right\},$$

$$Q_y = -\frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{y_0}{x_0}.$$

$$6.223. \quad \sigma(\varphi) = -\frac{q}{2\pi r_0} \cdot \frac{d^2 - r_0^2}{d^2 + r_0^2 - 2r_0 d \cos \varphi}, \quad q' = -q, \quad \mathbf{p} = -q \frac{r_0^2}{d^2} \mathbf{d}.$$

$$6.224. \sigma(\theta) = -\frac{Q}{4\pi r_0} \cdot \frac{|r_0^2 - d^2|}{(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \theta)^{\frac{3}{2}}},$$

$$1) Q' = -Q, \quad \mathbf{P}' = -Q\mathbf{d}; \quad 2) Q' = -\frac{r_0}{d}Q, \quad \mathbf{P}' = -Q\frac{r_0^2}{d^3}\mathbf{d}.$$

$$6.225. \sigma(\varphi) = -\frac{2qd}{\pi} \cdot \frac{(r_0^2 - d^2) \sin \varphi}{(r_0^2 + d^2)^2 - 4r_0^2 d^2 \sin^2 \varphi}, \quad \sigma(r) = -\frac{qd}{\pi} \cdot \frac{(r_0^2 - d^2)(r_0^2 - r^2)}{(r^2 + d^2)(r_0^4 + r^2 d^2)}.$$

$$6.226. \sigma(\varphi) = -\frac{2qd}{\pi} \cdot \frac{(d^2 - r_0^2) \cos \varphi}{(r_0^2 + d^2)^2 - 4r_0^2 d^2 \cos^2 \varphi}, \quad \sigma(r) = -\frac{qd}{\pi} \cdot \frac{(d^2 - r_0^2)(r^2 - r_0^2)}{(r_0^2 + d^2)(r_0^4 + r^2 d^2)}.$$

$$6.227. 1) \sigma(x, y) = -\frac{q}{2\pi\sqrt{x^2 + y^2 + l^2}};$$

$$2) \sigma(x, y) = -\frac{ql}{2\pi(y^2 + l^2)} \left(1 + \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + l^2}} \right).$$

$$6.228. 1) \sigma(x) = -\frac{2pdx}{\pi(x^2 + d^2)^2}; \quad 2) \sigma(x) = \frac{p(x^2 - d^2)}{\pi(x^2 + d^2)^2}.$$

$$6.229. 1) \sigma(x) = \frac{3Pdx}{2\pi(x^2 + y^2 + d^2)^{\frac{5}{2}}}; \quad 2) \sigma(x) = \frac{P(x^2 + y^2 - 2d^2)}{2\pi(x^2 + y^2 + d^2)^{\frac{5}{2}}}.$$

$$6.230. \sigma(\varphi) = p \frac{(d^2 + r_0^2) \cos \varphi - 2dr_0}{\pi(d^2 + r_0^2 - 2dr_0 \cos \varphi)^2}, \quad q' = 0, \quad \mathbf{p}' = \frac{r_0^2}{d^2}\mathbf{p}.$$

$$6.231. \sigma(\varphi) = -p \frac{(r_0^2 - d^2) \sin \varphi}{\pi(d^2 + r_0^2 - 2dr_0 \cos \varphi)^2}, \quad q' = 0, \quad \mathbf{p}' = -\mathbf{p}.$$

$$6.232. \sigma(\theta) = -P \frac{d^3 - 5dr_0^2 + r_0(3r_0^2 + d^2) \cos \theta}{4\pi r_0(d^2 + r_0^2 - 2dr_0 \cos \theta)^{\frac{5}{2}}}, \quad Q' = 0, \quad \mathbf{P}' = -\mathbf{P}.$$

$$6.233. \sigma(\theta, \varphi) = -\frac{3P|r_0^2 - d^2| \sin \theta \cos \varphi}{4\pi(r_0^2 + d^2 - 2dr_0 \cos \theta)^{\frac{5}{2}}},$$

$$1) Q' = 0, \quad \mathbf{P}' = -\mathbf{P}; \quad 2) Q' = 0, \quad \mathbf{P}' = -\frac{r_0^3}{d^3}\mathbf{P}.$$

$$6.234. 1) \mathbf{F} = -\frac{3P^2(\varepsilon - 1)}{8d^4(\varepsilon + 1)} \mathbf{e}_z; \quad 2) \mathbf{F} = -\frac{3P^2(\varepsilon - 1)}{16d^4(\varepsilon + 1)} \mathbf{e}_z.$$

$$6.235. \mathbf{F} = \frac{p^2(\varepsilon - 1)}{2d^3(\varepsilon + 1)} \mathbf{e}_z.$$

$$6.236. \mathbf{F} = \frac{4p^2(\varepsilon - 1)dr_0^2}{(\varepsilon + 1)(r_0^2 - d^2)^3} \mathbf{e}_d.$$

$$6.237. \mathbf{F} = \frac{4p^2(\varepsilon - 1)dr_0^2}{(\varepsilon + 1)(d^2 - r_0^2)^3} \mathbf{e}_d.$$

$$6.238. u(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{yf(\xi)d\xi}{(\xi - x)^2 + y^2}. \quad \text{У к а з а н и е. См. задачу 6.182.}$$

$$6.239. 1) \frac{u_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{x^2 + y^2 - l^2}{2ly}; \quad 2) \frac{u_0 l^2 (y + |a|)}{|a|(x^2 + (y + |a|)^2)};$$

$$3) u_0 l^2 \left[\frac{1}{2|a|} \frac{y + |a|}{x^2 + (y + |a|)^2} + \frac{x^2 - y^2 + a^2}{\pi A_1} \operatorname{arctg} \frac{x}{y} - \frac{xy}{\pi A_1} \ln \frac{|a|}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right];$$

- 4) $\frac{2l^2 u_0}{\pi A_1} \left[(x^2 - y^2 + a^2) \operatorname{arctg} \frac{x}{y} - xy \ln \frac{a^2}{x^2 + y^2} \right];$
- 5) $\frac{u_0 l}{\pi A_1} \left[x(x^2 + y^2 + a^2) \operatorname{arctg}(-\frac{x}{y}) - |a|xy - y(x^2 + y^2 - a^2) \ln \frac{|a|}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right];$
- 6) $\frac{u_0 l x}{(x^2 + (y + |a|)^2)};$
- 7) $\frac{u_0 l^2}{\pi((x + |a|)^2 + y^2)} \left[\frac{y}{|a|} (x + |a|)^2 + y^2 - y(x + |a|) \ln \frac{a^2}{x^2 + y^2} + (x + |a|)^2 \left(\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right) \right];$
- 8) $\frac{u_0 l}{A_2} \left[x(x^2 + y^2 - a^2) - \frac{2a}{\pi} (x^2 - y^2 - a^2) \operatorname{arctg} \frac{x}{y} - \frac{y(x^2 + y^2 + a^2)}{\pi} \ln \frac{a^2}{x^2 + y^2} \right],$
 $A_1 = (x^2 + y^2 - a^2)^2 + 4a^2 x^2, A_2 = (x^2 + y^2 + a^2)^2 - 4a^2 x^2.$

6.240. $u = \frac{u_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{(x^2 + y^2)^2 - l^4}{4l^2 xy} = \frac{u_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{r^4 - l^4}{2l^2 r^2 \sin 2\varphi}.$

6.241. $u(x, y) = \frac{u_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{l^2 + x^2 - y^2}{2lx}.$

6.242. $u(r, \varphi) = \frac{u_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{r^n - l^n \cos n\varphi}{l^n \sin n\varphi}.$

6.243. $u(x, y) = u_0(e^{-y} \sin x - e^{-x} \sin y).$

6.245. $u(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(r_0^2 - r^2)f(\psi)d\psi}{r^2 + r_0^2 - 2r_0 r \cos(\varphi - \psi)}.$

1) $u(r, \varphi) = \frac{3u_0}{4} \left(1 + \frac{3r^4}{r_0^4} \cos 4\varphi \right);$ 2) $u(r, \varphi) = \frac{u_0}{4} \left(3 \frac{r}{r_0} \sin \varphi - \frac{r^3}{r_0^3} \sin 3\varphi \right).$

6.246. 1) $u(r, \varphi) = \frac{(16r_0^2 - r^2)u_0}{15(16r_0^2 + r^2 + 8r_0 r \cos \varphi)};$ 2) $\frac{u_0(25r_0^2 - 9r^2)}{8(9r^2 + 25r_0^2 + 30rr_0 \sin \varphi)};$

3) $\frac{2u_0 r r_0 \sin \varphi}{r^2 + 49r_0^2 + 14rr_0 \sin \varphi};$ 4) $\frac{5u_0 r r_0 \sin \varphi + 6u_0(r_0^2 - r^2)}{5(4r^2 + 9r_0^2 - 12rr_0 \sin \varphi)};$

5) $\frac{u_0 r r_0 \cos \varphi}{9r^2 + 16r_0^2 + 24rr_0 \sin \varphi};$ 6) $\frac{6u_0 r r_0 \cos \varphi - 3u_0(r_0^2 - r^2)}{3(r^2 + 25r_0^2 + 10rr_0 \sin \varphi)}.$

6.247. $u(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(r^2 - r_0^2)f(\psi)d\psi}{r_0^2 + r^2 - 2rr_0 \cos(\varphi - \psi)}.$

1) $u(r, \varphi) = \frac{u_0 r_0}{16} \left(2 \cos \varphi - \frac{r_0^2}{r^2} \cos 3\varphi - \frac{r_0^4}{r^4} \cos 5\varphi \right);$ 2) $u(r, \varphi) = u_0 \frac{r_0^n}{r^n} \sin(n\varphi + \alpha).$

6.248. 1) $\frac{u_0(5r^2 - r_0^2)}{2(r^2 + 5r_0^2 - 2\sqrt{5}rr_0 \sin \varphi)};$ 2) $\frac{u_0(3r^2 - r_0^2)}{3r^2 + r_0^2 + 2\sqrt{3}rr_0 \cos \varphi};$

3) $\frac{2u_0 r r_0 \sin \varphi}{r^2 + 49r_0^2 + 14rr_0 \cos \varphi};$ 4) $\frac{u_0 r r_0 \cos \varphi}{36r^2 + 25r_0^2 - 60rr_0 \sin \varphi};$

5) $\frac{6u_0 r r_0 \sin \varphi + u_0 \sqrt{7}(r^2 - r_0^2)}{3(7r^2 + r_0^2 - 2\sqrt{7}rr_0 \sin \varphi)};$ 6) $\frac{12u_0 r r_0 \cos \varphi - \sqrt{13}u_0(r^2 - r_0^2)}{6(13r^2 + r_0^2 + 2\sqrt{13}rr_0 \sin \varphi)}.$

$$6.249. \quad u(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{zf(\xi, \eta) d\xi d\eta}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}};$$

$$u(x, y, z) = \frac{u_0}{4} + \frac{u_0}{2\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{y}{z} + \operatorname{arctg} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right).$$

$$6.250. \quad u(x, y, z) = \frac{2u_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{xz}{y\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}.$$

$$6.251. \quad u(x, y, z) = u_0 e^{-z\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \sin(\alpha x + \beta y).$$

$$6.252. \quad q(x, y) = -\frac{q_0}{\pi} \ln \frac{\sqrt{(l_1 - x)^2 + y^2 + l_2^2} - x + l_1}{\sqrt{(l_1 + x)^2 + y^2 + l_2^2} - x - l_1}.$$

$$6.253. \quad u(x, y, z) = \frac{2}{\pi} \left(u_1 \operatorname{arctg} \frac{yz}{xr} + u_2 \operatorname{arctg} \frac{zx}{yr} + u_3 \operatorname{arctg} \frac{xy}{zr} \right),$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

$$6.254. \quad u(r, \theta, \varphi) = \frac{r_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{(r_0^2 - r^2) f(\theta', \varphi') \sin \theta' d\theta' d\varphi'}{(r_0^2 + r^2 - 2rr_0 \cos \gamma)^{\frac{3}{2}}},$$

$$\cos \gamma = \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos(\varphi - \varphi'); \quad u(r, \theta, \varphi) = u_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \sin^n \theta \cos n\varphi.$$

$$6.255. \quad u(r, \theta, \varphi) = \frac{r_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{(r^2 - r_0^2) f(\theta', \varphi') \sin \theta' d\theta' d\varphi'}{(r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \gamma)^{\frac{3}{2}}}, \quad \cos \gamma \text{ тот же, что и в}$$

ответе к предыдущей задаче; $u(r, \theta, \varphi) = u_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{n+1} \cdot \sin^n \theta \cdot \sin n\varphi.$

$$6.256. \quad u(r, \theta, \varphi) = u_0 \frac{r_0}{r} + \frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{r_{MP}} - \frac{r_0}{d} \frac{1}{r_{MP_1}} \right), \quad M = (r, \theta, \varphi),$$

$$P = (d, 0, 0), \quad P_1 = \left(\frac{r_0^2}{d}, 0, 0 \right).$$

$$6.257. \quad \sigma(\theta, \varphi) = \frac{Q_0}{4\pi r_0^2} + \frac{Q}{4\pi d r_0} \left[1 - d \frac{d^2 - r_0^2}{(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \theta)^{\frac{3}{2}}} \right].$$

$$6.258. \quad G(M, P) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{MP}} + \frac{r_0}{rr_{MP_1}} + \frac{1}{r_0} \ln \frac{2r_0^2}{r_0^2 - \rho r_1 \cos \gamma + rr_{MP_1}} \right) + C,$$

$$M = (r, \theta, \varphi), \quad P = (\rho, \theta', \psi), \quad P_1 = (\rho_1, \theta', \psi), \quad \rho_1 = \frac{r_0^2}{\rho}, \quad r_{MP} = \sqrt{r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos \gamma},$$

$$r_{MP_1} = \sqrt{r^2 + \rho_1^2 - 2r\rho_1 \cos \gamma}, \quad \cos \gamma = \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos(\psi - \varphi).$$

У к а з а н и е. Задачу решать методом разделения переменных; применить производящую функцию для полиномов Лежандра.

$$6.259. \quad u(r, \theta, \varphi) = \frac{r_0^2}{4\pi} \int_S \left[\frac{2}{\sqrt{r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos \gamma}} - \frac{1}{r_0} \ln(r_0 - r \cos \gamma + \sqrt{r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos \gamma}) \right] f(\theta', \psi) \sin \theta d\theta d\psi + C,$$

обозначения те же, что и в ответе к предыдущей задаче.

$$6.260. \quad \mathbf{j} = -\frac{1}{\sigma} \nabla u, \quad \text{потенциал } u \text{ дан в ответе к задаче 5.198.}$$

$$\mathbf{j} = -\frac{1}{\sigma} \nabla u, \text{ потенциал } u(r, \theta, \varphi) = \frac{J}{4\pi\sigma} \left(\frac{2}{\sqrt{r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos \theta}} - \frac{1}{r_0} \ln(r_0 - r \cos \theta + \sqrt{r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos \theta}) \right) - \frac{J}{8\pi^2\sigma} \left(\frac{2}{\sqrt{r^2 + \rho^2 - 2r\rho \sin \theta \cos \varphi}} - \frac{1}{r_0} \ln(r_0 - r \sin \theta \cos \varphi + \sqrt{r^2 + \rho^2 - 2r\rho \sin \theta \cos \varphi}) \right).$$

$$\mathbf{6.262.} \quad \Delta G = -\delta(M, P), \quad M, P \in \Omega = \mathbb{R}^3 \setminus B_{r_0},$$

$$\frac{\partial G}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = 0.$$

$$G(M, P) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{MP}} + \frac{r_0}{\rho r_{M, P_1}} + \frac{1}{r_0} \ln \frac{\rho r (1 - \cos \gamma)}{r_0^2 - \rho r \cos \gamma + \rho r_{MP_1}} \right). \quad \text{Обозначения те же, что и в задаче 6.258.}$$

$$\mathbf{6.263.} \quad u(r, \theta, \varphi) = \frac{r_0^2}{4\pi} \int_S \left[\frac{2}{\sqrt{r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos \gamma}} + \frac{1}{r_0} \ln \frac{r(1 - \cos \gamma)}{r_0 - r \cos \gamma + \sqrt{r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos \gamma}} \right] f(\theta', \psi) \sin \theta d\theta d\psi,$$

обозначения те же, что и в ответе к задаче 6.258. У к а з а н и е. В неограниченной области с конечной границей для гармонической функции, регулярной на бесконечности (т.е. $u = \mathcal{O}\left(\frac{1}{r}\right)$, $|\nabla u| = \mathcal{O}\left(\frac{1}{r^2}\right)$, $r \rightarrow \infty$), остается верным интегральное представление (6.24) (см. [87], глава IV, § 2 или [37], глава XVIII, § 5), а потому и формула (6.25), в которой n — внешняя нормаль.

6.264. В системе координат с началом в точке O , ось Oz которой проходит чрез точку P и направлена от O к P ,

$$\mathbf{V} = \frac{Q_0}{4\pi\rho_0} \left[\frac{1}{(r+d)^2} - \frac{r_0^3}{r(dr+r_0^2)^2} \right] \mathbf{e}_r, \quad r_0 < r, \quad \theta = \pi;$$

$$\mathbf{V} = -\frac{Q_0}{4\pi\rho_0} \left[\frac{1}{(r-d)^2} - \frac{r_0^3}{r(dr-r_0^2)^2} \right] \mathbf{e}_r, \quad r_0 < r < d, \quad \theta = 0;$$

$$\mathbf{V} = \frac{Q_0}{4\pi\rho_0} \left[\frac{1}{(r-d)^2} + \frac{r_0^3}{r(dr-r_0^2)^2} \right] \mathbf{e}_r, \quad d < r, \quad \theta = 0;$$

$$\mathbf{V} = \frac{Q_0}{4\pi\rho_0 r_0} \frac{(3r_0^2 + d^2)d}{(r_0^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} \mathbf{e}_\theta, \quad r = r_0, \quad \theta = \frac{\pi}{2}.$$

$$\mathbf{6.265.} \quad G_2(M, P) = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{r_{MP}} + \ln \frac{r_0}{\rho r_{MP_1}} \right) + C, \quad M = (r, \varphi), \quad P = (\rho, \psi), \quad r_1 = \frac{r_0^2}{\rho}.$$

Р е ш е н и е (фрагменты). Функция Грина — решение краевой задачи

$$\Delta G_2 = -\delta(M, P), \quad M, P \in B(r_0),$$

$$\frac{\partial G_2}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = -\frac{1}{2\pi r_0}.$$

Функцию G_2 можно представить в виде $G_2 = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{r_{MP}} + v(M, P)$, где функция $v(M, P)$ удовлетворяет условиям

$$\Delta v = 0, \quad M, P \in B(r_0),$$

$$\left. \frac{\partial v}{\partial r} \right|_{r=r_0} = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial r} \ln \frac{1}{r_{MP}} \Big|_{r=r_0} - \frac{1}{2\pi r_0}.$$

Решением этой задачи будет

$$v(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0} \right)^n (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi).$$

Для определения коэффициентов следует воспользоваться разложением

$$\ln \frac{1}{r_{MP}} = \ln \frac{1}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\rho}{r} \right)^n \frac{\cos n(\varphi - \psi)}{n}, \quad \frac{\rho}{r} < 1,$$

затем с помощью этого же разложения просуммировать получающийся ряд.

$$\mathbf{6.267.} \quad \mathbf{j} = -\sigma \nabla, \quad u(r, \varphi) = \frac{J}{4\pi\sigma} \ln \frac{r_0^2 + r^2 - 2r_0 r \cos \varphi}{r_0^2 + r^2 + 2r_0 r \sin \varphi}.$$

$$\mathbf{6.268.} \quad 1) \frac{v_0 r_0^2}{15} \frac{r \sin \varphi}{r^2 + 16r_0^2 + 8rr_0 \cos \varphi}; \quad 2) \frac{v_0 r_0^2}{6} \frac{r \cos \varphi}{r^2 + 25r_0^2 - 10rr_0 \sin \varphi};$$

$$3) \frac{v_0 r_0^2}{12} \frac{r \sin \varphi}{r^2 + 49r_0^2 + 14rr_0 \cos \varphi}; \quad 4) \frac{v_0 r_0^2}{4} \frac{r \cos \varphi}{9r^2 + 25r_0^2 - 30rr_0 \sin \varphi}.$$

$$\mathbf{6.269.} \quad \Delta G(M, P) = -\delta(M, P), \quad M, P \in \Omega = \mathbb{R}^2 \setminus B_{r_0},$$

$$\left. \frac{\partial G}{\partial r} \right|_{r=r_0} = 0,$$

$$G(M, P) = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{r_{MP}} + \ln \frac{r}{r_{MP_1}} \right) + C, \quad M = (r, \varphi), \quad P = (\rho, \psi), \quad P_1 = (\rho_1, \psi),$$

$$\rho_1 = \frac{r_0^2}{\rho}.$$

Р е ш е н и е. 1) Функция u , удовлетворяющая условиям

$$\Delta u = -\delta(M, P),$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=r_0} = f,$$

представима суммой $u = v + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{r_{MP}}$, в которой второе слагаемое — частное решение уравнения (см. задачу 10.247, п. 1). Для функции v формируется задача

$$\Delta v = 0,$$

$$\left. \frac{\partial v}{\partial r} \right|_{r=r_0} = f - \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial r} \ln \frac{1}{r_{MP}} \Big|_{r=r_0}, \quad |v| < \infty,$$

которая имеет решение при условии

$$\int_{S_{r_0}} f ds - \frac{1}{2\pi} \int_{S_{r_0}} \frac{\partial}{\partial r} \ln \frac{1}{r_{MP}} ds = 0 \implies \int_{S_{r_0}} f ds = 0.$$

Стало быть, задача для u разрешима при $f = 0$.

2) Решение задачи

$$\Delta v = 0,$$

$$\left. \frac{\partial v}{\partial r} \right|_{r=r_0} = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial r} \ln \frac{1}{r_{MP}} \Big|_{r=r_0}, \quad |v| < \infty,$$

можно найти методом Фурье. Согласно формуле (2.25) из примера 2.12

$$v(r, \gamma) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^n (A_n \cos n\gamma + B_n \sin n\gamma),$$

где γ — угол между векторами $\mathbf{r}$ и ρ . Из граничного условия

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{r_0} (A_n \cos n\gamma + B_n \sin n\gamma) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_0^{n-1}}{\rho^n} \cos n\gamma,$$

в преобразовании которого применено разложение (3.75) из ответа к задаче 3.39, т. 1, следует, что

$$A_0 = C, \quad A_n = \frac{r_0^n}{2\pi n \rho^n}, \quad B_n = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Таким образом,

$$v(r, \gamma) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r_0^2}{\rho r} \right)^n \frac{\cos n\gamma}{n} + C = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_0^2}{\rho r} \right)^2 - 2 \frac{r_0^2}{\rho r} \cos \gamma}} + C.$$

Полученная функция обладает свойством симметрии: $G(M, P) = G(P, M)$.

$$\mathbf{6.270.} \quad u(r, \varphi) = C - \frac{r_0}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\psi) \ln \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\psi - \varphi)}} d\psi.$$

У к а з а н и е. В неограниченной области $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ с конечной границей для гармонической функции, регулярной на бесконечности (т. е. существует $\lim u = \alpha$ и $|\nabla u| = O\left(\frac{1}{r^2}\right)$, $r \rightarrow \infty$), остается верным интегральное представление (6.24) (с указанными изменениями) с точностью до аддитивной постоянной (см. [37], глава XVIII, § 8), а потому и формула (6.25) (также с аддитивной постоянной), где, по-прежнему, n — внешняя нормаль к $\partial\Omega$.

$$\begin{aligned} \mathbf{6.271.} \quad \mathbf{V} &= -\frac{q_0 d \sin \varphi}{\pi \rho_0 (r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)} \mathbf{e}_\varphi; \\ \mathbf{V} &= -\frac{d(r^2 - r_0^2)}{r(d+r)(rd+r_0^2)} \mathbf{e}_r, \quad r_0 < r, \quad \varphi = \pi; \\ \mathbf{V} &= -\frac{d(r^2 - r_0^2)}{r(d-r)(rd-r_0^2)} \mathbf{e}_r, \quad r_0 < r < d, \quad \varphi = 0; \\ \mathbf{V} &= \frac{d(r^2 - r_0^2)}{r(d-r)(rd-r_0^2)} \mathbf{e}_r, \quad d < r, \quad \varphi = 0. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{6.272.} \quad 1) & \frac{2v_0 r r_0^2 \sin \varphi}{5(12r^2 + 2r_0^2 - 4\sqrt{6} r r_0 \cos \varphi)}; \quad 2) \frac{v_0 r r_0^2 \cos \varphi}{7(8r^2 + r_0^2 + 4\sqrt{2} r r_0 \sin \varphi)}; \\ 3) & \frac{v_0 r r_0^2 \sin \varphi}{3r^2 + 4r_0^2 + 4\sqrt{3} r r_0 \cos \varphi}; \quad 4) \frac{2v_0 r r_0^2 \cos \varphi}{5(11r^2 + r_0^2 - 2\sqrt{11} r r_0 \sin \varphi)}. \end{aligned}$$

$$\mathbf{6.273.} \quad \Delta G = -\delta(M, P), \quad M, P \in \Omega = \{x, y, z : -\infty < x, y < \infty, z > 0\},$$

$$\left. \frac{\partial G}{\partial z} \right|_{z=0} = 0.$$

$$G(M, P) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{MP}} + \frac{1}{r_{MP_1}} \right), \quad M = (x, y, z), \quad P = (\xi, \eta, \zeta), \quad P_1 = (\xi, \eta, -\zeta).$$

$$\mathbf{6.274.} \quad \text{При условии на границе } u_z(x, y, 0) = -f(x, y)$$

$$u(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z^2}}. \quad \text{У к а з а н и е. Если функция}$$

$u(x, y, z)$ получена по формуле (6.25), то в данном случае эту формулу нужно

обосновать. Другой путь: доказать, что найденная таким образом функция $u(x, y, z)$ является решением задачи Неймана (см. задачу 5.209).

6.275. $\Delta G = -\delta(M, P)$, $M, P \in \Omega = \{x, y : -\infty < x < \infty, y > 0\}$,

$$\left. \frac{\partial G}{\partial y} \right|_{y=0} = 0.$$

$$G(M, P) = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{r_{MP}} + \ln \frac{1}{r_{MP_1}} \right), \quad M = (x, y), \quad P = (\xi, \eta), \quad P_1 = (\xi, -\eta).$$

6.276. При условии на границе $u_y(x, 0) = -f(x)$

$$u(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) \ln \frac{1}{\sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta)^2}} d\eta. \quad \text{У к а з а н и е.} \quad \text{Функция } u(x, y)$$

получена по формуле (6.25), справедливость которой в данной ситуации надо установить; либо доказать, что найденная таким образом функция $u(x, y)$ является решением задачи Неймана (см. задачу 5.231).

$$\begin{aligned} \text{6.277. 1)} & \frac{v_0 l^2}{2\pi} \left[\frac{x + |a|}{2a} \ln \frac{x^2 + y^2}{a^2} - \frac{\ln(x^2 + y^2)}{|a|} - \frac{2y}{A} \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{x}{y} \right) \right]; \\ \text{2)} & \frac{v_0 l^2}{\pi A_1} \left[2y(x^2 + y^2 + a^2) \arctg \frac{x}{y} - 2\pi |a| xy - x(x^2 + y^2 - a^2) \ln \frac{x^2 + y^2}{a^2} \right]; \\ \text{3)} & \frac{v_0 l^3}{4\pi A_2} \left[\frac{\pi x(x^2 + y^2 + a^2)}{|a|} - \frac{(x^2 + y^2)^2 + a^2(x^2 - y^2)}{a^2} \ln(x^2 + y^2) - \right. \\ & \quad \left. - (x^2 - y^2 + a^2) \ln a^2 - 4xy \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{x}{y} \right) \right]; \\ \text{4)} & \frac{v_0 l^5 x(x^2 + y^2 + 4|a|y + 3a^2)}{(x^2 + (y + |a|)^2)^2}; \end{aligned}$$

$$A = (x + |a|)^2 + y^2, \quad A_1 = (x^2 + y^2 - a^2)^2 + 4a^2 x^2, \quad A_2 = (x^2 + y^2 + a^2)^2 - 4a^2 x^2.$$

6.278. $G(M, P) = -\frac{i}{4} H_0^{(2)}(kr_{MP})$; $G(M, P) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr_{MP})$; $M = (x, y)$, $P = (\xi, \eta)$.

6.279. $G_1(M, P) = G(M, P) - G(M, P_1)$, $M = (x, y)$, $P = (\xi, \eta)$, $P_1 = (\xi, -\eta)$. Функция $G(M, P)$ приведена в ответе к предыдущей задаче.

6.280. $G_1(M, P) = G(M, P) \mp G(M, P_1)$, $M = (x, y, z)$, $P = (\xi, \eta, \zeta)$, $P_1 = (\xi, \eta, -\zeta)$, где $G(M, P) = \frac{1}{4\pi r_{MP}} e^{-ikr_{MP}}$ или $G(M, P) = \frac{1}{4\pi r_{MP}} e^{ikr_{MP}}$.

$$\text{6.281. } u(r) = \frac{Q}{4\pi D r} e^{-kr}.$$

$$\text{6.282. } u(r) = \frac{q}{2\pi D} K_0(kr).$$

$$\text{6.283. } u(\mathbf{r}) = \frac{Q_0}{4\pi D} \left(\frac{e^{-kr_{MP}}}{r_{MP}} + \frac{e^{-kr_{MP_1}}}{r_{MP_1}} \right), \quad M = (x, y, z), \quad P = (0, 0, d), \quad P_1 = (0, 0, -d).$$

$$\text{6.284. } u(\mathbf{r}) = \frac{q}{2\pi D} [K_0(kr_{MP}) + K_0(kr_{MP_1})], \quad M = (x, y), \quad P = (0, d), \quad P_1 = (0, -d).$$

$$\text{6.285. } \Phi(x) = \frac{Q_0 L}{2D} e^{-\frac{|x|}{L}}.$$

У к а з а н и е. См. задачу 1.243, т. 1. Решение данной задачи при $q_0 = D$ пред-

ставляет собой функцию Грина оператора $\mathcal{L} = -(\frac{d^2}{dx^2} - \frac{1}{L^2})$, определенного на гладких (при $x \neq 0$) ограниченных функциях.

$$\mathbf{6.286.} \quad \Phi(r) = \frac{Q_0}{2\pi D} K_0\left(\frac{r}{L}\right).$$

6.287. $\Phi(r) = \frac{Q_0}{4\pi Dr} e^{-\frac{r}{L}}; \overline{r^2} = 6L^2$, где L — длина диффузии (см. задачу 1.243, т. 1). Диффузионное приближение применимо на больших расстояниях от источника: $r \gg \frac{1}{\Sigma_c}$. У к а з а н и е. Средний квадрат

$$\overline{r^2} = \int_{\mathbb{R}^3} w(r) r^2 dr,$$

где $w(r) dr$ — вероятность того, что нейтрон поглотится в элементе объема dr , равная отношению числа нейтронов, поглощенных в элементе dr за единицу времени к полному числу нейтронов, поглощенных во всем пространстве за единицу времени:

$$w(r) dr = \frac{\Sigma_c \Phi(r) dr}{Q_0}.$$

В диффузионном приближении $\left| \frac{1}{\Sigma_c \Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right| = \frac{1}{L \Sigma_c} + \frac{1}{r \Sigma_c} \ll 1$.

$$\mathbf{6.288.} \quad \Phi(r) = \frac{Q_0 L}{8\pi D r r'} \left(e^{-\frac{|r-r'|}{L}} - e^{-\frac{r+r'}{L}} \right).$$

$$\mathbf{6.289.} \quad \Phi(\mathbf{r}) = \frac{Q_0}{2\pi D} \left(\frac{e^{-\frac{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}{L}}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|} - \frac{e^{-\frac{|\mathbf{r}+\mathbf{r}_0|}{L}}}{|\mathbf{r}+\mathbf{r}_0|} \right).$$

$$\mathbf{6.290.} \quad \Phi(x, y) = \frac{Q_0}{2\pi D} \left[K_0\left(\frac{\sqrt{x^2 + (y-a)^2}}{L}\right) - K_0\left(\frac{\sqrt{x^2 + (y+a)^2}}{L}\right) \right].$$

$$\mathbf{6.291.} \quad G(x, \xi) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{x}\right) \left(\frac{2}{\xi} - 1\right), & 1 \leq x \leq \xi, \\ \left(1 - \frac{1}{\xi}\right) \left(\frac{2}{x} - 1\right), & \xi \leq x \leq 2. \end{cases}$$

$$\mathbf{6.292.} \quad G(x, \xi) = \frac{1}{2} \cdot \begin{cases} \ln \frac{1+x}{1-x}, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \ln \frac{1+\xi}{1-\xi}, & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

$$\mathbf{6.293.} \quad G(x, \xi) = \frac{1}{3} \cdot \begin{cases} \left[1 - \operatorname{tg}\left(\frac{\xi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)\right] \cdot \left[2 + \operatorname{tg}\left(\frac{x}{2} - \frac{\pi}{4}\right)\right], & 0 \leq x \leq \xi, \\ \left[1 - \operatorname{tg}\left(\frac{x}{2} - \frac{\pi}{4}\right)\right] \cdot \left[2 + \operatorname{tg}\left(\frac{\xi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)\right], & \xi \leq x \leq \frac{\pi}{2}. \end{cases}$$

$$\mathbf{6.294.} \quad G(x, \xi) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{cases} 1 - \ln \operatorname{tg}\left(\frac{\xi}{2} + \frac{\pi}{8}\right), & -\frac{\pi}{4} \leq x \leq \xi, \\ 1 - \ln \operatorname{tg}\left(\frac{x}{2} + \frac{\pi}{8}\right), & \xi \leq x \leq \frac{\pi}{4}. \end{cases}$$

$$\mathbf{6.295.} \quad G(x, \xi) = \frac{1}{3} \cdot \begin{cases} 16 - \operatorname{ctg}^3 x - 3 \operatorname{ctg} x, & \frac{\pi}{4} \leq x \leq \xi, \\ 16 - \operatorname{ctg}^3 \xi - 3 \operatorname{ctg} \xi, & \xi \leq x \leq \frac{3\pi}{4}. \end{cases}$$

$$\mathbf{6.296.} \quad G(x, \xi) = \frac{e\sqrt{\pi}}{2(1 + \operatorname{erf} 1)} \cdot \begin{cases} [1 + \operatorname{erf}(x-1)] \cdot [\operatorname{erf}(1) - \operatorname{erf}(\xi-1)], & 1 \leq x \leq \xi, \\ [1 + \operatorname{erf}(\xi-1)] \cdot [\operatorname{erf}(1) - \operatorname{erf}(x-1)], & \xi \leq x \leq 2. \end{cases}$$

$$6.297. \quad G(x, \xi) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1+x}{1+\xi}}, & -1 \leq x \leq \xi, \\ \sqrt{\frac{1+\xi}{1+x}}, & \xi \leq x \leq 0. \end{cases}$$

$$6.298. \quad G(x, \xi) = \frac{1}{2} \cdot \begin{cases} \frac{1-\xi}{1-x}, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \frac{1-x}{1-\xi}, & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

$$6.299. \quad G(x, \xi) = \frac{1}{6} \cdot \begin{cases} \frac{(1+x)^5}{1+\xi}, & -1 \leq x \leq \xi, \\ \frac{(1+\xi)^5}{1+x}, & \xi \leq x \leq 0. \end{cases}$$

$$6.300. \quad G(x, \xi) = \frac{1}{10\xi^2 x^2} \cdot \begin{cases} x^{10} + \frac{7}{3}, & 1 \leq x \leq \xi, \\ \xi^{10} + \frac{7}{3}, & \xi \leq x \leq 2. \end{cases}$$

$$6.301. \quad G(x, \xi) = \frac{1}{3} \cdot \begin{cases} \left(\sqrt{\xi} + \frac{2}{\sqrt{\xi}} \right) \left(\sqrt{x} - \frac{1}{\sqrt{x}} \right), & 1 \leq x \leq \xi, \\ \left(\sqrt{x} + \frac{2}{\sqrt{x}} \right) \left(\sqrt{\xi} - \frac{1}{\sqrt{\xi}} \right), & \xi \leq x \leq 2. \end{cases}$$

$$6.302. \quad G(x, \xi) = \begin{cases} x \left(1 + \xi \operatorname{arctg} \xi - \frac{\pi+3}{4} \xi \right), & 0 \leq x \leq \xi, \\ \xi \left(1 + x \operatorname{arctg} x - \frac{\pi+3}{4} x \right), & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

$$6.303. \quad G(x, \xi) = \begin{cases} x^2 e^{-\xi}, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \xi^2 e^{-x}, & \xi \leq x \leq 2. \end{cases}$$

$$6.304. \quad G(x, \xi) = \begin{cases} x + \xi - \ln \xi - \frac{3}{2}, & 0 \leq x \leq \xi, \\ x - \ln x + \xi - \frac{3}{2}, & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

$$6.305. \quad G(x, \xi) = -\frac{1}{2} \cdot \begin{cases} \ln(1-x)(1+\xi) + 2 \ln 2 - 1, & -1 \leq x \leq \xi, \\ \ln(1+x)(1-\xi) + 2 \ln 2 - 1, & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

$$6.306. \quad G(x, \xi) = \frac{1}{\pi} \cdot \begin{cases} \left[\frac{1}{2} \sin \xi + (\pi - \xi) \cos \xi \right] \sin x - x \cos x \sin \xi, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \left[\frac{1}{2} \sin x + (\pi - x) \cos x \right] \sin \xi - \xi \cos \xi \sin x, & \xi \leq x \leq \pi. \end{cases}$$

$$6.307. \quad G(x, \xi) = \frac{2}{\pi} \cdot \begin{cases} \left[\frac{1}{2} \sin \xi + \left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \cos \xi \right] \sin x - x \cos x \sin \xi, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \left[\frac{1}{2} \sin x + \left(\frac{\pi}{2} - x \right) \cos x \right] \sin \xi - \xi \cos \xi \sin x, & \xi \leq x \leq \frac{\pi}{2}. \end{cases}$$

$$6.308. \quad G(x, \xi) = \frac{1}{\pi} \cdot \begin{cases} \left[\frac{1}{2} \cos \xi + (\pi - \xi) \sin \xi \right] \cos x + x \sin x \cos \xi, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \left[\frac{1}{2} \cos x + (\pi - x) \sin x \right] \cos \xi - \xi \sin \xi \cos x, & \xi \leq x \leq \pi. \end{cases}$$

$$6.309. \quad u(x) = \frac{1}{3} \sqrt{x-1} \left(\ln(x-1) - \frac{2}{3} \right).$$

$$6.310. \quad u(x) = \frac{1}{10}x^2(x^2 - 1).$$

$$6.311. \quad u(x) = \frac{1}{2}x^2(x - x^{\frac{2}{3}}).$$

$$6.312. \quad u(x) = \frac{1}{2}(\cos x - \sin x)(1 + \cos x - \sin x).$$

$$6.313. \quad u(x) = x \ln x.$$

$$6.314. \quad u(x) = -\frac{1}{4}\sin 2x.$$

$$6.315. \quad u(x) = x + \frac{\pi}{4} \operatorname{ctg} x - \frac{\pi}{2}.$$

$$6.316. \quad u(x) = 2 \operatorname{arctg} e^x - e(x - \ln \operatorname{ch} x) - \frac{\pi}{2}.$$

$$6.317. \quad u(x) = \frac{1}{2x}(e^{-x^2} - 1) + \frac{\sqrt{\pi}}{2}(\operatorname{erf} x - \operatorname{erf} 1).$$

$$6.318. \quad u(x) = \frac{\ln(2-x)}{2-x} + \frac{x+1}{2}.$$

$$6.319. \quad u(x) = \frac{\pi}{4}(\operatorname{erf} x + \operatorname{erf} 1 - e^3 \operatorname{erf}(x+1)).$$

$$6.320. \quad u(x) = \cos x - \frac{2}{\pi}(x - \sin x).$$

$$6.321. \quad u(x) = \frac{1-x}{2} + \frac{\sqrt{\pi}}{4}e^{x^2}(\operatorname{erf} x - \operatorname{erf} 1).$$

$$6.322. \quad u(x) = \lambda \int_1^4 G(x, \xi) \xi^2 u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = \frac{1}{5} \cdot \begin{cases} \frac{x}{\xi^4}, & 1 \leq x \leq \xi, \\ \frac{\xi}{x^4}, & \xi \leq x \leq 4. \end{cases}$$

$$6.323. \quad u(x) = \lambda \int_0^1 G(x, \xi) \xi^2 u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = \begin{cases} e^{-\xi}(1 - e^{-x}), & 0 \leq x \leq \xi, \\ e^{-x}(1 - e^{-\xi}), & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

$$6.324. \quad u(x) = \lambda \int_0^1 G(x, \xi) \xi u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{x}{\sqrt{2}}, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \operatorname{arctg} \frac{\xi}{\sqrt{2}}, & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

$$6.325. \quad u(x) = \lambda \int_0^{\pi} G(x, \xi) \xi u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = e^{-(x+y)} \cdot \begin{cases} \sin x (\sin \xi + \cos \xi), & 0 \leq x \leq \xi, \\ \sin \xi (\sin x + \cos x), & \xi \leq x \leq \pi. \end{cases}$$

$$6.326. \quad u(x) = \lambda \int_0^{\frac{\pi}{2}} G(x, \xi) \xi^3 u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{cases} -\sin \xi (\sin x + \cos x), & 0 \leq x \leq \xi, \\ -\sin x (\sin \xi + \cos \xi), & \xi \leq x \leq \frac{\pi}{2}. \end{cases}$$

$$6.327. \quad u(x) = \lambda \int_0^1 G(x, \xi) \xi e^{4\xi} u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = \frac{1}{7} \cdot \begin{cases} e^{-6\xi}(e^x - e^{-6x}), & 0 \leq x \leq \xi, \\ e^{-6x}(e^\xi - e^{-6\xi}), & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

$$6.328. \quad u(x) = \lambda \int_0^1 G(x, \xi) e^{-\xi} u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = \frac{1}{6} \cdot \begin{cases} e^{-2\xi}(e^{4x} - e^{-2x}), & 0 \leq x \leq \xi, \\ e^{-2x}(e^{4\xi} - e^{-2\xi}), & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

$$6.329. \quad u(x) = \lambda \int_0^1 G(x, \xi) \xi u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = -\frac{1}{7} \cdot \begin{cases} x^3 \left(\xi^3 - \frac{1}{\xi^4} \right), & 0 \leq x \leq \xi, \\ \xi^3 \left(x^3 - \frac{1}{x^4} \right), & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

$$6.330. \quad u(x) = \lambda \int_0^1 G(x, \xi) \sqrt{\xi} e^\xi u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = \begin{cases} e^{-\xi} \operatorname{sh} x, & 0 \leq x \leq \xi, \\ e^{-x} \operatorname{sh} \xi, & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

$$6.331. \quad u(x) = \lambda \int_0^{\frac{\pi}{2}} G(x, \xi) \xi^3 \sin^4 \xi u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = \begin{cases} \operatorname{ctg} \xi + \frac{1}{3} \operatorname{ctg}^3 \xi, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \operatorname{ctg} x + \frac{1}{3} \operatorname{ctg}^3 x, & \xi \leq x \leq \frac{\pi}{2}. \end{cases}$$

$$6.332. \quad u(x) = \lambda \int_0^1 G(x, \xi) e^{-\xi^2} u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = -\frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{\xi^2 + x^2} \begin{cases} \operatorname{erf} \xi - \operatorname{erf}(1), & 0 \leq x \leq \xi, \\ \operatorname{erf} x - \operatorname{erf}(1), & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

$$6.333. \quad u(x) = \lambda \int_{-1}^1 G(x, \xi) e^{\xi^2} u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = \frac{\sqrt{\pi}}{4 \operatorname{erf} 1} \begin{cases} (\operatorname{erf} x + \operatorname{erf}(1)) (\operatorname{erf}(1) - \operatorname{erf} \xi), & -1 \leq x \leq \xi, \\ (\operatorname{erf} \xi + \operatorname{erf}(1)) (\operatorname{erf}(1) - \operatorname{erf} x), & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

$$6.334. \quad u(x) = \lambda \int_1^e G(x, \xi) \xi u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = -\frac{1}{e} \begin{cases} x(e \ln \xi - \xi), & 1 \leq x \leq \xi, \\ \xi(e \ln x - x), & \xi \leq x \leq e. \end{cases}$$

$$6.335. \quad u(x) = \lambda \int_0^4 G(x, \xi) e^\xi u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = \begin{cases} x e^{-\xi}, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \xi e^{-x}, & \xi \leq x \leq 4. \end{cases}$$

$$6.336. \quad u(x) = \lambda \int_0^l G(x, \xi) u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = \frac{1}{6} \cdot \begin{cases} 3\xi x^2 - x^3, & 0 \leq x \leq \xi, \\ 3\xi^2 x - \xi^3, & \xi \leq x \leq l. \end{cases}$$

$$6.337. \quad u(x) = \lambda \int_0^l G(x, \xi) u(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = \frac{1}{6l^3} \cdot \begin{cases} (l - \xi)^2 x^2 (3l\xi - 2\xi x - lx), & 0 \leq x \leq \xi, \\ (l - x)^2 \xi^2 (3lx - 2\xi x - l\xi), & \xi \leq x \leq l. \end{cases}$$

$$6.339. \quad u(x) = (\lambda + \alpha(1 - \alpha)) \int_{-1}^1 G(x, \xi) u(\xi) d\xi, \quad 0 < \alpha < 1,$$

$$G(x, \xi) = -\frac{\pi}{2 \sin \pi \alpha} \cdot \begin{cases} F\left(\alpha, 1 - \alpha, 1, \frac{1+x}{2}\right) F\left(\alpha, 1 - \alpha, 1, \frac{1-\xi}{2}\right), & -1 \leq x \leq \xi, \\ F\left(\alpha, 1 - \alpha, 1, \frac{1-x}{2}\right) F\left(\alpha, 1 - \alpha, 1, \frac{1+\xi}{2}\right), & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

У к а з а н и е. Замена $x = 2y - 1$ преобразует уравнение

$$(1 - x^2)u'' - 2xu' - \alpha(1 - \alpha)u = 0$$

в гипергеометрическое

$$y(1 - y)u'' + (1 - 2y)u' - \alpha(1 - \alpha)u = 0.$$

Ограниченными решениями в точках $x = -1$ и $x = 1$ соответственно будут $u_1(x) = F\left(\alpha, 1 - \alpha, 1, \frac{1+x}{2}\right)$ и $u_2(x) = F\left(\alpha, 1 - \alpha, 1, \frac{1-x}{2}\right)$. Для вычисления произведения $(1 - \xi^2)W[u_1, u_2]$ воспользоваться разложением

$$F(\alpha, 1 - \alpha, 1, x) = -\frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(1 - \alpha)} \ln(1 - x) + O(1), \quad x \rightarrow 1 - 0.$$

$$6.340. \quad u(x) = (\lambda + \alpha + 1) \int_0^\infty G(x, \xi) \xi^\alpha e^{-\xi} u^2(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = e^{x+\xi} \cdot \begin{cases} \int_\xi^\infty \eta^{-\alpha-1} e^{-\eta} d\eta, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \int_x^\infty \eta^{-\alpha-1} e^{-\eta} d\eta, & \xi \leq x < \infty. \end{cases}$$

У к а з а н и е. Для решения уравнения

$$xu'' + (\alpha + 1 - x)u' - \mu u = 0$$

сделать замену $u(x) = e^{kx} v(x)$ и выбрать k и μ так, чтобы коэффициент при v обратился в нуль.

$$6.341. \quad u(x) = (\lambda + 2) \int_{-\infty}^\infty G(x, \xi) e^{-\xi^2} u^2(\xi) d\xi,$$

$$G(x, \xi) = \frac{\sqrt{\pi}}{4} e^{x^2 + \xi^2} \cdot \begin{cases} \operatorname{Erf} \xi (1 + \operatorname{erf} x), & -\infty \leq x \leq \xi, \\ (1 + \operatorname{erf} \xi) \operatorname{Erf} x, & \xi \leq x < \infty. \end{cases}$$

У к а з а н и е. Преобразовать уравнение $u'' - 2xu' - \mu u = 0$ посредством замены $u(x) = e^{kx^2} v(x)$ и выбрать k и μ так, чтобы коэффициент при v обратился в нуль.

6.342. Решение. Пусть $f^- = e^{-ikx} + \varphi$; тогда φ — решение задачи

$$\varphi'' + k^2 \varphi = (e^{-ikx} + \varphi)u, \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} \varphi = 0.$$

Функция Грина удовлетворяет условиям

$$G'' + k^2 G = -\delta(x - \xi), \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} G = 0.$$

Отсюда

$$G(x, \xi) = \begin{cases} 0, & x \leq \xi, \\ \frac{1}{k} \sin k(\xi - x), & \xi \leq x, \end{cases}$$

$$\varphi(x, k) = -\frac{1}{k} \int_{-\infty}^x \sin k(\xi - x) u(\xi) (e^{-ik\xi} + \varphi(\xi, k)) d\xi,$$

что равносильно интегральному уравнению для $f^-(x, k)$.

6.346. Частота собственных колебаний $\omega_n = \sqrt{\frac{g}{l} \mu_n}$, амплитуда колебаний $u_n(x) = u_n(\xi l) = X_n(\xi)$, где μ_n — характеристическое число, $X_n(\xi)$ — собственная функция уравнения

$$X(x) = \mu \int_0^1 K(x, \xi) X(\xi) d\xi, \quad K(x, \xi) = - \begin{cases} \ln \xi, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \ln x, & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

6.347. Частота собственных колебаний $\omega_n = \sqrt{\mu_n}$, амплитуда колебаний $u_n(x) = \sqrt{K(x)} X_n(x)$, где μ_n — характеристическое число, $X_n(x)$ — собственная функция уравнения с симметричным ядром

$$X_n(x) = \mu \int_0^l K(x, \xi) X_n(\xi) d\xi, \quad K(x, \xi) = \sqrt{K(\xi)K(x)} \cdot \begin{cases} \int_0^x \frac{d\eta}{GI}, & 0 \leq x \leq \xi, \\ \int_0^\xi \frac{d\eta}{GI}, & \xi \leq x \leq l. \end{cases}$$

6.348. $\omega_n = \frac{a}{l^2} \sqrt{\mu_n}$, μ_n — характеристическое число уравнения

$$u(x) = \mu \int_0^1 K(x, \xi) u(\xi) d\xi$$

с ядром

$$1) K(x, \xi) = \frac{1}{6} \cdot \begin{cases} x^2(1 - \xi)^2[3\xi - x(1 + 2\xi)], & 0 \leq x \leq \xi, \\ \xi^2(1 - x)^2[3x - \xi(1 + 2x)], & \xi \leq x \leq 1; \end{cases}$$

$$2) K(x, \xi) = \frac{1}{6} \cdot \begin{cases} x^2(3\xi - x), & 0 \leq x \leq \xi, \\ \xi^2(3x - \xi), & \xi \leq x \leq 1. \end{cases}$$

6.349. 1) $1,57076 \leq \frac{l}{a} \omega_1 \leq 1,57647$, $\frac{l}{a} \omega_1 = \frac{\pi}{2} \approx 1,57080$;

$$2) 1,2022 \sqrt{\frac{g}{l}} \leq \omega_1 \leq 1,2154 \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{g}{l}} \frac{\mu_{01}}{2} \approx 1,2024 \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Решение п. 1. Ввиду симметричности ядра (6.55)

$$A_{2m} = \int_0^1 K_{2m}^2(x, x) dx = \int_0^1 dx \int_0^1 K_m(x, \xi) K_m(\xi, x) d\xi = 2 \int_0^1 dx \int_0^x K_m^2(x, \xi) d\xi.$$

Если $\xi \leq x$, то $K(x, \xi) = \xi$,

$$K_2(x, \xi) = \int_0^1 K(x, t) K(t, x) dt \int_0^\xi t^2 dt + \int_\xi^x t \xi dt + \int_x^1 x \xi dt - \frac{\xi^3}{6} - \frac{\xi x^2}{2} + \xi x,$$

следовательно,

$$A_2 = 2 \int_0^1 dx \int_0^x \xi^2 d\xi = \frac{1}{6}, \quad A_4 = 2 \int_0^1 dx \int_0^x \left(\frac{\xi^3}{6} + \frac{\xi x^2}{2} - \xi x \right)^2 d\xi = \frac{17}{630}.$$

Остается применить неравенство (6.56) и соотношение $\omega_1 = \frac{a}{l} \sqrt{\mu_1}$.

6.350. $1,2027 \frac{a}{l} \leq \omega_1 \leq 1,2062 \frac{a}{l}.$

Глава 7

МЕТОД КОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

Одним из объектов приложения метода конформных отображений является плоское стационарное векторное поле с компонентами $A_x(x, y)$, $A_y(x, y)$, которое трактуется как поле векторов $A = A_x + i A_y$ на комплексной плоскости (z). Этот метод применим для изучения электростатического и магнитостатического полей, магнитного поля постоянных токов, поля скоростей потенциального течения идеальной несжимаемой жидкости, поля скоростей идеального газа и жидкости в процессе фильтрации, поля стационарных тепловых потоков и других (двумерных) потенциальных векторных полей. Математической моделью таких полей является краевая задача для уравнения Пуассона в области Ω , на границе которой заданы условия первого, второго и третьего типов. Применение конформных отображений для решения подобных задач основано на следующем свойстве: тип уравнения и тип граничного условия не меняются при замене переменных, которая определяется аналитической функцией $w(z)$, реализующей конформное отображение области Ω (переход от переменных x, y к переменным ξ, η осуществляется по формулам, которые содержатся в соотношении $\xi + i\eta = w(x + iy)$, т. е. $\xi = \operatorname{Re} w$, $\eta = \operatorname{Im} w$). Благодаря этому свойству краевая задача в данной области преобразуется соответствующим конформным отображением в аналогичную задачу в специальной области, для которой решение уже известно или известен метод построения решения.

Следует выделить физические задачи, в которых рассматриваются плоские поля, обусловленные сосредоточенными (двумерными) источниками — зарядами, вихрями, диполями и т. п. Соответствующее уравнение Пуассона содержит в правой части δ -функцию и ее производную. Такое уравнение остается инвариантным относительно указанной замены переменных. На этом факте, в частности, основано применение конформных отображений для построения функции Грина задачи Дирихле в ряде

плоских областей. Преимущество данного метода по сравнению с методом изображений или методом Фурье состоит в том, что техника построения функции Грина является более простой, а для некоторых областей, таких как угол, полоса и др., функция Грина получается в замкнутом виде, а не в форме ряда.

Для описания потенциального поля $A(z)$ в области Ω , при условии $A(z) \in C^1(\Omega)$, употребляется комплексный потенциал $w(z)$. Это аналитическая функция, вещественная (или мнимая) часть которой представляет собой обычный скалярный потенциал поля $A(z)$. При решении краевых задач с помощью конформного отображения в ряде случаев можно избежать фактической замены переменных, обусловленной этим отображением (соответствующая процедура осуществляется неявным образом), если привлечь к решению комплексный потенциал. Более того, применение функции $w(z)$ сводит решение многих краевых задач (например, задачу Дирихле с кусочно-постоянными граничными условиями, задачу Дирихле в эксцентрическом кольце и др.) к построению некоторого конформного отображения. Для определения скалярного потенциала поля A также целесообразно использовать комплексный потенциал, построение которого является более простой задачей, чем решение задачи Дирихле. Кроме того, ряд физических величин — поле A , плотность заряда на проводнике, сила, действующая на заряд, давление в жидкости и др. — непосредственно выражаются через функцию $w(z)$; (точнее, через $w'(z)$) при этом соответствующие вычисления оказываются значительно проще тех, в которых применяется скалярный потенциал.

В задачах этой главы изучаются различные стационарные двумерные поля. Для решения большинства задач достаточно владеть техникой построения конформных отображений, осуществляемых элементарными функциями; в некоторых случаях следует прибегнуть к интегралу Кристоффеля–Шварца и к другим средствам. В конце данного сборника задач имеется справочный материал по этой теме.

Литература к главе 7

1. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. — Спб.: Лань, 2002.
2. Сидоров Ю.В., Федорюк М.В., Шабунин М.В. Теория функций комплексного переменного. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2002.

3. Волковський Л.И., Луць Г.Л., Араманович И.Г. Сборник задач по теории функций комплексного переменного — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
4. Евграфов М.А. Сборник задач по теории аналитических функций. — М.: Наука, 1972.

7.1. Комплексный потенциал; решение задачи Дирихле с кусочно-постоянными граничными условиями

Пример 7.1. 1. Определить и построить комплексный потенциал $w(z) = u(x, y) + i v(x, y)$ плоского векторного потенциального поля $A(x, y) = A_x(x, y) + i A_y(x, y)$ без источников в односвязной области $\Omega_z \in R^2$ с границей $\partial\Omega_z = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ (рис.7.1), если $A \in C^1(\Omega_z)$, $v|_{\Gamma_1} = v_1$, $v|_{\Gamma_2} = v_2$, где v_1 и v_2 — вещественные константы. 2. Применить комплексный потенциал для определения поля $E = E_x + i E_y$ в пространстве между параллельными плоскостями $y = 0$, $y = H$, потенциалы которых 0 и $v_0 \eta(x)$ соответственно.

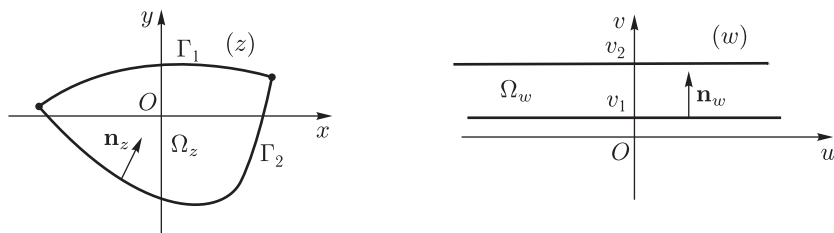


Рис. 7.1

1. Из условий отсутствия источников и потенциальности поля

$$\begin{aligned} \operatorname{div} A = 0 &\implies \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} = 0, \\ \operatorname{rot} A = 0 &\implies \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (7.1)$$

вытекает существование однозначных функций $u(x, y)$ и $v(x, y)$, таких, что ¹⁾

$$du = -A_y dx + A_x dy, \quad (7.2)$$

$$dv = -A_x dx - A_y dy. \quad (7.3)$$

¹⁾ Выражение $P(x, y) dx + Q(x, y) dy$, где $P \in C^1$, $Q \in C^1$, является полным дифференциалом тогда и только тогда, когда $\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial Q}{\partial x}$.

Проверка показывает, что u и v — гармонические функции в Ω_z , удовлетворяющие условиям Коши–Римана. Отсюда следует существование однозначной аналитической в области Ω_z функции $w(z) = u + i v$, называемой комплексным потенциалом поля A . Так как

$$w'(z) = \frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} = -A_y - i A_x = -i \bar{A},$$

где черта над A означает операцию комплексного сопряжения, то

$$A = -i \bar{w}'. \quad (7.4)$$

Согласно соотношению (7.3) вектор $A = -\nabla v$, следовательно, уравнения $v(x, y) = C_1$ описывают семейство эквипотенциальных линий поля A . Поскольку $(\nabla u, \nabla v) = u_x v_x + u_y v_y = A_y A_x - A_x A_y = 0$ (применены соотношения (7.2) и (7.3)), то вектор A направлен по касательной к линии $u(x, y) = C_2$; таким образом, $u(x, y) = C_2$ — семейство силовых линий (линий тока) поля A .

Один из способов построения комплексного потенциала состоит в восстановлении аналитической функции $w(z)$ по ее мнимой части $v(x, y)$, которая является решением задачи Дирихле

$$\begin{aligned} \Delta v(x, y) &= 0, & (x, y) \in \Omega_z, \\ v|_{\Gamma_1} &= v_1, & v|_{\Gamma_2} = v_2. \end{aligned} \quad (7.5)$$

Другой способ, не связанный с непосредственным решением задачи (7.5), основан на применении конформных отображений. Пусть $w = u + i v$ — комплексный потенциал. Если точка z принадлежит Γ_1 , то $v = \text{const}$, т. е. однозначная аналитическая в Ω_z функция $w = u + i v$ отображает семейство линий $v(x, y) = C$ плоскости (z) в семейство параллельных прямых $\text{Im } w = C$ на плоскости (w) . Следовательно, для построения комплексного потенциала нужно конформно отобразить (см. задачу 7.1) область Ω_z на полосу Ω_w , ограниченную прямыми $\text{Im } w = v_1$ и $\text{Im } w = v_2$, которые являются образами дуг Γ_1 и Γ_2 (рис. 7.1). Если комплексный потенциал известен, то его мнимая часть $v = \text{Im } w$ — решение задачи Дирихле (7.5).

При конформном отображении тип граничного условия не изменяется (задача 7.2). Решение краевой задачи со смешанными граничными условиями единственно (задача 7.3).

2. Потенциал электростатического поля является решением задачи Дирихле

$$\begin{aligned} \Delta v(x, y) &= 0 & -\infty < x < \infty, \quad 0 < y < H, \\ v(x, 0) &= 0, & v(x, H) = v_0 \eta(x). \end{aligned}$$

Для построения комплексного потенциала нужно конформно отобразить полосу ($0 < y < H$) на полосу ($0 < \operatorname{Im} w < v_0$) так, чтобы часть границы ($0 < x < \infty, y = H$) перешла в прямую $\operatorname{Im} w = v_0$, а остальная часть — в прямую $\operatorname{Im} w = 0$. Это достигается композицией следующих отображений. Функция $z_1 = \exp\left(\frac{\pi z}{H}\right)$ трансформирует полосу в полуплоскость $\operatorname{Re} z_1 > 0$, а Γ_2 — в часть $\operatorname{Re} z_1 < -1$ действительной оси. Линейное отображение $z_2 = z_1 + 1$ переводит полуплоскость $\operatorname{Re} z_1 < -1$ в себя, при этом граничные значения 0 и v_0 располагаются, соответственно, на положительной и отрицательной частях действительной оси комплексной плоскости (z_2). Логарифмическая функция

$$w(z) = \frac{v_0}{\pi} \ln z_2 + C = \frac{v_0}{\pi} \ln \left(1 + e^{\frac{\pi z}{H}}\right) + C, \quad (7.6)$$

где C — вещественная постоянная, завершает построение комплексного потенциала. Отсюда

$$\begin{aligned} v(x, y) = \operatorname{Im} w &= \frac{v_0}{\pi} \arg \left(1 + e^{\frac{\pi x}{H}} \cos \frac{\pi y}{H} + i e^{\frac{\pi x}{H}} \sin \frac{\pi y}{H}\right) = \\ &= \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arccctg} \frac{e^{-\frac{\pi x}{H}} + \cos \frac{\pi y}{H}}{\sin \frac{\pi y}{H}}. \end{aligned}$$

Поле определяется формулой (7.4), в которой $A = E$:

$$E = -i \overline{w'}. \quad (7.7)$$

Следовательно,

$$E = -i \frac{v_0}{H} \cdot \frac{e^{\frac{\pi \bar{z}}{H}}}{1 + e^{\frac{\pi \bar{z}}{H}}} = -\frac{v_0}{2H} \cdot \frac{\sin \frac{\pi y}{H} + i \left(e^{\frac{\pi x}{H}} + \cos \frac{\pi y}{H}\right)}{\cos \frac{\pi x}{H} + \cos \frac{\pi y}{H}}.$$

7.1. Доказать, что существует конформное отображение $w = w(z)$ односвязной области Ω_z (см. пример 7.1) на полосу $v_1 < \operatorname{Im} w < v_2$ (пусть $v_1 < v_2$) и это отображение единственно с точностью до аддитивной вещественной постоянной.

7.2. Показать что при конформном отображении двумерная задача для уравнения Пуассона с граничными условиями первого, второго или третьего типа преобразуется в задачу для уравнения Пуассона с граничными условиями того же типа.

7.3. Доказать единственность решения следующей двумерной краевой задачи:

$$\Delta v = F$$

в области Ω с кусочно гладкой границей $\partial\Omega = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3$,

$$v|_{\Gamma_1} = f_1, \quad v|_{\Gamma_2} = f_2, \quad \left. \frac{\partial v}{\partial n} \right|_{\Gamma_3} = f_3,$$

где v — непрерывна в $C^1(\overline{\Omega})$, кроме конечного числа угловых точек и точек разрыва первого рода граничных функций.

Решить стационарные задачи 7.4–7.28.

7.4. Найти температуру клина $0 < \varphi < \alpha$, грань $\varphi = 0$ которого поддерживается при температуре v_1 , а грань $\varphi = \alpha$ — при температуре v_2 .

7.5. Поперечное сечение длинного цилиндра — область, ограниченная двумя окружностями: $S_1 = \{x, y: (x - r_1)^2 + y^2 = r_1^2\}$ — внутренняя граница и $S_2 = \{x, y: (x - r_2)^2 + y^2 = r_2^2\}$ — внешняя граница (рис. 7.2). Внутренняя поверхность поддерживается при температуре v_1 , внешняя — при v_2 . Какова форма изотермической поверхности $v = \frac{v_1 + v_2}{2}$?

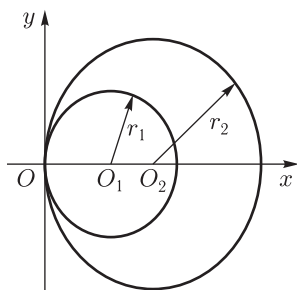


Рис. 7.2

7.6. Определить электростатический потенциал внутри полого цилиндра, радиус которого r_0 , если потенциал поверхности

$$v(r_0, \varphi) = \begin{cases} v_1, & 0 < \varphi < \pi, \\ v_2, & \pi < \varphi < 2\pi. \end{cases}$$

7.7. Найти температуру вне бесконечного цилиндра, радиус которого r_0 , если температура поверхности

$$v(r_0, \varphi) = \begin{cases} v_1, & 0 < \varphi < \pi, \\ v_2, & \pi < \varphi < 2\pi. \end{cases}$$

7.8. Определить электростатический потенциал $u(r, \varphi)$ внутри полого цилиндрического проводника, поперечным сечением которого является полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), если диаметрально-плоскость заряжена до потенциала v_1 , а остальная поверхность — до потенциала v_2 .

7.9. Определить потенциал $u(r, \varphi)$ электростатического поля внутри полого цилиндрического проводника, поперечное сечение которого изображено на рис. 7.3, если плоская часть поверхности имеет потенциал v_1 , а остальная часть — потенциал v_2 .

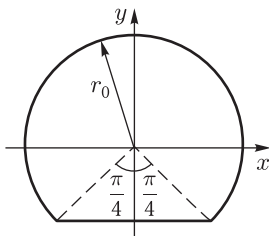


Рис. 7.3

7.10. Определить температуру цилиндра, поперечным сечением которого является полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), если диаметрально-плоскость поддерживается при нулевой температуре, а поверхность $r = r_0$ — при температуре $v_0 \eta \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right)$.

7.11. Определить температуру цилиндра, поперечным сечением которого является полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), если диаметрально-плоскость поддерживается при нулевой температуре, а остальная поверхность — при температуре

$$v(r_0, \varphi) = \begin{cases} v_0, & 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}, \\ -v_0, & \frac{\pi}{2} < \varphi < \pi. \end{cases}$$

7.12. Поперечное сечение полого цилиндра — пересечение двух кругов с центрами в т. $O_1(0, -h_1)$ и в т. $O_2(0, h_2)$, где $h_1 = 3a/4$, $h_2 = 15a/8$; общая хорда кругов, длина которой $2a$, лежит на оси Ox . Найти потенциал электростатического поля внутри цилиндра, если потенциал поверхности равен: v_1 при $y > 0$, v_2 — при $y < 0$.

7.13. Поперечное сечение однородного цилиндра — пересечение двух кругов с центрами в т. $O_1(0, -h_1)$ и в т. $O_2(0, -h_2)$, где

$h_1 = 4a/3$, $h_2 = 35a/12$; общая хорда кругов, длина которой $2a$, лежит на оси Ox . Решить стационарную задачу теплопроводности, если температура части поверхности, радиус которой r_1 , равна v_1 , а остальной части — v_2 .

7.14. Поперечное сечение цилиндра — полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$); часть поверхности ($r = r_0$, $0 < \varphi < \alpha < \pi$) имеет температуру v_0 , а остальная часть — нулевую температуру. Найти плотность теплового потока через поверхность $r = r_0$.

7.15. Определить температуру цилиндра, поперечным сечением которого является полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), если диаметральной плоскостью теплоизолирована, а остальная поверхность имеет температуру

$$v(r_0, \varphi) = \begin{cases} v_1, & 0 < \varphi < \frac{\pi}{4}, \\ v_2, & \frac{\pi}{4} < \varphi < \pi. \end{cases}$$

7.16. Полупространство $y > 0$ ограничено плоскостью $y = 0$ и цилиндрической поверхностью $\{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2, y > 0\}$. Определить температуру полупространства, если температура плоскости v_2 , а цилиндрической поверхности v_1 .

7.17. Границей однородной среды является плоскость с цилиндрическим выступом, поперечное сечение которого — часть круга ($r < r_0$, $-(\frac{\pi}{2} - \alpha) < \varphi < \frac{3\pi}{2} - \alpha$), где $0 < \alpha < \pi$ (рис. 7.4, а). Определить температуру в точке M среды, если температура плоскости v_1 , выступа — v_2 .

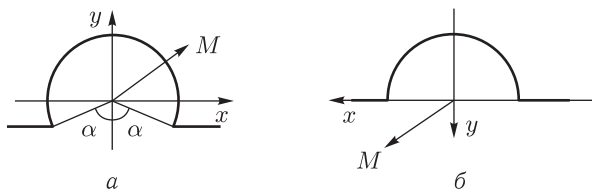


Рис. 7.4

7.18. На поверхности грунта имеется цилиндрический вал, радиус которого r_0 (рис. 7.4, б) Определить температуру грунта в точке M , если температура поверхности вала v_1 , а остальной поверхности — v_2 .

7.19. Поперечным сечением полого цилиндрического проводника является сектор ($r < r_0$, $\varphi < \alpha < 2\pi$). Найти потенциал внутри

проводника и вектор напряженности электростатического поля на грани $\varphi = \alpha$, если поверхность $r = r_0$ имеет потенциал v_1 , а остальная поверхность — потенциал v_2 .

7.20. В области ($r_0 < r$, $0 < \varphi < \alpha < 2\pi$) определена ограниченная гармоническая функция $v(x, y)$, принимающая на границе значения

$$v(r, 0) = v(r, \alpha) = v_1, \quad v(r_0, \varphi) = v_2.$$

Какова эта функция?

7.21. Решить задачу Дирихле вне полукруга, радиус которого r_0 , если на полуокружности решение принимает постоянное значение v_1 , а на диаметре — постоянное значение v_2 .

7.22. Границей однородной среды ($y > 0$) является плоскость $y = 0$ с цилиндрическим выступом ($\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, $y > 0$; $a > b$). Определить плотность теплового потока через эллиптическую поверхность, если ее температура v_1 , а температура плоской части границы v_2 .

7.23. Решить предыдущую задачу, если поперечное сечение выступа имеет форму полуэллипса ($\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1$, $y > 0$; $a > b$).

7.24. Стенки канала, поперечным сечением которого является полуполоса ($-a < x < a$, $0 < y$), поддерживаются при температуре v_0 , а дно — при нулевой температуре. Определить температуру в канале.

7.25. Торце $x = 0$ полуслоя ($0 < x$, $0 < y < H$) поддерживается при нулевой температуре, а грани $y = 0$ и $y = H$ — при температурах v_0 и $-v_0$ соответственно. Найти температуру полуслоя.

7.26. Найти потенциал внутри полого цилиндрического проводника с поперечным сечением ($0 < x$, $0 < y < H$), если стенки $x = 0$ и $y = 0$ имеют нулевой потенциал, а стенка $y = H$ — потенциал v_0 .

7.27. Определить температуру вне эллиптического цилиндра $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$, где $a > b$, если: 1) часть поверхности, соответствующая $y > 0$, имеет температуру v_1 , а остальная часть — температуру v_2 ; 2) часть поверхности, соответствующая $x > 0$, имеет температуру v_1 , а остальная часть — температуру v_2 . Ответ записать в эллиптических координатах (см. пример 5.2).

7.28. Найти потенциал электростатического поля внутри полого эллиптического цилиндра $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$, где $a > b$, если: 1) часть поверхности, соответствующая $y > 0$, имеет потенциал v_1 , а остальная часть — потенциал v_2 ; 2) часть поверхности, соответствующая $x > 0$, имеет потенциал v_1 , а остальная часть — потенциал v_2 . Ответ записать в эллиптических координатах (см. пример 5.2).

Пример 7.2. Определить стационарную температуру двугранного угла ($0 < x, 0 < y$), грань $y = 0$ которого имеет температуру $v_0 \eta(a - x)$, а грань $x = 0$ — нулевую температуру.

В данном случае $A = q$, где q — вектор плотности теплового потока, температура $v = \text{Im } w$. Так как $\mathbf{q} = -k \nabla v$, то (см. (7.4))

$$q = -ik\overline{w'}. \quad (7.8)$$

Как показано в примере 7.1, определение комплексного потенциала поля сводится к построению конформного отображения $w = w(z)$ области $\Omega_z = \{x, y: 0 < x, 0 < y\}$ комплексной плоскости (z) на полосу $\Omega_w = \{u, v: -\infty < u < \infty, 0 < v < v_0\}$ комплексной плоскости (w), при котором отрезок $(0, a)$ оси Ox отображается на прямую $\text{Im } w = v_0$, а остальная часть границы — на прямую $\text{Im } w = 0$. Такое отображение конструируется следующим образом. Функция $z_1 = z^2$ отображает Ω_z на полуплоскость $\text{Im } z_1 > 0$, отрезок $(0, a)$ с граничным значением v_0 — на отрезок $(0, a^2)$ действительной оси плоскости (z_1). Дробно-линейное отображение

$$z_2 = \lambda^2 \frac{z_1 - a^2}{z_1}, \quad \text{Im } \lambda = 0,$$

переводит полуплоскость $\text{Im } z_1 > 0$ в полуплоскость $\text{Im } z_2 > 0$; при этом отрезок $(0, a^2)$ с граничным значением v_0 трансформируется в отрицательную часть действительной оси, а ее положительная часть — носитель нулевого граничного значения. Построение конформного отображения завершается применением логарифмической функции

$$w = \frac{v_0}{\pi} \ln z_2 + \lambda_0 = \frac{v_0}{\pi} \ln \lambda^2 \frac{z^2 - a^2}{z^2} + \lambda_0, \quad \text{Im } \lambda_0 = 0.$$

Температура

$$v = \text{Im } w = \frac{v_0}{\pi} \arg \frac{r^2 e^{2i\varphi} - a^2}{r^2 e^{2i\varphi}} = \frac{v_0}{\pi} \text{arctg} \frac{r^2 - a^2 \cos 2\varphi}{a^2 \sin 2\varphi}.$$

Решить стационарные задачи 7.29–7.48.

7.29. Решить задачу теплопроводности в двугранном угле ($0 < r$, $0 < \varphi < \alpha < 2\pi$), грань $\varphi = 0$ которого поддерживается при температуре $v_0\eta(r - a)$, а грань $\varphi = \alpha$ — при нулевой температуре.

7.30. Найти температуру клина ($0 < r$, $0 < \varphi < \alpha$), грань $\varphi = 0$ которого имеет температуру $v_0\eta(a - r)$, а грань $\varphi = \alpha$ теплоизолирована.

7.31. Найти температуру клина ($0 < r$, $0 < \varphi < \alpha$), грань $\varphi = 0$ которого имеет температуру $v_0\eta(a - r)$, а грань $\varphi = \alpha$ — температуру $-v_0\eta(a - r)$.

7.32. Какова температура однородного бруса с поперечным сечением ($r < r_0$, $0 < \varphi < \alpha$), если грань $\varphi = \alpha$ поддерживается при температуре v_2 , а остальная поверхность — при температуре v_1 ?

7.33. Внутри слоя $\{x, y, z: -\infty < x, y < \infty, |z| < d\}$ с теплоизолированной поверхностью расположена полуполоса $\{x, y, z: 0 < x, y = 0, |z| < d\}$, температура которой равна v_1 при $0 < x < r_0$ и v_2 при $r_0 < x$. Найти температуру слоя.

7.34. Электронная линза образована двумя параллельными плоскостями $y = \pm H$, потенциал которых

$$v(x, \pm H) = \begin{cases} v_1, & x < 0, \\ v_2, & x > 0. \end{cases}$$

Определить потенциал электростатического поля такой системы.

7.35. Решить задачу теплопроводности в канале с поперечным сечением ($-a < x < a$, $0 < y$), температура стенок $x = -a$ и $x = a$ которого равна нулю и $v_0\eta(H - y)$ соответственно, а дно теплоизолировано.

7.36. Найти температуру полуслоя $\{x, y, z: 0 < x < \infty, y > 0, |z| < d\}$, если температура части поверхности $\{x, y, z: 0 < x, y = 0, |z| < d\}$ равна v_1 при $0 < x < r_0$ и v_2 при $r_0 < x$, а остальная поверхность теплоизолирована.

7.37. Часть поверхности ($x > a > 0, y = 0$) двугранного угла ($0 < x, y$) поддерживается при нулевой температуре, часть ($x = 0, y > a$) — теплоизолирована, температура остальной поверхности v_0 . Найти плотность теплового потока на грани $x = 0$ и температуру теплоизолированной ее части.

7.38. Поперечное сечение цилиндра — полукруг $\{r, \varphi: 0 < r < r_0, 0 < \varphi < \pi\}$. Поверхность $r = r_0$ поддерживается при нулевой температуре, а температура плоской части равна $-v_0$ при $-r_0 < x < 0$ и v_0 при $0 < x < r_0$. Решить задачу теплопроводности.

7.39. Поперечное сечение цилиндра — полукруг $\{r, \varphi: 0 < r < r_0, 0 < \varphi < \pi\}$. Поверхность $r = r_0$ — теплоизолирована, а температура плоской части равна v_1 при $-r_0 < x < 0$ и v_2 при $x_0 < x < r_0$ и $-r_0 < x_0 < r_0$. Найти температуру цилиндра.

7.40. Поперечное сечение цилиндра — полукруг $\{r, \varphi: 0 < r < r_0, 0 < \varphi < \pi\}$. Поверхность $r = r_0$ — теплоизолирована, а температура плоской части равна v_1 при $0 < x < x_0$ и v_2 при $-r_0 < x < x_0, -r_0 < x_0 < r_0$. Найти температуру цилиндра.

7.41. Поперечное сечение цилиндра — полукруг $\{r, \varphi: 0 < r < r_0, 0 < \varphi < \pi\}$. Диаметральная плоскость теплоизолирована, а температура поверхности $r = r_0$ равна v_1 при $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ и v_2 при $\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$. Найти температуру цилиндра.

7.42. Решить внутреннюю задачу Дирихле

$$\Delta v = 0, 0 < r < r_0, 0 \leq \varphi < 2\pi, \\ |v| < \infty, v(r_0, \varphi) = \begin{cases} v_1, & 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}, \\ v_2, & \frac{\pi}{2} < \varphi < 2\pi. \end{cases}$$

7.43. Часть поверхности ($r = r_0, 0 < \varphi < \pi$) цилиндра ($r < r_0$) теплоизолирована, а температура остальной поверхности равна v_0 при $\pi < \varphi < \frac{3}{2}\pi$ и $-v_0$ при $\frac{3}{2}\pi < \varphi < 2\pi$. Найти температуру теплоизолированной части поверхности.

7.44. Решить внутреннюю краевую задачу в круге

$$\Delta v = 0, 0 < r < r_0, 0 \leq \varphi < 2\pi, \\ |v| < \infty, v_r(r_0, \varphi) = 0, 0 < \varphi < \pi, \\ v(r_0, \varphi) = \begin{cases} v_1, & \pi < \varphi < \frac{3\pi}{2}, \\ v_2, & \frac{3\pi}{2} < \varphi < 2\pi. \end{cases}$$

7.45. Часть поверхности ($-\infty < x < \infty, y = 0$) слоя $\{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y < H\}$ поддерживается при температуре v_0 ,

температура части $(-\infty < x < 0, y = H)$ равна нулю, а остальная поверхность теплоизолирована. Найти плотность теплового потока через грань $(y = 0)$ и температуру его теплоизолированной части.

7.46. Найти температуру слоя $\{x, y: -\infty < x < \infty, -H < y < H\}$, если температура поверхности $y = -H$ равна $-v_0\eta(x)$, а температура поверхности $y = H$ равна $v_0\eta(x)$.

7.47. Найти температуру слоя $\{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y < H\}$, если температура поверхности $y = 0$ равна нулю, а температура поверхности $y = H$ равна $v_0\eta(a - |x|)$, $a > 0$.

7.48. Решить задачу теплопроводности для слоя $\{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y < H\}$, температура поверхностей $y = 0$ и $y = H$ которого равна, соответственно, $-v_0 \operatorname{sign} x$ и $v_0 \operatorname{sign} x$.

Пример 7.3. Найти плотность заряда на плоскости $y = 0$ электростатической системы, рассмотренной в примере 7.1. Плотность заряда на проводнике вычисляется по формуле

$$\sigma = \frac{1}{4\pi} E_n|_{\partial\Omega_z},$$

где E_n — нормальная составляющая поля на поверхности проводника.

Скалярное произведение двумерных векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$, записанных в комплексной форме $a = a_x + ia_y$, $b = b_x + ib_y$, можно представить в виде произведения комплексных чисел

$$(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \operatorname{Re}(a\bar{b}) = \operatorname{Re}(\bar{a}b) = \frac{1}{2}(a\bar{b} + \bar{a}b). \quad (7.9)$$

Следовательно,

$$\sigma = \frac{1}{4\pi} \operatorname{Re}(E\bar{\pi}_z)|_{\partial\Omega_z}. \quad (7.10)$$

Так как при конформном отображении $w = w(z)$ происходит поворот вектора на угол $\arg w'(z)$, то единичные векторы нормалей n_z и n_w (рис. 7.1) связаны соотношением

$$n_w = n_z \frac{w'}{|w'|} \Big|_{\partial\Omega_z}.$$

На границе $\operatorname{Im} w = v_1$ области Ω_w вектор $n_w = i$, если $v_2 > v_1$, или $n_w = -i$, если $v_2 < v_1$, т. е. $n_w = i \operatorname{sign}(v_2 - v_1)$. Поэтому

$$n_z = i \operatorname{sign}(v_2 - v_1) \frac{|w'|}{w'} \Big|_{\Gamma_1}. \quad (7.11)$$

Подстановка n_z и $E = -i\overline{w'}$ в (7.10) дает

$$\sigma_1 = \frac{\text{sign}(v_1 - v_2)}{4\pi} |w'| \Big|_{\Gamma_1}.$$

Комплексный потенциал определяется выражением (7.6), следовательно, на плоскости $y = 0$

$$\sigma(x) = -\frac{v_0}{4\pi H \left(1 + e^{-\frac{\pi x}{H}}\right)}. \quad (7.12)$$

7.49. Две полуплоскости, перпендикулярные к плоскости xOy , следы которых есть лучи $(x < -a)$ и $(a < x)$, заряжены до потенциалов $-v_0$ и v_0 соответственно. Найти плотность заряда на полуплоскостях.

7.50. Внутри угла $(0 < \varphi < \alpha)$ с проводящими заземленными гранями расположена полуплоскость $(0 < r_0 < r, \varphi = \alpha/2)$, потенциал которой v_0 . Определить плотность заряда на гранях угла.

7.51. Полуплоскость $(0 < x, y = H/2)$, потенциал которой v_0 , расположена между проводящими заземленными плоскостями $y = 0$ и $y = H$. Определить плотность заряда на плоскостях.

7.52. Две полуплоскости $(x < -a, y = H/2)$ и $(a < x, y = H/2)$, потенциал которых v_0 , расположены между проводящими заземленными плоскостями $y = 0$ и $y = H$. Определить плотность заряда на заземленных плоскостях.

7.53. Полуплоскость $(0 < a < x, y = H/2)$, потенциал которой v_0 , расположена внутри полого цилиндрического проводника с поперечным сечением $(0 < x, 0 < y < H)$. Найти плотность заряда на полуплоскости, если потенциал проводника равен нулю.

7.54. Полуплоскость $(x = 0, H < y)$, потенциал которой v_0 , расположена перпендикулярно к проводящей заземленной плоскости $(y = 0)$ с ребром $(x = 0, 0 < y < h < H)$. Найти плотность заряда на полуплоскости.

7.55. Параллельно проводящей заземленной плоскости $(y = 0)$ с ребром $\left(x = 0, 0 < y < \frac{H}{2}\right)$ расположена плоскость $(y = H)$, потенциал которой v_0 . Найти плотность заряда на плоскости $y = H$.

7.56. Перпендикулярно к проводящей заземленной плоскости $(y = 0)$ с цилиндрическим выступом $(x^2 + y^2 = r_0^2, y > 0)$ расположена полуплоскость $(x = 0, y > H > r_0)$, потенциал

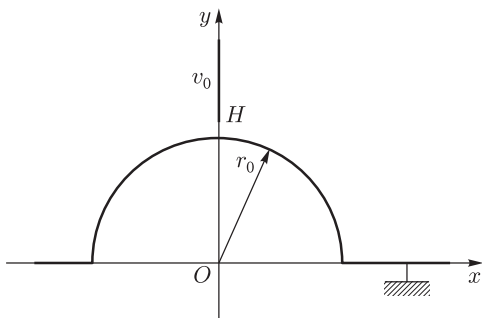


Рис. 7.5

которой v_0 (рис. 7.5). Определить плотность заряда на полуплоскости.

7.57. Найти плотность заряда на экранах, имеющих форму гиперболических цилиндров ($x = \pm\sqrt{y^2 + 1}$, $-\infty < y < \infty$), если их потенциалы $-v_0$ и v_0 соответственно.

7.58. Гиперболический цилиндр ($x = \sqrt{y^2 + 1}$, $-\infty < y < \infty$) заряжен до потенциала v_0 . Определить плотность заряда, индуцированного на заземленной проводящей плоскости $x = 0$.

Пример 7.4. Образующая (ось) цилиндрической поверхности S перпендикулярна к плоскости (z); S_1 — часть S , сечение которой плоскостью (z) есть линия S_1 , а длина вдоль оси равна единице. В электростатической системе из примера 7.1 найти заряд Q_1 на поверхности $S_1 = \{x, y: 0 < x < l, y = 0\}$. По определению

$$Q_1 = \int_{S_1} \sigma |dz|.$$

Достичь результата можно двумя способами.

1) С помощью соотношений (7.10), (7.7), (7.11) удастся избежать вычисления плотности заряда:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \int_{S_1} \operatorname{Re} \frac{(\overline{E} n_z)}{4\pi} |dz| = \frac{1}{4\pi} \operatorname{Re} \int_{S_1} i w' n_z dz = \frac{1}{4\pi} \operatorname{Re} \int_{S_1} i i \operatorname{sign} v_0 w' \frac{|w'|}{w'} |dz| = \\ &= -\frac{\operatorname{sign} v_0}{4\pi} \int_{S_1} |dw| = -\frac{\operatorname{sign} v_0}{4\pi} \int_{S_1} |du| = -\frac{\operatorname{sign} v_0}{4\pi} |u_2 - u_1|. \end{aligned}$$

Комплексный потенциал получен в примере 7.1 в виде (7.6), следовательно,

$$Q_1 = -\frac{\operatorname{sign} v_0}{4\pi} \frac{|v_0|}{\pi} \left| \ln \left(1 + e^{\frac{\pi l}{H}} \right) - \ln 2 \right| = -\frac{v_0}{4\pi^2} \ln \left(e^{\frac{\pi l}{2H}} \operatorname{ch} \frac{\pi l}{2H} \right).$$

2) Так как плотность заряда определена и выражается формулой (7.12), то

$$\begin{aligned} Q_1 &= \int_0^l \frac{-v_0 dx}{4\pi H (1 + e^{-\frac{\pi x}{H}})} = -\frac{v_0}{4\pi H} \int_0^l \frac{e^{\frac{\pi x}{H}} dx}{e^{\frac{\pi x}{H}} + 1} = \\ &= -\frac{v_0}{4\pi H} \frac{H}{\pi} \ln \left(e^{\frac{\pi x}{H}} + 1 \right) \Big|_0^l = \text{и т.д.} \end{aligned}$$

В задачах 7.59–7.75 найти заряд Q_1 на цилиндрической поверхности S_1 , поперечное сечение которой плоскостью (z) — линия S_1 , а длина (вдоль оси) этой поверхности равна единице, или (в зависимости от условий задачи) определить величину Q_1 стационарного теплового потока через поверхность S_1 .

7.59. Температура полуплоскости $\{x, y: x = 0, 0 < h < y\}$ равна v_1 , а температура плоскости $\{x, y: -\infty < x < \infty, y = 0\}$ равна v_2 ; $S_1 = \{x, y: -l < x < l, y = 0\}$. Решить задачу двумя способами, предложенными в примере 7.4.

7.60. Температура грани $y = 0$ двугранного угла $\{x, y: 0 < x, 0 < y\}$ равна v_1 при $0 < x < a$ и v_2 при $a < x$, а грань $x = 0$ поддерживается при температуре v_1 ; $S_1 = \{x, y: x = 0, 0 < y < l\}$.

7.61. Температура грани $x = 0$ двугранного угла $\{x, y: 0 < x, 0 < y\}$ равна v_1 при $0 < y < a_1$, v_2 при $a_1 < y < a_2$, остальная часть этой грани теплоизолирована, а грань $y = 0$ поддерживается при температуре v_1 ; $S_1 = \{x, y: 0 < x < l, y = 0\}$.

7.62. Перпендикулярно к проводящей заземленной плоскости $y = 0$ расположена полуплоскость $\{x, y: x = 0, 0 < h < y\}$, потенциал которой v_0 ; $S_1 = \{x, y: x = 0, h < y < H\}$.

7.63. Температура плоскости $y = 0$ с цилиндрическим выступом $\{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2, y \geq 0\}$ равна v_2 , а температура перпендикулярной к ней полуплоскости $\{x, y: x = 0, r_0 < h < y\}$ равна v_1 ; $S_1 = \{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2, y \geq 0\}$

7.64. Перпендикулярно к проводящей заземленной плоскости $y = 0$ с цилиндрическим выступом $\{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2, y \geq 0\}$

расположена полуплоскость $\{x, y: x = 0, 0 < h < y\}$, потенциал которой v_0 ; $S_1 = \{x, y: x = 0, h < y < H\}$.

7.65. Температура поверхности цилиндра

$$v(r_0, \varphi) = \begin{cases} v_1, & -\frac{\pi}{4} < \varphi < \frac{5\pi}{4}, \\ v_2, & \frac{5\pi}{4} < \varphi < \frac{7\pi}{4}; \end{cases}$$

$S_1 = \{r, \varphi: r = r_0, 0 < \varphi < \pi\}$.

7.66. Температура поверхности цилиндрического бруса $\{r, \varphi: 0 < r < r_0, 0 < \varphi < \alpha < 2\pi\}$ равна

$$v(r, 0) = v(r, \alpha) = \begin{cases} v_1, & 0 < r < a \\ v_2, & a < r < r_0, \end{cases}$$

$v(r_0, \varphi) = v_2$; $S_1 = \{r, \varphi: r = r_0, 0 < \varphi < \alpha\}$.

7.67. Часть $(x > 0, y > 0)$ поверхности эллиптического цилиндра $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1\right)$ теплоизолирована, а температура остальной части v_0 ; S_1 — часть поверхности при $x < 0$. Найти также температуру $v(x, y)$ внутри цилиндра и доказать единственность решения.

7.68. Часть $\{x, y: -a < x < a, y = H\}$ поверхности слоя $\{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y < H\}$ поддерживается при температуре v_1 , а температура остальной части равна v_2 ; $S_1 = \{x, y: 0 < x < l, y = 0\}$.

7.69. Часть $\{x, y: 0 < x < \infty, y = H\}$ поверхности слоя $\{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y < H\}$ поддерживается при температуре v_1 , а температура остальной части равна v_2 ; $S_1 = \{x, y: 0 < x < l, y = 0\}$.

7.70. Температура поверхности $y = 0$ слоя $\{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y < H\}$ равна v_2 , часть $x > 0$ поверхности $y = H$ теплоизолирована, а часть $x < 0$ поддерживается при температуре v_1 ; $S_1 = \{x, y: 0 < x < l, y = 0\}$.

7.71. Поверхность $y = H$ слоя $\{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y < H\}$ на участке $-a < x < a$ теплоизолирована, а температура остальной части этой поверхности равна v_2 , температура поверхности $y = 0$ равна v_1 ; $S_1 = \{x, y: 0 < x < l, y = 0\}$.

7.72. Границы слоя — плоскость $y = H$, потенциал которой v_2 , и плоскость $y = 0$ с ребром $S_1 = \{x, y: x = 0, 0 < y < h < H\}$, потенциал которой (и ребра) равен v_2 ; S_1 — ребро.

7.73. Температура дна канала $\{x, y: -a < x < a, 0 < y < \infty\}$ равна нулю, температура стенок $v_0\eta(y - h)$, $h > 0$; S_1 — дно канала.

7.74. Потенциал полосы, поперечное сечение которой промежуток $\{x, y: -a < x < a, y = 0\}$, равен v_1 при $x < 0$, v_2 при $x > 0$; $S_1 = \left\{x, y: \frac{a\sqrt{3}}{2} < x < a, y = 0\right\}$.

7.75. Потенциалы полуплоскостей $\{x, y: -\infty < x < -a, y = 0\}$ и $\{x, y: a < x < \infty, y = 0\}$ соответственно равны $-v_0$ и v_0 ; $S_1 = \{x, y: a < x < l\}$.

Пример 7.5. Методом комплексного потенциала решить задачу Дирихле в полуплоскости $y > 0$, если решение $v(x, y)$ принимает при $y = 0$ постоянные значения $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ на промежутках

$$(-\infty, a_1), (a_1, a_2), (a_2, a_3), \dots, (a_{n-1}, \infty)$$

соответственно. Используя полученный результат, найти стационарную температуру слоя $(0 < y < H)$, поверхность $y = 0$ которого имеет температуру $v_0(1 - \eta(x))$, а поверхность $y = H$ — температуру $v_0\eta(x)$.

Так как

$$v(x, 0) = v_n + \sum_{k=1}^{n-1} (v_k - v_{k+1})\eta(a_k - x),$$

то комплексный потенциал равен сумме комплексных потенциалов, соответствующих каждому слагаемому. Если $v(x, 0) = v_n$, то $v(x, y) \equiv v_n$, поэтому $w_n = i v_n + C_n$, где $\operatorname{Im} C_n = 0$. Если $v(x, 0) = (v_k - v_{k+1})\eta(a_k - x)$, то

$$w_k = \frac{v_k - v_{k+1}}{\pi} \ln(z - a_k) + C_k, \quad \operatorname{Im} C_k = 0, \quad (7.13)$$

поскольку именно эта функция отображает полуплоскость на полосу с необходимым соответствием границ (пример 7.1). В результате

$$w(z) = i v_n + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{n-1} (v_k - v_{k+1}) \ln(z - a_k) + C, \quad \operatorname{Im} C = 0,$$

$v = \operatorname{Im} w$ — решение задачи Дирихле.

Задача Дирихле для полосы сводится к соответствующей задаче для полуплоскости посредством конформного отображения $\zeta = \exp\left(\frac{\pi x}{H}\right)$. Согласно формуле (7.13)

$$w(z) = \frac{v_0}{\pi} \ln(\zeta - 1) - \frac{v_0}{\pi} \ln \zeta + \frac{v_0}{\pi} \ln(\zeta + 1) + C,$$

откуда

$$v(x, y) = \frac{v_0}{\pi} \arg\left(\operatorname{sh}\left(\frac{\pi x}{H} + i\frac{\pi y}{H}\right)\right) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\operatorname{th}\frac{\pi x}{H} \operatorname{ctg}\frac{\pi y}{H}\right).$$

7.76. Грань $x = 0$ двугранного угла ($0 < x$, $0 < y$) поддерживается при нулевой температуре, а температура грани $y = 0$ равна v_1 при $0 < x < a$, v_2 при $a < x$. Решить стационарную задачу теплопроводности.

7.77. Найти электростатический потенциал в пространстве между двумя плоскостями $y = 0$ и $y = H$, если плоскость $y = 0$ имеет нулевой потенциал, а плоскость $y = H$ — потенциал $v_0 \operatorname{sign} x$.

7.78. Найти стационарную температуру в слое ($0 < y < H$), грань $y = H$ которого имеет температуру $-v_0(1 - \eta(x))$, а грань $y = 0$ — температуру $v_0\eta(x)$.

7.79. Найти потенциал электростатического поля в пространстве между двумя параллельными плоскостями $y = \pm H$, потенциал которых

$$v(x, \pm H) = \begin{cases} v_1, & |x| < a, \\ v_2, & |x| > a. \end{cases}$$

7.80. Температура поверхности слоя ($0 < y < H$) равна

$$v(x, 0) = v(x, H) = \begin{cases} v_2, & |x| < a, \\ v_1, & |x| > a. \end{cases}$$

Какова величина теплового потока, проходящего через участок единичной длины (вдоль перпендикуляра к осям Ox и Oy) поверхности $S_1 = \{x, y: |x| < \frac{a}{2}, y = 0\}$?

7.81. Найти стационарную температуру в канале с поперечным сечением ($-a < x < a$, $0 < y$), стенки $x = -a$ и $x = a$ которого имеют температуру $v_0\eta(h - y)$, а дно теплоизолировано.

7.82. Определить электростатический потенциал внутри коробки, поперечное сечение которой есть полуполоса ($0 < x, |y| < H$),

если потенциал стенки $x = 0$ равен v_0 , а основания $y = \pm H$ имеют потенциал $v_0\eta(x - a)$.

7.83. Стенки $x = \pm a$ канала, поперечное сечение которого — полуполоса ($-a < x < a, 0 < y$), поддерживаются при температуре $v_0\eta(h - y)$, а дно — при нулевой температуре. Определить плотность теплового потока через дно канала, если температурное поле стационарно.

7.84. Найти стационарную температуру цилиндра, поперечным сечением которого является полукруг ($r < r_0, 0 < \varphi < \pi$), если диаметральной плоскостью поддерживается при температуре v_1 , а остальная поверхность — при температуре

$$v(r_0, \varphi) = \begin{cases} v_0, & 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}, \\ -v_0, & \frac{\pi}{2} < \varphi < \pi. \end{cases}$$

7.85. Решить стационарную задачу теплопроводности для клина $\{r, \varphi: 0 < r, 0 < \varphi < \alpha\}$, температура поверхности которого

$$v(r, 0) = \begin{cases} -v_0, & r < a, \\ v_0, & r > a, \end{cases} \quad v(r, \alpha) = \begin{cases} v_0, & r < a, \\ -v_0, & r > a. \end{cases}$$

7.86. Решить задачу Дирихле

$$\Delta v = 0, \quad 0 < r, \quad 0 < \varphi < \alpha, \\ |v| < \infty, \quad v(r, 0) = v_0\eta(a_1 - r), \quad v(r, \alpha) = v_0\eta(r - a_2).$$

7.87. Найти стационарную температуру двугранного угла $\{r, \varphi: 0 < r, 0 < \varphi < \alpha\}$, температура поверхности которого

$$v(r, 0) = v(r, \alpha) = \begin{cases} 0, & 0 < r < a_1, \\ v_0, & a_1 < r < a_2, \\ 0, & a_2 < r. \end{cases}$$

7.88. Часть $0 < r < a$ грани $\varphi = 0$ двугранного угла $0 < \varphi < \alpha$ поддерживается при температуре v_0 , а остальная часть этой грани теплоизолирована; температура части $0 < r < a$ грани $\varphi = \alpha$ равна $-v_0$, а остальная часть этой грани теплоизолирована. Определить температуру теплоизолированных участков.

7.89. Часть $S_1 = \{r, \varphi: r = r_0, 0 < \varphi < \alpha\}$ поверхности бруса $\{r, \varphi: 0 < r, 0 < \varphi < \alpha\}$ теплоизолирована, а температура остальной части

$$v(r, 0) = v_0 \eta(r - a), \quad a \in (0; r_0), \quad v(r, \alpha) = 0.$$

Какова температура участка S_1 ?

7.90. Температура поверхности бруса $\{r, \varphi: 0 < r, 0 < \varphi < \alpha\}$ равна

$$v(r, 0) = \begin{cases} -v_1, & 0 < r < a, \\ v_2, & a < r < r_0, \end{cases}$$

$$v(r, \alpha) = \begin{cases} v_1, & 0 < r < a, \\ v_2, & a < r < r_0, \end{cases} \quad v(r_0, \varphi) = v_2.$$

Определить величину теплового потока через единицу длины (вдоль оси) участка поверхности $r = r_0$.

7.91. При условиях предыдущей задачи найти плотность q теплового потока через дугу $r = r_0$ и полный поток Q через половину дуги $\{r, \varphi: r = r_0, 0 < \varphi < \frac{\alpha}{2}\}$.

7.92. Потенциал проводника с крестообразным поперечным сечением $\{x, y: |x| < a, |y| < a\}$ равен: 1) v_1 при $y \geq 0 + i0$, v_2 на остальной части поверхности; 2) v_2 на части $\{x, y: x = 0, -a < y < 0\}$ и v_1 — на остальной части. Найти величину заряда Q_1 на участке единичной длины (вдоль оси) поверхности $S_1 = \{x, y: x = 0, 0 < y < a\}$.

7.93. Потенциал проводника с поперечным сечением $\{x, y: |x| < 3a, 0 < y < \sqrt{7}a\}$ равен: 1) v_2 на части $\{x, y: |x| < 3a, y = 0 - i0\}$ поверхности и v_1 на остальной части; $S_1 = \{x, y: x = 0, 0 < y < \sqrt{7}a\}$; 2) v_2 на части $\{x, y: |x| < 3a, y = 0\}$ и v_1 на остальной части, $S_1 = \{x, y: |x| < 3a, y = 0 - i0\}$. Найти величину заряда Q_1 на участке единичной длины (вдоль оси) поверхности S_1 .

7.94. Потенциал проводника с крестообразным поперечным сечением $\{x, y: |x| < a, -2\sqrt{2}a < y < \sqrt{3}a\}$ равен: 1) v_1 при $y \geq 0 + i0$ и v_2 на остальной части поверхности; 2) v_2 на части $\{x, y: x = 0, -2\sqrt{2}a < y < 0\}$ и v_1 на остальной части. Найти величину заряда Q_1 на участке единичной длины (вдоль оси) поверхности $S_1 = \{x, y: x = 0, 0 < y < \sqrt{3}a\}$.

Пример 7.6. Плоское потенциальное течение идеальной несжимаемой жидкости описывается (при отсутствии источников и внешних сил) системой уравнений (см. (1.76), (1.77))

$$\operatorname{rot} V = 0, \quad \operatorname{div} V = 0, \quad (7.14)$$

$$\frac{1}{2}(V\overline{\nabla} + \overline{V}\nabla)V + \frac{1}{\rho_0}\nabla P = 0. \quad (7.15)$$

В последнем уравнении скалярное произведение векторов представлено в форме (7.9). В примере 7.1 показано, что при условиях (7.14) существует аналитическая функция $w = u + iv$, которая является комплексным потенциалом поля скоростей V . В гидродинамике V и w связаны соотношением

$$V = \overline{w'}. \quad (7.16)$$

Отсюда

$$V = \frac{\partial u}{\partial x} - i \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial u}{\partial y} = \nabla u,$$

т. е. $u(x, y)$ — потенциал скоростей. Так как семейства $u = C_1$ и $v = C_2$ ортогональны (пример 7.1), то $v(x, y) = C_2$ — линия тока.

Типичными задачами гидродинамики идеальной несжимаемой жидкости являются задачи обтекания: неподвижная цилиндрическая поверхность (неограниченная вдоль образующей) находится в плоско-параллельном потоке, скорость которого перпендикулярна образующей. Нужно найти поле скоростей и давление в жидкости. В данном (двумерном) случае говорят об обтекании профиля (или контура), которым является поперечное сечение поверхности.

Одна из задач обтекания состоит в построении потенциального течения, т. е. комплексного потенциала, в криволинейной полуплоскости Ω с границей L . Так как $\overline{V}(z) = w'$ — аналитическая функция, не равная нулю в Ω , и $\operatorname{Im} w|_L = C$ (L — одна из линий тока), то функция $w(z)$ конформно отображает Ω на полуплоскость, ограниченную прямой, параллельной оси Ou . Из аналитичности $w(z)$ в Ω следует, что $w(\infty) = \infty$ (иначе существовала бы конечная точка z , в которой $w(z) = \infty$, что противоречит аналитичности функции $w(z)$ в Ω). Для однозначного определения скорости необходимо ее задать в какой-либо точке гладкого участка границы L .

Другая задача заключается в построении потенциального течения в криволинейной полосе Ω , ограниченной достаточно гладкими линиями L_1 и L_2 ; расход Q жидкости (т. е. ее количество,

протекающее в единицу времени через участок единичной ширины поперечного сечения полосы) задан. В гидродинамике несжимаемой жидкости полагают $\rho_0 = 1$, следовательно, (см. рис. 7.6)

$$Q = \int_{z_1}^{z_2} \operatorname{Re} (\bar{V} n) |dz| = \int_{z_1}^{z_2} \operatorname{Re} (\bar{V} n |dz|),$$

где n — единичный вектор нормали, а dz — касательный вектор к линии L . Так как $n|dz| = -idz$, то

$$\operatorname{Re} \int_{z_1}^{z_2} (-i \bar{V} dz) = \operatorname{Re} \int_{z_1}^{z_2} (-i w' dz) = \operatorname{Re} \int_{z_1 \in L_1}^{z_2 \in L_2} (-i) dw = v_2 - v_1.$$

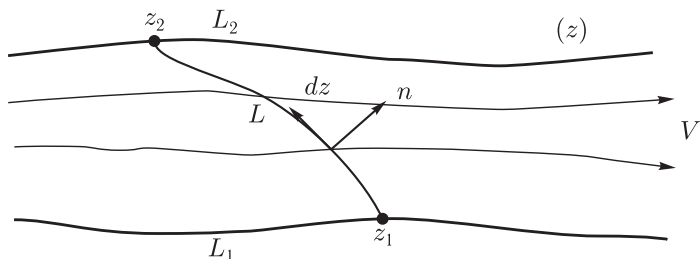


Рис. 7.6

Таким образом, функция $w(z)$ конформно отображает криволинейную полосу Ω на полосу $(v_1 < \operatorname{Im} w < v_2)$. Так как $w(z)$ — аналитическая в Ω функция, то $w(\pm\infty) = \pm\infty$ (знак указывает направление, по которому точка стремится к бесконечности).

Третья задача — обтекание ограниченного контура — рассмотрена в примере 7.26.

К первому типу относится задача определения линий тока жидкости, обтекающей прямой угол Ω (рис. 7.7). Комплексный потенциал поля скоростей $w = w(z)$ представляет собой аналитическую функцию, которая конформно отображает область Ω на полуплоскость, ограниченную прямой $\operatorname{Im} w = \operatorname{const}$, при условии $w(\infty) = \infty$. Такое отображение осуществляется функцией $w = \lambda z^2 + B$, где λ — вещественная константа. Линии тока $\operatorname{Im} w = C$ — гиперболы $xy = C$.

7.95. Определить форму линий тока при потенциальном обтекании тупого угла $3\pi/2$ (рис. 7.8).

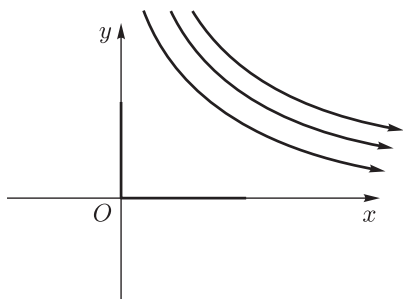


Рис. 7.7

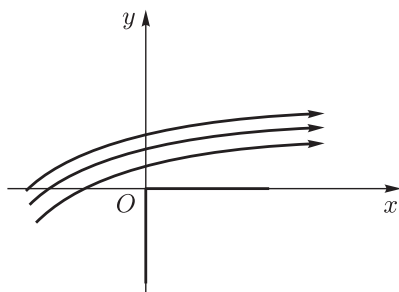


Рис. 7.8

7.96. Жидкость обтекает полуплоскость ($0 < x, y = 0$). Определить линии тока.

7.97. Плоско-параллельный поток жидкости, заполняющий полупространство ($y > 0$) обтекает плоскость ($y = 0$) с цилиндрическим выступом ($x^2 + y^2 = r_0^2, y > 0$), ось которого перпендикулярна потоку. Определить скорость жидкости на поверхности, ограничивающей поток, если $V(\infty) = V_0 > 0$.

7.98. Найти комплексный потенциал поля скоростей идеальной несжимаемой жидкости, обтекающей плотину, высота которой h , если $V(\infty) = V_0$ (рис. 7.9.) Определить скорость жидкости в сечении ($x = 0, H < y < \infty$) и в точках 1 и 2 плотины. Предполагается, что жидкость заполняет полупространство $0 < y$.

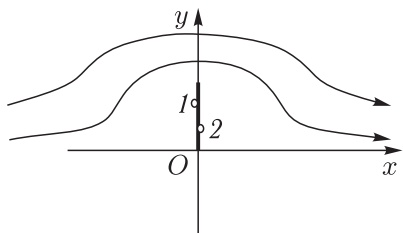


Рис. 7.9

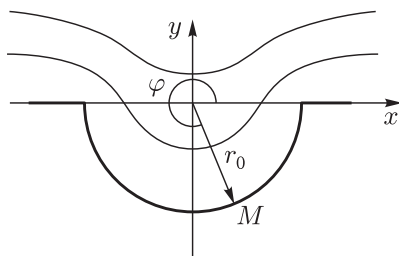


Рис. 7.10

7.99. Найти комплексный потенциал поля скоростей идеальной несжимаемой жидкости, текущей над плоскостью с цилиндрической впадиной, радиус которой r_0 , а ось перпендикулярна скорости жидкости, если $V(\infty) = V_0$ (рис. 7.10). Определить скорость жидкости на поверхности, ограничивающей поток.

7.100. Идеальная несжимаемая жидкость обтекает извне контур L , имеющий форму параболы $y^2 = 2px$, $p > 0$. Построить комплексный потенциал течения и определить скорость $V(z)$ жидкости на контуре, если $V(0) = V_0 i$.

7.101. Решить предыдущую задачу, если жидкость обтекает контур изнутри.

7.102. Идеальная несжимаемая жидкость обтекает изнутри контур L , имеющий форму ветви гиперболы $(x^2 - y^2 = 1, 1 \leq x)$. Найти комплексный потенциал течения и определить скорость $V(z)$ жидкости на контуре, если $V(1) = V_0 i$.

7.103. Решить предыдущую задачу, если жидкость обтекает контур извне.

7.104. Несжимаемая жидкость течет в криволинейной полосе, ограниченной ветвями гиперболы $x^2 - y^2 = 1$. Найти комплексный потенциал потока, если расход жидкости равен Q . Какова скорость жидкости в сечении $y = 0$ и в точках гиперболы?

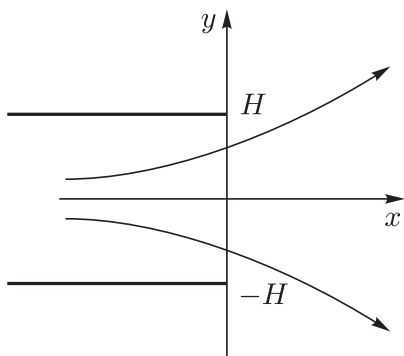


Рис. 7.11

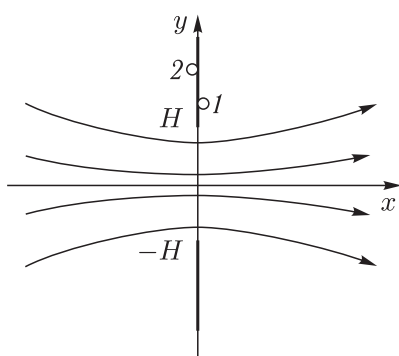


Рис. 7.12

7.105. Идеальная несжимаемая жидкость течет между двумя параллельными полуплоскостями ($x < 0, y = \pm H$) вдоль оси Ox , расход жидкости равен Q (рис. 7.11). Построить комплексный потенциал течения и определить линии тока. Найти точку z_0 , в которой скорость жидкости $V = -\frac{Qi}{2H}$.

7.106. Найти скорость жидкости, протекающей между двумя полуплоскостями ($x = 0, H < y$) и ($x = 0, y < -H$), ес-

ли ее расход равен Q (рис. 7.12). Найти скорости в сечении ($x = 0, |y| < H$), а также в точках:

1) ($x = 0 - 0, y = y_0 > H$) и 2) ($x = 0 + 0, y = y_0 > H$).

7.107. Определить комплексный потенциал скоростей идеальной несжимаемой жидкости в бесконечно глубоком бассейне, дно которого имеет порог высоты h (рис. 7.13), при условии $V(\infty) = V_0$. В какой точке z_0 скорость равна $V_0 e^{\frac{i\pi}{3}}$?

7.108. Найти комплексный потенциал течения идеальной несжимаемой жидкости в канале, одна из стенок которого имеет уступ (рис. 7.14); расход жидкости равен Q . При $H = 2h$ найти точку z_0 , в которой скорость $V = \frac{Q}{H}(1 + i)$.

7.109. Жидкость течет между плоскостями $y = -H$ и $y = H$, каждая из которых имеет ребро:

первая — ($x = 0, -H < y < -H + h$),

вторая — ($x = 0, H - h < y < H$),

где $0 < h < H$. Найти скорость жидкости в сечении ($x = 0, -H + h < y < H - h$), если она течет вдоль оси Ox и ее расход равен Q .

7.110. Построить комплексный потенциал поля скоростей идеальной несжимаемой жидкости, текущей в канале с препятствием; стенки канала — плоскости $y = 0, y = H$, препятствие имеет форму ребра ($x = 0, 0 < y < \frac{H}{2}$); расход жидкости равен Q .

Определить скорости в сечении ($x = 0, \frac{H}{2} < y < H$), а также в точках 1 и 2, рис. 7.12, координаты которых соответственно равны $x = -0, y = y_0, 0 < y_0 < \frac{H}{2}$ и $x = +0, y = y_0, 0 < y_0 < \frac{H}{2}$.

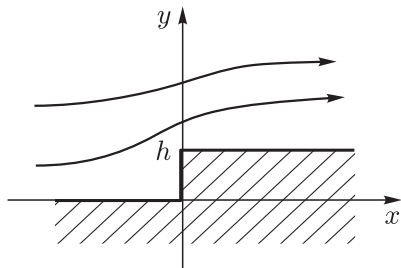


Рис. 7.13

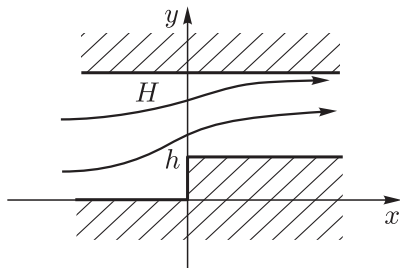


Рис. 7.14

7.111. Тонкий угольный пласт, толщина которого H , ограничен непроницаемыми плоскостями, параллельными плоскости xOy , и занимает (двумерную) область $\Omega = \{x, y: 0 < x, 0 < y\}$, давление на границе которой P_L . Определить поток газа, поступающего из пласта через участок $(0, x)$, где $x > 0$, в процессе стационарной изотермической фильтрации, если давление в точке $(x_0, y_0) \in \Omega$ равно $P_0 > P_L$.

7.112. Тонкий угольный пласт, толщина которого H , ограничен непроницаемыми плоскостями, параллельными плоскости xOy . В ходе выработки угля образовался длинный штрек, давление в котором P_L , а давление в некоторой точке M_0 пласта $P_0 > P_L$. Если штрек достаточно узок, а точка M_0 близка к его концу (забою), то можно принять, что (двумерная) область, занимаемая пластом, представляет собой плоскость с разрезом по лучу $(0 < x)$. В этом приближении найти поток газа, поступающего из пласта на участке $(0, x)$ штрека в процессе установившейся изотермической фильтрации, если $M_0 = (-x_0 < 0, y = 0)$.

7.113. В тонком угольном пласте, толщина которого H , ограниченном двумя непроницаемыми плоскостями, каждая из которых параллельна плоскости xOy , пробита скважина на небольшую глубину h . Давление в скважине P_L , а в некоторой точке $M_0(x_0, y_0)$ пласта $P_0 > P_L$. Если скважина достаточно узкая, так что фильтрация через дно пренебрежимо мала, а точка M_0 расположена вблизи скважины, то можно считать, что (двумерная) область, занятая пластом, представляет собой полуплоскость $(y > 0)$ с разрезом по отрезку длины h оси Oy . В этом приближении найти поток газа, поступающего из пласта в скважину в процессе установившейся изотермической фильтрации. Рассмотреть случай $x_0 = 0, y_0 > h$.

7.114. Тонкий угольный пласт, толщина которого H , ограничен непроницаемыми плоскостями, параллельными плоскости xOy , и занимает область Ω (рис. 7.15). Найти поток Q газа через участок BC в процессе стационарной изотермической фильтрации, если на границе $L = \partial\Omega$ давление P_L , в точке $(x_0, y_0) \in \Omega$ оно равно $P_0 > P_L$, а фильтрация через участок B пренебрежимо мала.

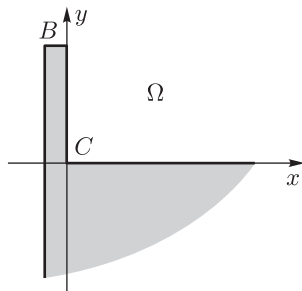


Рис. 7.15

7.115. Тонкий угольный пласт, толщина которого H , ограничен непроницаемыми плоскостями, параллельными плоскости xOy . В ходе добычи угля образовалась выемка в форме полуполосы ($0 < x, |y| < h$). Найти поток Q газа, поступающего из пласта через участок ($x = 0, |y| < h$) в процессе установившейся изотермической фильтрации, если давление на границе пласта P_L , а в точке $(x_0, 0)$ пласта давление $P_0 > P_L$.

7.116. Тонкий угольный пласт, толщина которого H , ограничен непроницаемыми плоскостями, параллельными плоскости xOy . В ходе добычи угля образовалась выемка в форме полуполосы ($0 < x, |y| < h$) со скважиной ($0 < x < l, y = 0$). Найти поток Q газа, поступающего из пласта через стенки скважины в процессе установившейся изотермической фильтрации, если давление на границе пласта P_L , в точке $(x_0, 0)$ пласта давление $P_0 > P_L$, а фильтрация через дно скважины пренебрежимо мала.

7.2. Комплексный потенциал точечного источника

Пример 7.7. 1. Получить комплексный потенциал аксиально симметричного поля, источника которого равномерно распределены на окружности $|z| = r_0$, если вне окружности поле направлено по радиусам, а внутри равно нулю. Рассмотреть случай точечного источника.

2. Определить комплексный потенциал и поле E проводящей цилиндрической поверхности, заряд единицы длины (вдоль оси) которой равен q , а ее поперечное сечение — кусочно-гладкая линия $S = \partial\Omega$, где Ω — односвязная область в расширенной комплексной плоскости, содержащая точку $z = \infty$.

1. В системе координат с началом в центре окружности поле

$$A = f(|z|) \frac{z}{|z|}.$$

Поток поля через окружность $|z| = r > r_0$ (см. (7.9))

$$N = 2\pi|z|f(|z|)\operatorname{Re} \left(\frac{z}{|z|} \frac{\bar{z}}{|z|} \right) = 2\pi|z|f(|z|).$$

Из теоремы Остроградского для кольца ($r_0 < r_1 \leq r \leq r_2$)

$$N(r_2) - N(r_1) = \int_S \operatorname{div} A \, ds$$

вытекает, что величина N потока не зависит от r и может служить мерой интенсивности источников. Таким образом,

$$A = \frac{Nz}{2\pi|z|^2} = \frac{N}{2\pi\bar{z}}, \quad (7.17)$$

откуда на основании формулы (7.4)

$$w(z) = i \frac{N}{2\pi} \ln \frac{1}{z} + C_1, \quad |z| > r_0. \quad (7.18)$$

Аналогично,

$$w(z) = C_2, \quad |z| < r_0. \quad (7.19)$$

Если $v = \operatorname{Im} w$ — непрерывная функция, то $\operatorname{Im} C_1 = \operatorname{Im} C_2$.

Комплексный потенциал электростатического поля равномерно заряженного цилиндра, поперечное сечение которого — окружность $|z| = r_0$, заряд единицы длины q ($N = 4\pi q$ по теореме Гаусса),

$$w(z) = \begin{cases} 2qi \ln \frac{1}{z} + C_1, & |z| > r_0, \\ C_2, & |z| < r_0. \end{cases} \quad (7.20)$$

Комплексный потенциал точечного источника получается из формулы (7.18) при $r_0 = 0$. В частности, комплексный потенциал бесконечной равномерно заряженной нити, перпендикулярной z -плоскости, след которой на этой плоскости — точка z_0 , а линейная плотность заряда q ,

$$w(z) = 2qi \ln \frac{1}{z - z_0} + C. \quad (7.21)$$

Подобный линейный заряд будет обозначаться $(z_0; q)$.

2. Пусть функция $\zeta = \zeta(z)$ конформно отображает область Ω на внешность единичного круга, а точку $z = \infty$ — в точку $\zeta = \infty$. Согласно формуле (7.20) комплексный потенциал электростатического поля вне проводника

$$w(z) = 2qi \ln \frac{1}{\zeta(z)} + C, \quad \zeta(\infty) = \infty. \quad (7.22)$$

Необходимость условия $\zeta(\infty) = \infty$ вытекает из физических соображений: если бы $\zeta(z_0) = \infty$, где $z_0 \neq \infty$, то в точке z_0 электростатический потенциал

$$v = \operatorname{Im} w(z_0) = 2qi \ln \frac{1}{|\zeta(z_0)|} + \operatorname{Im} C$$

был бы неограничен. Поле определяется формулой (7.4), откуда

$$E = 2q \frac{\bar{\zeta}'}{\zeta}. \quad (7.23)$$

Итак, задача определения комплексного потенциала сводится к построению конформного отображения $\zeta(z)$ области Ω (плоскости (z) с разрезом по полуокружности) на внешность единичного круга при условии $\zeta(\infty) = \infty$.

Поперечное сечение цилиндрической поверхности — полуокружность (рис. 7.16, а), радиус которой r_0 . Найти напряженность электрического поля, а также значения E_1 и E_2 в точках 1 и 2 соответственно.

Дробно-линейное отображение $z_1 = \frac{r_0 + z}{r_0 - z}$ преобразует область Ω в Ω_1 — плоскость (z_1) с разрезом по положительной части действительной оси (рис. 7.16, б). В области Ω_1 можно выделить однозначную ветвь функции $z_2 = \sqrt{z_1}$, где $0 < \arg z_1 < 2\pi$. Эта функция отображает Ω_1 на Ω_2 — верхнюю полуплоскость плоскости (z_2) (рис. 7.16, в). В частности, точка 1 области Ω переходит в точку

$$z_1(r_0, \varphi) = i \frac{r_0 e^{i\varphi} + r_0}{r_0 e^{i\varphi} - r_0} = \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}$$

с нулевым аргументом, а точка 2 в $z_2(r_0, \varphi) = \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} e^{2\pi i}$. Следовательно, при отображении области Ω на Ω_2

$$\text{точка } 1 \longrightarrow \sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}}, \quad \text{точка } 2 \longrightarrow -\sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}}.$$

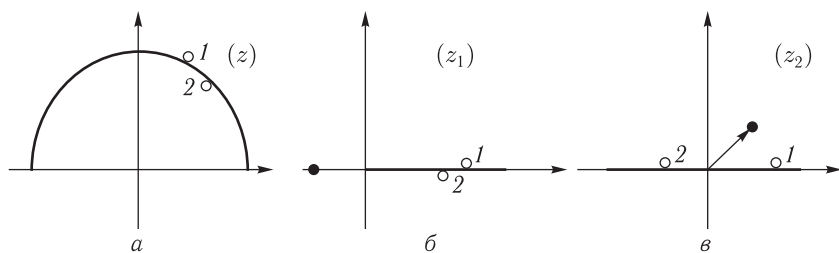


Рис. 7.16

Теперь нужно проследить за движением точки $z = \infty$ (она закрашена):

$$z_1(\infty) = -1, \quad z_2(\infty) = e^{\frac{i\pi}{4}}.$$

Таким образом,

$$\zeta = \frac{z_2 - e^{-\frac{i\pi}{4}}}{z_2 - e^{\frac{i\pi}{4}}}, \quad w(z) = 2iq \ln \frac{1}{\zeta} + C.$$

З а м е ч а н и е 1. Чтобы найти конформное отображение общего вида, следует вместо z_1 ввести λz_1 , где $\lambda > 0$; при этом

аргументы комплексных чисел не изменятся. А вместо ζ надо взять $e^{i\alpha}\zeta$. В результате новая функция ζ будет отличаться от полученной постоянным множителем. Это изменит лишь аддитивную постоянную в выражении для комплексного потенциала.

Итак, напряженность поля определяется формулой (7.23), в которой

$$\frac{\bar{\zeta}'}{\zeta} = \frac{-i\sqrt{2}z_2'}{(z_2 - e^{\frac{i\pi}{4}})(z_2 + e^{\frac{-i\pi}{4}})} = -\frac{\sqrt{2}r_0}{(z_1 - \sqrt{2z_1} + 1)\sqrt{z_1}(z - r_0)^2},$$

$$E(z) = -\frac{2\sqrt{2}r_0}{(\bar{z}_1 - \sqrt{2\bar{z}_1} + 1)\sqrt{\bar{z}_1}(\bar{z} - r_0)^2},$$

$$E_1 = \frac{-2\sqrt{2}qr_0(-e^{i\varphi})}{\left(\operatorname{ctg}\frac{\varphi}{2} - \sqrt{2\operatorname{ctg}\frac{\varphi}{2} + 1}\right)\sqrt{\operatorname{ctg}\frac{\varphi}{2}}4\sin^2\frac{\varphi}{2}} =$$

$$= \frac{qe^{i\varphi}}{r_0\sqrt{2\operatorname{ctg}\frac{\varphi}{2}}\left(\operatorname{ctg}\frac{\varphi}{2} - \sqrt{2\operatorname{ctg}\frac{\varphi}{2} + 1}\right)\sin^2\frac{\varphi}{2}},$$

$$E_2 = \frac{qe^{i(\pi+\varphi)}}{r_0\sqrt{2\operatorname{ctg}\frac{\varphi}{2}}\left(\operatorname{ctg}\frac{\varphi}{2} + \sqrt{2\operatorname{ctg}\frac{\varphi}{2} + 1}\right)\sin^2\frac{\varphi}{2}}.$$

З а м е ч а н и е 2. В выражениях для $E_{1,2}$ проявляется известное свойство проводника: в точках любой гладкой части S поверхности вектор E направлен по нормали к S .

В задачах 7.117–7.126 определить электростатическое поле цилиндрического проводника с заданным сечением (поперечным), заряд единицы длины (вдоль оси) которого равен q .

7.117. Проводник представляет собой два цилиндра (рис. 7.2).

7.118. Сечение проводника — дуга окружности (рис. 7.17). Найти вектор напряженности поля в точке $z = 0$ и в точке дуги $z = r_0 - 0$.

7.119. Сечение проводника — пересечение двух одинаковых кругов (рис. 7.18). Найти также вектор напряженности поля в точках 1 и 2.

7.120. Сечение проводника — полукруг ($x^2 + y^2 \leq r_0^2$, $y \geq 0$). Найти напряженность поля в точках $z_1 = 2r_0i$ и $z_2 = 0$.

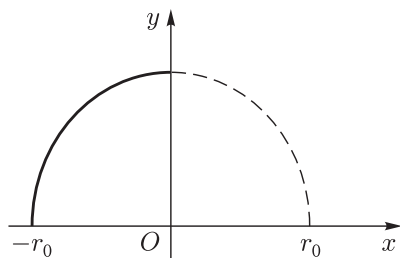


Рис. 7.17

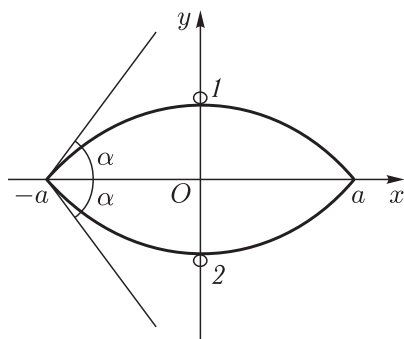


Рис. 7.18

7.121. Найти напряженность поля в точках 1 и 2 проводника, сечение которого дано на рис. 7.19.

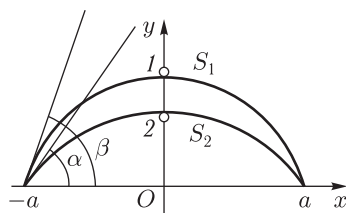


Рис. 7.19

7.122. Два цилиндра $((x + r_0)^2 + y^2 = r_0^2)$ и $((x - r_0)^2 + y^2 = r_0^2)$ касаются по образующей внешним образом. Найти напряженность поля в точках $z_1 = 2r_0i$ и $z_2 = 3r_0$.

7.123. Найти поле полосы, сечение которой есть отрезок $-a \leq x \leq a$; вычислить также напряженность поля в точках $\pm 2a$ и $\pm ai$.

7.124. Сечение проводника — эллипс $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1\right)$. Найти также напряженность поля в точках $\pm 2a$ и $\pm ai$.

7.125. Сечение проводника имеет форму креста — объединение отрезков $(|x| \leq a, y = 0)$ и $(x = 0, |y| \leq a)$. Найти также напряженность поля в точках $z_1 = \frac{a}{2} + i0$ и $z_2 = -2a$.

7.126. Сечение проводника имеет форму креста — объединение отрезков $(|x| \leq a, y = 0)$ и $(x = 0, |y| \leq a)$. Найти также напряженность поля в точках $z_1 = +0 + iy$ и $z_2 = -2a$.

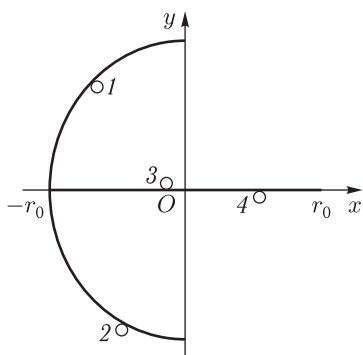


Рис. 7.20

7.127. Сечение проводника — объединение полуокружности $\{r, \varphi: r = r_0, \frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{3\pi}{2}\}$ и диаметра $\{x, y: -r_0 < x < r_0, y = 0\}$ (рис. 7.20). Найти напряженность поля в точках 1, 2, 3, 4.

Пример 7.8. Поперечным сечением полого заземленного цилиндрического проводника является односвязная область Ω_z с границей $\partial\Omega_z$. Внутри проводника расположен заряд ($z_0 = x_0 + iy_0; q$) (рис. 7.21). Найти комплексный потенциал и напряжен-

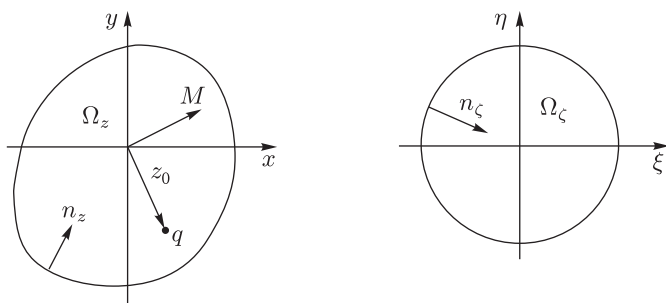


Рис. 7.21

ность электростатического поля в области Ω_z .

При конформном отображении $\zeta = \zeta(z)$ области Ω величина точечного заряда q не меняется. Это следует из инвариантности уравнения Пуассона для электростатического потенциала

$$\Delta v(x, y) = -4\pi q \delta(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0)$$

относительно замены переменных

$$\xi = \xi(x, y), \quad \eta = \eta(x, y), \quad (7.24)$$

которая определяется функцией $\zeta = \xi + i\eta$. Действительно, по формулам дифференцирования сложной функции

$$\begin{aligned} u_{xx} &= u_{\xi\xi}\xi_x^2 + 2u_{\xi\eta}\xi_x\eta_x + u_{\eta\eta}\eta_x^2 + u_{\xi}\xi_{xx} + u_{\eta}\eta_{xx}, \\ u_{yy} &= u_{\xi\xi}\xi_y^2 + 2u_{\xi\eta}\xi_y\eta_y + u_{\eta\eta}\eta_y^2 + u_{\xi}\xi_{yy} + u_{\eta}\eta_{yy}. \end{aligned}$$

Так как $\xi_x^2 + \xi_y^2 = |\nabla\xi|^2 = |\xi_x + i\xi_y|^2 = |\xi_x - i\eta_x|^2 = |\zeta'(z)|^2$ и (аналогично) $\eta_x^2 + \eta_y^2 = |\zeta'(z)|^2$, $\xi_x\eta_x + \xi_y\eta_y = 0$ (пример 7.1), $\xi_{xx} + \xi_{yy} = 0$, $\eta_{xx} + \eta_{yy} = 0$ (вещественная и мнимая части аналитической функции — гармонические функции), то преобразованное уравнение запишется в виде

$$|\zeta'(z)|^2 \Delta U(\xi, \eta) = -4\pi q \delta(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0),$$

где $U(\xi, \eta) = u(x, y)$, $x = x(\xi, \eta)$, $y = y(\xi, \eta)$. По правилу замены переменных в обобщенной функции (10.36)

$$\delta(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0) = \frac{1}{\left| \frac{D(\xi, \eta)}{D(x, y)} \right|} \delta(\xi - \xi_0) \cdot \delta(\eta - \eta_0),$$

где $\xi_0 = \xi(x_0, y_0)$, $\eta_0 = \eta(x_0, y_0)$. Функции $\xi(x, y)$ и $\eta(x, y)$ удовлетворяют условиям Коши–Римана, поэтому

$$|\zeta'(z)|^2 = \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{D(\xi, \eta)}{D(x, y)}.$$

Следовательно, уравнение Пуассона преобразуется к виду

$$\Delta U(\xi, \eta) = -4\pi q \delta(\xi - \xi_0) \cdot \delta(\eta - \eta_0),$$

что доказывает инвариантность заряда при конформном отображении.

Пусть функция $\zeta = \zeta(z, z_0)$ конформно отображает область Ω на круг $|\zeta| < 1$, а точку $z_0 = x_0 + iy_0$ переводит в его центр. Согласно формуле (7.21) и вследствие инвариантности заряда комплексный потенциал

$$w(z) = 2qi \ln \frac{1}{\zeta(z, z_0)} + C, \quad (7.25)$$

а напряженность поля рассчитывается по формуле (7.23).

Применение полученного результата. Поперечное сечение проводника — область $\{r, \varphi: 0 < r, -\alpha < \varphi < \alpha, 0 < \alpha < \pi\}$, заряд $(z_0; q)$ находится в точке $z_0 = r_0 e^{i\varphi_0}$, $\alpha < \varphi_0 < 2\pi - \alpha$. Определить напряженность поля на части $S_1 = \{r, \varphi: 0 < r, \varphi = \alpha\}$ границы проводника.

Отображение угла $|\varphi| > \alpha$ на единичный круг, центр которого — образ точки $z_0 = r_0 e^{i\varphi_0}$, осуществляется композицией отображений:

$$z_1 = z e^{-i\alpha} \longrightarrow z_2 = z_1^{\frac{\pi}{2(\pi-\alpha)}} \longrightarrow \zeta = \frac{z_1^k - r_0^k e^{ik(\varphi_0-\alpha)}}{z_1^k - r_0^k e^{-ik(\varphi_0-\alpha)}},$$

$$k = \frac{\pi}{2(\pi-\alpha)}, \quad z_2(1) = 1,$$

откуда

$$\frac{\zeta'}{\zeta} = \frac{2kr_0^k \sin k(\varphi_0 - \alpha) z_1^{k-1} i e^{-i\alpha}}{z_1^{2k} - 2r_0^k z_1^k \cos k(\varphi_0 - \alpha) + r_0^{2k}}.$$

Если $z \in S_1$, то есть $z = r e^{i\alpha}$, то

$$E(re^{i\alpha}) = \frac{4qkr_0^k r^{k-1} \sin k(\varphi_0 - \alpha) e^{i(\alpha - \frac{\pi}{2})}}{r^{2k} - 2r_0^k r^k \cos k(\varphi_0 - \alpha) + r_0^{2k}}.$$

В задачах 7.128–7.140 определить электрическое поле в указанных точках, обусловленное зарядом $(z_0; q)$ и заземленным цилиндрическим проводником с заданным сечением (поперечным); d и h — вещественные числа.

7.128. Внутри полого цилиндра $(x^2 + y^2 = r_0^2)$ помещен заряд $(d; q)$, $|d| < r_0$, $\text{Im } d = 0$. Определить поле внутри цилиндра, а также на его внутренней поверхности и в точках $z_1 = r_0$, $z_2 = -r_0$ этой поверхности.

7.129. Внутри полого проводника, сечение которого — полукруг $\{x, y: x^2 + y^2 \leq r_0, 0 \leq y\}$ находится заряд $(hi; q)$. Найти поле на внутренней поверхности проводника.

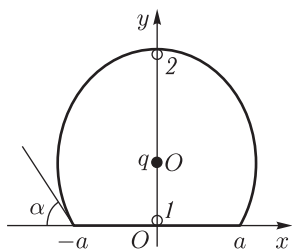


Рис. 7.22

7.130. Внутри полого проводника, сечение которого — часть круга с центром т. O (рис. 7.22), расположен заряд $(0; q)$. Вычислить напряженность поля в точках 1 и 2 внутренней поверхности проводника.

7.131. Сечение полого проводника — лунка (рис. 7.18), внутри которой находится заряд $(0; q)$. Найти напряженность поля в точках 1 и 2 внутренней поверхности проводника.

7.132. Сечение проводника — внешность полосы $\{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y < H\}$, внутри которой находится заряд $(ih; q)$. Найти поле в полосе, а также в точках $z_1 = x$ и $z_2 = x + iH$.

7.133. В пространстве между цилиндрами (рис. 7.2) расположен заряд $(d; q)$, $2r_1 < d < 2r_2$. Найти напряженность поля в точках $z_1 = 2r_1$ и $z_2 = 2r_2$.

7.134. Сечение проводника — полуплоскость $\{x, y: -\infty < x < \infty, y < 0\}$, заряд помещен в точку ih . Определить поле этой системы зарядов, а также поле в точках $z_1 = \frac{ih}{2}$, $z_2 = 2ih$, $z_3 = x$, $z_4 = x + ih$.

7.135. Какова напряженность поля на части границы $S_2 = \{r, \varphi: 0 < r, \varphi = -\alpha\}$ проводника из примера 7.8?

7.136. Сечение проводника $\{r, \varphi: 0 < r, \frac{\pi}{2} < \varphi < 2\pi\}$, заряд находится в точке $r_0 e^{i\varphi_0}$, $0 < \varphi_0 < \frac{\pi}{2}$. Определить напряженность поля вне проводника, а также в точках $z_1 = x, x > 0$, и $z_2 = iy, y > 0$.

7.137. Сечение проводника $\{x, y: 0 < x, y < 0\}$, заряд находится в точке ih . Определить напряженность поля в двух точках: $z_1 = h$, $z_2 = -h$.

7.138. Сечение проводника — объединение полуплоскости $\{x, y: -\infty < x < \infty, y < 0\}$ и полукруга $\{r, \varphi: r \leq r_0, 0 \leq \varphi \leq \pi\}$, заряд расположен в точке ih , $h > r_0$. Определить поле на границе проводника.

7.139. Сечение проводника — полуплоскость $\{x, y: -\infty < x < \infty, y < 0\}$ без полукруга $\{r, \varphi: r \leq r_0, \pi \leq \varphi \leq 2\pi\}$, заряд находится в точке $z_0 = 0$. Найти напряженность поля на границе проводника.

7.140. Сечение проводника — объединение полуплоскости $\{x, y: -\infty < x < \infty, y < 0\}$ и полуэллипса $\{x, y: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} < 1, 0 < y\}$, заряд расположен в точке (ih) , $h > b$. Определить напряженность поля в точках $z_1 = -a$ и $z_2 = bi$.

Пример 7.9. 1. Параллельно проводящей заземленной цилиндрической поверхности S расположен заряд $(z_0; q)$. Поперечное сечение поверхности плоскостью xOy — линия $S_z = \partial\Omega_z$, где Ω_z — область, содержащая точки $z = \infty$ и z_0 . Определить поле $E(z)$ этой системы зарядов.

2. В частном случае (S_z — полуокружность $\{r, \varphi: r = r_0, 0 \leq \varphi \leq \pi\}$, заряд $(ih; q)$, $h < r_0$) найти напряженность поля на внутренней (по отношению к оси) части S_1 поверхности S .

1. Решение задачи сводится к построению конформного отображения $\zeta = \zeta(z, z_0)$, преобразующего область Ω_z комплексной плоскости (z) в единичный круг Ω_ζ комплексной плоскости (ζ), а точку z_0 — в $\zeta(z_0, z_0) = 0$ — центр круга; при этом линия S_z (двубережный разрез) отобразится на окружность S_ζ единичного радиуса. Действительно, функция $\zeta(x, y) = x(\xi, \eta) + iy(\xi, \eta)$ определяет взаимно однозначную замену переменных $x = x(\xi, \eta)$, $y = y(\xi, \eta)$, в результате которой

$$w(z) = u(x(\xi, \eta)) + iv(y(\xi, \eta)) = U(\xi, \eta) + iV(\xi, \eta).$$

Если $(x, y) \in S_z$, то $(\xi, \eta) \in S_\zeta$, следовательно,

$$V(\xi, \eta)|_{S_\zeta} = u(x, y)|_{S_z},$$

т.е. при конформном отображении скалярный потенциал остается постоянным. Возникает ситуация, рассмотренная в примере 7.7: в переменных ξ, η поле заряда q аксиально симметрично и определяется формулой (7.18), где $N = 4\pi q$, а потенциал равномерно заряженной окружности в ограниченном ею круге постоянен (см. (7.19)). Сумма этих двух потенциалов равна потенциалу исходной системы зарядов:

$$w(z) = 2iq \ln \frac{1}{\zeta(z, z_0)} + C.$$

Поле выражается через функцию ζ посредством (7.23).

2. Конформное отображение Ω_z на Ω_ζ — композиция отображений (см. замечание 1 в примере 7.7):

$$z_1 = \frac{r_0 + z}{r_0 - z} \Rightarrow z_2 = -iz_1 \Rightarrow z_3 = \sqrt{z_2}, \text{ где}$$

$$0 < \arg z_2 < 2\pi \Rightarrow \zeta = \frac{z_3 - z_3(ih)}{z_3 - \overline{z_3(ih)}},$$

$$z_1(ih) = \frac{r_0 + ih}{r_0 - ih} = \frac{1 + i \operatorname{tg} \alpha}{1 - i \operatorname{tg} \alpha} = e^{2i\alpha},$$

где $\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{r_0}$; так как $h < r_0$, то $\alpha \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}\right)$; $z_2(ih) = -ie^{2i\alpha} = e^{i\left(2\alpha + \frac{3\pi}{4}\right)}$ в соответствии с выбором $\arg z_2$; $z_3(ih) = e^{i\left(\alpha + \frac{3\pi}{4}\right)}$.

Таким образом,

$$\zeta = \frac{\sqrt{z_2} - e^{i(\alpha + \frac{3\pi}{4})}}{\sqrt{z_2} - e^{-i(\alpha + \frac{3\pi}{4})}}, \quad \frac{\zeta'}{\zeta} = \frac{2i \sin(\alpha + \frac{3\pi}{4})}{z_2 - 2\sqrt{z_2} \cos(\alpha + \frac{3\pi}{4}) + 1} \cdot \frac{-i}{2\sqrt{z_2}} \cdot \frac{2r_0}{(r_0 - z)^2}.$$

Если $z(\varphi) = r_0 e^{i\varphi} \in S_1$, то $z_1(\varphi) = \frac{1 + e^{i\varphi}}{1 - e^{i\varphi}} = i \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}$, $z_2(\varphi) = \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} > 0$, $z_3(\varphi) = \sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}}$. Итак,

$$\left. \frac{\zeta'}{\zeta} \right|_{z(\varphi)} = \frac{2 \sin(\alpha + \frac{3\pi}{4}) r_0}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} - 2\sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}} \cos(\alpha + \frac{3\pi}{4}) + 1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}}} \cdot \frac{1}{(-1)r_0^2 4 \sin^2 \frac{\varphi}{2} e^{i\varphi}},$$

$$E|_{S_1} = \frac{q \sin(\alpha + \frac{3\pi}{4}) e^{i(\pi + \varphi)}}{r_0 \left(\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} - 2\sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}} \cos(\alpha + \frac{3\pi}{4}) + 1 \right) \sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}} \sin^2 \frac{\varphi}{2}},$$

где $\sin(\alpha + \frac{3\pi}{4}) = \frac{-h + r_0}{\sqrt{2(h^2 + r_0^2)}} > 0$, $\cos(\alpha + \frac{3\pi}{4}) = -\frac{r_0 + h}{\sqrt{2(h^2 + r_0^2)}}$.

Поле $E|_{S_1}$ направлено по нормали к S_1 ; направление и знак поля соответствуют свойствам проводника.

В задачах 7.141–7.157 вычислить в указанных точках напряженность $E(z)$ электрического поля проводящей заземленной цилиндрической поверхности с заданным сечением (поперечным) и параллельного ей заряда $(z_0; q)$.

7.141. Вне цилиндра $(x^2 + y^2 = r_0^2)$ расположен заряд $(d; q)$. Найти также напряженность поля в точках $z = r_0 e^{i\varphi}$, в точках $z = x$ и построить график функции $E = E(x)$.

7.142. Сечение проводника — полукруг $\{r, \varphi: r \leq r_0, 0 \leq \varphi \leq \pi\}$, вне проводника расположен заряд $(-ir_0; q)$. Вычислить напряженность поля в точках $z_1 = 0$ и $z_2 = ir_0$.

7.143. Вне проводника, сечение которого изображено на рис. 7.22, находится заряд $(-ia \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}; q)$. Найти напряженность поля в точках 1 и 2 внешней поверхности.

7.144. Сечение полого проводника — лунка (рис. 7.18). Вне проводника находится заряд $(ih; q)$. Найти напряженность поля в точках 1 и 2 внешней поверхности проводника.

7.145. Сечение проводника — лунка, ограниченная дугами S_1 и S_2 окружностей (рис.7.19). Вне проводника расположен заряд $(ih; q)$. Определить напряженность поля в точках 1 и 2.

7.146. Решить предыдущую задачу, если дан заряд $(d; q)$.

7.147. Между параллельными плоскостями, сечения которых — прямые $S_1 = \{x, y: -\infty < x < \infty, y = 0\}$ и $S_2 = \{x, y: -\infty < x < \infty, y = H\}$, расположен заряд $(ih; q)$, $0 < h < H$. Найти напряженность поля в точках, принадлежащих S_1 и S_2 .

7.148. Два проводящих цилиндра $((x + r_1)^2 + y^2 = r_1^2)$ и $((x - r_2)^2 + y^2 = r_2^2)$, $r_1 < r_2$, касаются внешним образом по образующей, параллельно которой расположен заряд $(d; q)$, $d > 2r_2$. Найти напряженность поля в точках: 1) $z_1 = -r_1(1 + i)$, $z_2 = r_2(1 + i)$, $z_3 = -2r_1$, если $z_0 = d$, $|d| > 2r_2$; 2) $z_1 = r_1(i - 1)$, $z_2 = r_2(1 - i)$, $z_3 = 2r_2$, если $z_0 = ih$, $h \neq 0$.

7.149. Параллельно полосе $\{x, y: -a < x < a, y = 0\}$ расположен заряд: 1) $(d; q)$, $|d| > a$; 2) $(ih; q)$, $h \neq 0$. Вычислить напряженность поля в точках $z_{1,2} = 0 \pm i0$.

7.150. Решить предыдущую задачу, если дан заряд $(ae^{i\varphi_0}; q)$, где $0 < \varphi_0 < \pi$.

7.151. Сечение проводника $S = \{x, y: 0 < x < \infty, y = 0\}$, вне проводника находится заряд $(ih; q)$. Найти поле $E(z)$, а также напряженность поля в точках $z_{1,2} = x \pm i0$, $x > 0$.

7.152. Найти напряженность поля в точках внутренней (относительно оси) поверхности проводника из п. 2 примера 7.9.

7.153. Определить напряженность поля в точках внутренней S_1 и внешней S_2 (относительно оси) поверхностей проводника из п. 2 примера 7.9, если дан заряд $(hi; q)$, $h > r_0$.

7.154. Найти напряженность поля в точках внутренней S_1 и внешней S_2 (относительно оси) поверхностей проводника из п. 2 примера 7.9, если дан заряд $(d; q)$ где: 1) $|d| > r_0$, 2) $|d| < r_0$, $\text{Im } d = 0$.

7.155. Параллельно эллиптическому цилиндру $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1\right)$ расположен заряд $(d; q)$, $|d| > a$. Определить напряженность поля в точках $z_1 = -a$ и $z_2 = bi$.

7.156. Вне эллиптического цилиндра $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1\right)$ находится заряд $(ih; q)$. Какова напряженность поля в точках $z_1 = a$ и $z_2 = -bi$?

7.157. Параллельно проводнику, поперечное сечение которого есть объединение отрезков $(|x| \leq a, y = 0)$ и $(x = 0, |y| \leq a)$, расположен заряд $(d; q)$, $d > a$. Найти поле $E(z)$. Вычислить также напряженность поля в четырех точках: $z_1 = x + i0$, $0 < x < a$, $z_2 = x + i0$, $-a < x < 0$, $z_{3,4} = \pm 0 + iy$, $0 < y < a$.

Пример 7.10. 1. Определить плотность заряда на проводящей цилиндрической поверхности, заряд единицы длины (вдоль оси) которой равен q ; поперечное сечение поверхности — кусочно-гладкая линия $S = \partial\Omega$, где Ω — односвязная область в расширенной комплексной плоскости, содержащая точку $z = \infty$.

Комплексный потенциал поля определяется формулой (7.22) (пример 7.7); плотность заряда рассчитывается по формуле (7.10), где $E = -i w'$, так что

$$\sigma = \frac{q}{2\pi} \operatorname{Re} \left(\frac{\bar{\zeta}'}{\zeta} \bar{n}_z \right) \Big|_{\partial\Omega}.$$

Функция $\zeta = \zeta(z)$ отображает $\partial\Omega$ в окружность $|\zeta| = 1$. Единичные векторы внешних нормалей n_z к $\partial\Omega$ и n_ζ к окружности связаны соотношением (7.11), которое принимает вид

$$n_z = \frac{|\zeta'|}{\zeta'} \zeta \Big|_{\partial\Omega}.$$

Таким образом, плотность заряда на проводнике

$$\sigma = \frac{q}{2\pi} |\zeta'| \Big|_{\partial\Omega}. \quad (7.26)$$

2. Найти плотность заряда на плоской части поверхности проводника, поперечное сечение которого — часть круга (рис.7.22).

Конформное отображение $\zeta = \zeta(z)$ области Ω — внешности поперечного сечения проводника — на внешность единичного круга формируется следующими действиями:

$$z_1 = \lambda \frac{a+z}{a-z}, \quad \lambda > 0 \text{ переводит } \Omega \text{ в } \Omega_1 = (\alpha < \arg z_1 < 2\pi),$$

$$z_2 = z_1 e^{-i(\pi-\alpha)} \text{ отображает } \Omega_1 \text{ в } \Omega_2 = (0 < \arg z_2 < \pi + \alpha),$$

$$z_3 = z_2^\beta, \quad \beta = \frac{\pi}{\pi + \alpha} \text{ преобразует } \Omega_2 \text{ в полуплоскость } \operatorname{Im} z_3 > 0.$$

При выполнении этих действий

$$z = \infty \implies z_1(\infty) = -\lambda \implies z_2(\infty) = \lambda e^{i\alpha} \implies z_3(\infty) = \lambda^\beta e^{i\gamma}, \quad \gamma = \alpha\beta.$$

Следовательно,

$$\zeta(z) = \frac{z_2^\beta - \lambda^\beta e^{-i\gamma}}{z_2^\beta - \lambda^\beta e^{i\gamma}} \implies \zeta'(z) = \frac{4\lambda^{\beta+1}\beta a \sin \gamma z_2^{\beta-1} e^{-i(\pi-\alpha)}}{(z_2^\beta - \lambda^\beta e^{i\gamma})^2 (a-z)^2}$$

Если $z = x \in (-a; a)$, то $z_1(x) = \lambda p(z)$, $p(x) = \frac{a+x}{a-x} > 0$, стало быть,

$$\begin{aligned} |\zeta'(x)| &= \frac{4\lambda^{2\beta}\beta a \sin \gamma p^{\beta-1}}{(z_2(x)^\beta - \lambda^\beta e^{i\gamma})(\bar{z}_2(x)^\beta - \lambda^\beta e^{-i\gamma})(a-x)^2} = \\ &= \frac{4\beta a \sin \gamma p^{\beta-1}}{(p^{2\beta} - 2p^\beta \cos \pi\beta + 1)(a-x)^2}. \end{aligned}$$

Формула (7.26) определяет плотность заряда

$$\sigma(x) = \frac{2qa \sin \gamma}{(\pi + \alpha)(a^2 - x^2) \left[\left(\frac{a+x}{a-x} \right)^\beta + \left(\frac{a-x}{a+x} \right)^\beta - 2 \cos \pi\beta \right]}.$$

З а м е ч а н и е. В частном случае круглого полого цилиндра ($r \leq r_0$) плотность заряда, индуцированного линейным зарядом $(0; q)$, определяется формулой 7.26, в которой $\zeta = z$:

$$\sigma = -\frac{q}{2\pi r_0}.$$

Следовательно: 1) заряд распределен равномерно по поверхности; 2) полный индуцированный заряд на единице длины (вдоль оси) цилиндра равен $-q$.

В задачах 7.158–7.169 определить плотность заряда на заземленном цилиндрическом проводнике с заданным сечением (поперечным), заряд единицы длины (вдоль оси) которого равен q .

7.158. Сечение проводника — полукруг $\{r, \varphi: r < r_0, 0 < \varphi < \pi\}$.

7.159. Сечение проводника — часть круга (рис. 7.22). Найти плотность заряда на поверхности $r = r_0$.

7.160. Сечение проводника — пересечение двух одинаковых окружностей (рис. 7.17). Определить плотность заряда на части поверхности S_1 , которой принадлежит точка I .

7.161. Сечение проводника — лунка, ограниченная дугами S_1 и S_2 окружностей (рис. 7.19).

7.162. Два неограниченных цилиндра с одинаковыми радиусами $r_1 = r_2 = r_0$ касаются по образующей внешним образом.

7.163. Решить предыдущую задачу для цилиндров, радиусы которых r_1 и r_2 .

7.164. Сечение проводника — эллипс с полуосями a и b ($a > b$).

7.165. Сечение проводника — отрезок $[-a; a]$.

7.166. Определить плотности заряда σ_1 и σ_2 соответственно на вогнутой и выпуклой сторонах поверхности полого проводящего цилиндра со щелью ($r = r_0$, $\alpha < \varphi < 2\pi - \alpha$, $0 < \alpha < \pi$).

7.167. Сечение цилиндрического проводника — объединение отрезков ($|x| \leq a$, $y = 0$) и ($x = 0$, $|y| \leq a$).

7.168. Сечение цилиндрического проводника — объединение отрезков ($|x| \leq a$, $y = 0$) и ($x = 0$, $0 \leq y \leq a$).

7.169. Сечение проводника имеет форму креста — объединение отрезков ($|x| \leq a$, $y = 0$) и ($x = 0$, $-\sqrt{2}a \leq y \leq \sqrt{3}a$).

Пример 7.11. Поперечным сечением полого заземленного цилиндрического проводника является односвязная область Ω_z с границей $\partial\Omega_z$. Внутри проводника расположен заряд ($z_0 = x_0 + iy_0; q$), (рис. 7.21). Найти плотность заряда на проводнике.

Комплексный потенциал получен в примере 7.8 и имеет вид (7.25), плотность заряда на поверхности проводника вычисляется по формуле (7.10), в которой (см. (7.7), (7.25))

$$E_n|_{\partial\Omega} = \operatorname{Re} (E\bar{n}_z)|_{\partial\Omega} = 2q\operatorname{Re} \left(\frac{\bar{\zeta}'}{\zeta} \bar{n}_z \right) \Big|_{\partial\Omega}.$$

Единичный вектор n_z внутренней нормали к $\partial\Omega$ и единичный вектор n_ζ нормали к образу Ω в соответствующей точке связаны соотношением (7.11). В данном случае (рис. 7.1.)

$$n_\zeta = - \frac{\zeta}{|\zeta|} \Big|_{\partial\Omega},$$

поэтому

$$n_z = \left(-\frac{\zeta}{|\zeta|} \frac{|\zeta'|}{\zeta'} \right) \Big|_{\partial\Omega} = \left(-\frac{\zeta}{\zeta'} |\zeta'| \right) \Big|_{\partial\Omega}.$$

В результате

$$\sigma = - \frac{q}{2\pi} |\zeta'| \Big|_{\partial\Omega}. \quad (7.27)$$

Частный случай: найти плотность заряда на проводящей заземленной плоскости с цилиндрической впадиной (рис. 7.10),

индуцированного нитью, координаты которой $x_0 = 0$, $y_0 = h > -r_0$. Построение функции $\zeta(z, z_0)$ для области Ω , изображенной на рис. 7.10, состоит из следующих этапов. Дробно-линейное отображение

$$z_1 = \lambda \frac{z - r_0}{z + r_0}, \quad \lambda > 0,$$

переводит область Ω в угол $\left(0 < \arg z_1 < \frac{3\pi}{2}\right)$, а точку $z_0 = ih$ — в $z_{10} = \lambda e^{i\alpha}$, $\alpha = 2 \arctg \frac{h}{r_0}$. Степенная функция $z_2 = \sqrt[3]{z_1^2}$, (ее однозначная ветвь выделена условием $0 < \arg z_1 < 2\pi$), преобразует угол в полуплоскость $\text{Im } z_2 > 0$, а точку z_{10} — в точку $z_{20} = \lambda^{\frac{2}{3}} e^{\frac{2i\alpha}{3}}$. Дробно-линейная функция

$$\zeta = \frac{z_2 - z_{20}}{z_2 - \bar{z}_{20}}$$

преобразует полуплоскость $\text{Im } z_2$ в единичный круг, а точку z_{20} в его центр. Определение плотности заряда по формуле (7.27) сводится к вычислению модуля производной

$$\frac{d\zeta}{dz} = e^{i\beta} \frac{z_2 - \bar{z}_{20}}{(z_2 - \bar{z}_{20})^2} \frac{dz_2}{dz} = \frac{8e^{i\beta} \lambda^{\frac{5}{3}} r_0 i \sin \frac{2\alpha}{3}}{3z_1^{\frac{1}{3}} (z_2 - \bar{z}_{20})^2 (z + r_0)^2}$$

в точках $\partial\Omega$. В этом случае $z = r_0 e^{i\varphi}$, $\pi < \varphi < 2\pi$, следовательно,

$$z - r_0 = 2ir_0 e^{\frac{i\varphi}{2}} \sin \frac{\varphi}{2}, \quad z + r_0 = 2r_0 e^{\frac{i\varphi}{2}} \cos \frac{\varphi}{2}$$

и (в соответствии с выбранной ветвью) $z_2 = -\lambda^{\frac{2}{3}} \left| \text{tg} \frac{\varphi}{2} \right|^{\frac{2}{3}}$. В итоге

$$\sigma(\varphi) = \frac{2q \sin \frac{2\alpha}{3}}{3\pi r_0 \sin \varphi \left[\left(\text{tg}^2 \frac{\varphi}{2} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(\text{ctg}^2 \frac{\varphi}{2} \right)^{\frac{1}{3}} + 2 \cos \frac{2\alpha}{3} \right]}.$$

Плотность заряда на остальной части проводника вычисляется аналогично (см. задачу 7.182).

В задачах 7.170–7.185 определить плотность заряда, индуцированного на заземленном цилиндрическом проводнике линейным зарядом ($z_0; q$), параллельным оси проводника.

7.170. Параллельно плоскости $y = 0$ расположен заряд $(ih; q)$.

7.171. Заряд (ih, q) находится между плоскостями $y = 0$ и $y = H$.

7.172. Внутри двугранного угла ($0 < r$, $0 < \varphi < \alpha < 2\pi$) расположен заряд ($r_0 e^{i\varphi_0}; q$).

7.173. Внутри полого цилиндра, радиус которого r_0 , помещен заряд ($d; q$), $\text{Im } d = 0$.

7.174. Внутри полого цилиндрического проводника, сечением которого является полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), находится заряд ($r = h$, $\varphi = \frac{\pi}{2}; q$).

7.175. Сечение полого проводника — пересечение двух одинаковых кругов, центры которых $O_1(0; -a)$ и $O_2(0; a)$, а длина общей хорды $2a$. Параллельно оси проводника расположен заряд ($x = d$, $y = 0; q$), где $|d| < a$.

7.176. Решить предыдущую задачу, если дан заряд ($x = 0$, $y = h; q$), где $|h| < a(\sqrt{2} - 1)$.

7.177. Параллельно плоскости ($y = 0$) с цилиндрическим выступом ($x^2 + y^2 = r_0^2$, $y > 0$) расположен заряд (ih, q), $h > r_0$.

7.178. Параллельно полуплоскостям ($x < -a$, $y = 0$) и ($x > a$, $y = 0$) расположен заряд ($x_0 + iy_0; q$), где: 1) $x_0 = d \in (-a, a)$, $y_0 = 0$; 2) $x_0 = 0$, $y_0 = h > 0$.

7.179. Решить предыдущую задачу, если координаты заряда $x = 0$, $y = d$, где: 1) $|d| < a(\sqrt{2} - 1)$; 2) $|d| > a(\sqrt{2} - 1)$.

7.180. Параллельно плоскости ($y = 0$) и перпендикулярной к ней полуплоскости ($x = 0$, $y > H > 0$) расположен заряд (ih, q), где $0 < h < H$.

7.181. Плоскость $y = 0$ имеет тонкое ребро ($x = 0$, $0 \leq y < H$) и находится в поле заряда ($x = 0$, $y = h > H; q$).

7.182. Параллельно плоскости ($y = 0$) с цилиндрической впадиной расположен заряд ($ih; q$), $h > -r_0$. Определить плотность заряда на плоскости (см. пример 7.11).

7.183. Заряд ($0; q$) расположен параллельно экранам, имеющим форму гиперболических цилиндров ($x^2 - y^2 = 1$).

7.184. Параллельно поверхности, имеющей форму гиперболического цилиндра ($x^2 - y^2 = 1$, $1 \leq x$), расположен заряд ($z_0; q$), где: 1) $z_0 = d > 1$; 2) $z_0 = -\sqrt{2}$.

7.185. Заряд ($z_0; q$) расположен параллельно поверхности ($y^2 = 2px$, $p > 0$): 1) $z_0 = -d$, $d > 0$; 2) $z_0 = p/2$.

Пример 7.12. Параллельно проводящей заземленной цилиндрической поверхности расположен заряд $(z_0; q)$. Поперечное сечение проводника плоскостью xOy — ограниченная линия $S = \partial\Omega$, где Ω — область, которой принадлежат точки z_0 и $z = \infty$ (рис. 7.23, а). Определить плотность заряда, индуцированного на проводнике.

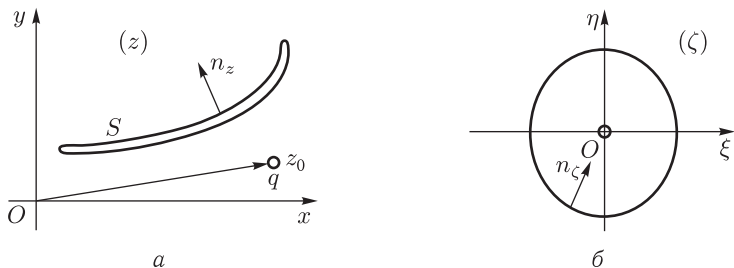


Рис. 7.23

Конформное отображение $\zeta = \zeta(z, z_0)$ области Ω на единичный круг, центр которого — образ точки z_0 (рис. 7.23, б), решает задачу. Действительно, поле в круге аксиально симметрично, так как потенциал окружности постоянен (он равен нулю), а заряд q находится в центре. Следовательно, применима формула (7.25), согласно которой комплексный потенциал поля

$$w(z) = 2qi \ln \frac{1}{\zeta(z, z_0)} + C, \quad \zeta(z_0, z_0) = 0.$$

Последующие выкладки аналогичны тем, которые проделаны в примере 7.11. Нормальная составляющая поля в точке $z \in S$

$$E_n|_S = \operatorname{Re} (E \bar{n}_z)|_S = 2q \operatorname{Re} \left(\frac{\bar{\zeta}'}{\zeta} \bar{n}_z \right) \Big|_S.$$

В соответствии с рисунком 7.23, б и с (7.10)

$$n_\zeta = - \frac{\zeta}{|\zeta|} \Big|_{\partial\Omega} \Rightarrow n_z = \left(- \frac{\zeta}{|\zeta|} \frac{|\zeta'|}{\zeta'} \right) \Big|_{\partial\Omega} = \left(- \frac{\zeta}{\zeta'} |\zeta'| \right) \Big|_{\partial\Omega}.$$

В результате

$$\sigma = - \frac{q}{2\pi} |\zeta'| \Big|_{\partial\Omega}. \quad (7.28)$$

Приложение полученного результата. Проводник, поперечное сечение которого — отрезок $\{x, y: -a \leq x \leq a, y = 0\}$, находится в поле заряда $(ae^{i\varphi_0}; q)$, $\varphi_0 = \frac{\pi}{6}$. Найти плотность заряда

на внешней (относительно заряда q) части $S_2 = \{x, y: -a < x < a, y = -0\}$ поверхности проводника (рис. 7.24, а).

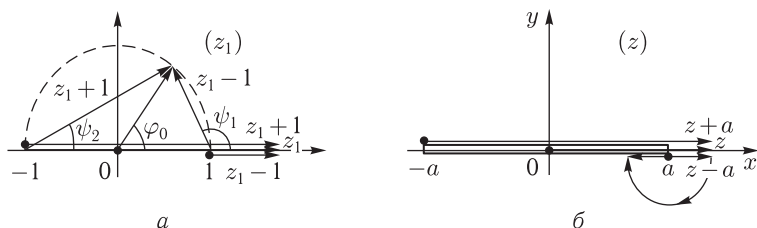


Рис. 7.24

Функция Жуковского $z_2 = \frac{z + \sqrt{z^2 - a^2}}{a}$ отображает область Ω (плоскость (z) с разрезом по отрезку S) в единичный круг $|z_2| = 1$. Следует подчеркнуть, что в области Ω можно выделить однозначную ветвь корня $\sqrt{z^2 - a^2} = \sqrt{(z - a)(z + a)}$. В самом деле, если в некоторой точке $\tilde{z}$ взято одно из двух значений корня, то при движении точки z из $\tilde{z}$ в $\tilde{z}$ по замкнутому контуру $\arg(z - a)$ и $\arg(z + a)$ либо не изменятся (контур не охватывает точки $z = a$ и $z = -a$), либо каждый изменяет аргумент (при одном обходе) на 2π (обход в положительном) или на -2π (обход в отрицательном направлении). В итоге

$$\sqrt{z^2 - a^2} \Rightarrow \sqrt{(\tilde{z}^2 - a^2)e^{4\pi k}} = \sqrt{\tilde{z}^2 - a^2}, k = 0, \pm 1.$$

В данном случае выбор ветви определен условием: при $z^2 - a^2 > 0$ значение корня $\sqrt{z^2 - a^2} > 0$.

Образом точки $z_0 = ae^{i\varphi_0}$ при отображении $z_2 = z_2(z)$ является $z_{20} = z_1 + \sqrt{z_1^2 - 1}$, где $z_1 = e^{i\varphi_0}$. При перемещении точки $z_1 > a$ в положение $e^{i\varphi_0}$ (рис. 7.24, а) векторы $z_1, z_1 - 1, z_1 + 1$, лежащие на оси Ox (последние два вектора для наглядности смещены относительно Ox), получают приращения аргументов, соответственно, $\varphi_0, \psi_1 = \frac{\pi + \varphi_0}{2}, \psi_2 = \frac{\varphi_0}{2}$, так что $\arg(z_1^2 - 1) = \varphi_0 + \frac{\pi}{2} = \frac{2\pi}{3}$. Поэтому

$$z_{20} = e^{i\frac{\pi}{6}} + \sqrt{|e^{\frac{2\pi i}{3}} - 1|} = e^{i\frac{\pi}{6}} + e^{\frac{\pi i}{3}} = 2 \cos \frac{\pi}{12} e^{i\frac{\pi}{4}}.$$

Отображение круга $|z_2| = 1$ в единичный круг, в центр которого переходит точка z_{20} , реализуется дробно-линейной функцией

$$\zeta = \frac{z_2 - z_{20}}{z_2 \bar{z}_{20} - 1} \implies \zeta' = \frac{(|z_{20}|^2 - 1)z_2 \zeta}{(z_2 \bar{z}_{20} - 1)^2 a \sqrt{z^2 - a^2}}.$$

Если $z \in S_2$, то $\sqrt{z^2 - a^2} = \sqrt{|z^2 - a^2|}e^{-i\pi}$, что показано на рис. 7.24, б. При перемещении точки $z = x > a$ на нижний берег $\arg(z + a)$ остается неизменным, а $\arg(z - a)$ получает приращение -2π . Таким образом, $z_2(z)|_{z \in S_2} = \frac{x - i\sqrt{a^2 - x^2}}{a}$, стало быть,

$$|\zeta'|_{S_2} = \frac{|z_2 \bar{z}_{20} - 1| |x - i\sqrt{a^2 - x^2}|}{|z_2 \bar{z}_{20} - 1|^2 a \sqrt{a^2 - x^2}}.$$

Так как $2 \cos \frac{\pi}{12} = 2\sqrt{\frac{1 + \cos \frac{\pi}{6}}{2}} = \sqrt{1 + \sqrt{3}} = \frac{1 + \sqrt{3}}{2}$,

$$\begin{aligned} z \bar{z}_0|_{S_2} &= \frac{x - i\sqrt{a^2 - x^2}}{a} 2 \cos \frac{\pi}{12} \frac{1 - i}{\sqrt{2}} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{a} \cos \frac{\pi}{12} \left(x - \sqrt{a^2 - x^2} - i(\sqrt{a^2 - x^2} + x) \right), \end{aligned}$$

то на S_2

$$|z \bar{z}_0 - 1|^2 = \frac{1 + \sqrt{3}}{a} (\sqrt{3}a - x + \sqrt{a^2 - x^2}).$$

Отсюда по формуле (7.46)

$$\sigma_2(x) = \frac{qa}{2\pi \sqrt{a^2 - x^2} (a\sqrt{3} - x + \sqrt{a^2 - x^2})}.$$

В задачах 7.186–7.198 определить плотность заряда, индуцированного на заземленном цилиндрическом проводнике линейным зарядом $(z_0; q)$, параллельным оси проводника; поперечное сечение проводника плоскостью xOy — ограниченная линия $S = \partial\Omega$, где Ω — область, которой принадлежат точки z_0 и $z = \infty$, d и h — вещественные числа.

7.186. Сечение проводника $S = \{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2\}$, заряд $(d; q)$, где $d > r_0$.

7.187. Сечение проводника $S = \partial\Omega$ где Ω — полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), заряд $(d; q)$, а $|d| > r_0$.

7.188. Решить предыдущую задачу, если вне проводника расположен заряд $(ih; q)$, где: 1) $h > r_0$; 2) $h < 0$.

7.189. Сечение проводника — касающиеся окружности $S_1 = \{x, y: (x + r_0)^2 + y^2 = r_0^2\}$ и $S_2 = \{x, y: (x - r_0)^2 + y^2 = r_0^2\}$, заряд $(ih; q)$, $h \neq 0$.

7.190. Решить предыдущую задачу, если вне проводника расположен заряд $(d; q)$.

7.191. Сечение проводника — пересечение двух одинаковых кругов, центры которых т. $O_1(0; -a)$ и т. $O_2(0; a)$, а длина общей хорды $2a$; вне проводника расположен заряд $(ih; q)$.

7.192. Сечение проводника — отрезок $(-a \leq x \leq a, y = 0)$, его заряд $(z_0; q)$, где: 1) $z_0 = d > a$; 2) $z_0 = ih$, $h > 0$.

7.193. Сечение проводника — эллипс $(x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1)$, заряд $(d; q)$, $|d| > a$.

7.194. Решить предыдущую задачу, если вне проводника расположен заряд $(ih; q)$.

7.195. Сечение проводника — полуокружность $S = \{r, \varphi: r = r_0, 0 \leq \varphi \leq \pi\}$, заряд $(d; q)$, где: 1) $|d| < a$; 2) $|d| > a$. Части двусторонней поверхности: S_1 — выпуклая сторона, S_2 — вогнутая сторона.

7.196. Решить предыдущую задачу, если дан заряд $(ih; q)$ где: 1) $h < r_0$; 2) $h > r_0$.

7.197. Определить плотности заряда σ_1 и σ_2 соответственно на выпуклой и вогнутой сторонах поверхности полого цилиндра со щелью $(r = r_0, \alpha < \varphi < 2\pi - \alpha, 0 < \alpha < \pi)$, заряд $(z_0; q)$, где: 1) $z_0 = 0$; 2) $z_0 = r_0 e^{i\psi}$, $-\alpha < \psi < \alpha$.

7.198. Сечение проводника S — объединение отрезков $(|x| \leq a, y = 0)$ и $(x = 0, |y| \leq a)$, его заряд $(d; q)$, $|d| > a$.

Пример 7.13. Заряд единицы длины (вдоль оси) цилиндрического проводника, поперечное сечение которого — объединение отрезков $(|x| \leq a, y = 0)$ и $(x = 0, -2\sqrt{2}a \leq y \leq \sqrt{3}a)$, равен q . Найти заряд q_1 единицы длины (вдоль оси) части $S_1 = \{x, y: x = +0, 0 < y < a\}$ поверхности проводника.

Из инвариантности заряда при конформном отображении $\zeta = \zeta(z)$ (пример 7.8) следует, что

$$\Delta q(z) = \Delta q(\zeta) \Rightarrow \sigma(z) dz = \sigma(\zeta) d\zeta \Rightarrow \int_{S_z} \sigma(z) dz = \int_{S_\zeta} \sigma(\zeta) d\zeta, \quad (7.29)$$

где S_ζ — образ линии S_z , а $\sigma(z)$ и $\sigma(\zeta)$ — плотности заряда на S_z и S_ζ соответственно. Задача сводится к построению конформного отображения плоскости (z) с разрезом S на внешность единичного круга плоскости (ζ) (величина радиуса несущественна). Так как заряд на проводящем круглом цилиндре распределяется равномерно, то плотность $\sigma(\zeta) = \frac{q}{2\pi r_0}$, $r_0 = 1$. Следовательно, заряд на поверхности S_1

$$q_1 = \frac{q}{2\pi} S_1(\zeta),$$

где $S_1(\zeta)$ — длина дуги, на которую функция $\zeta = \zeta(z)$ отображает линию S_1 .

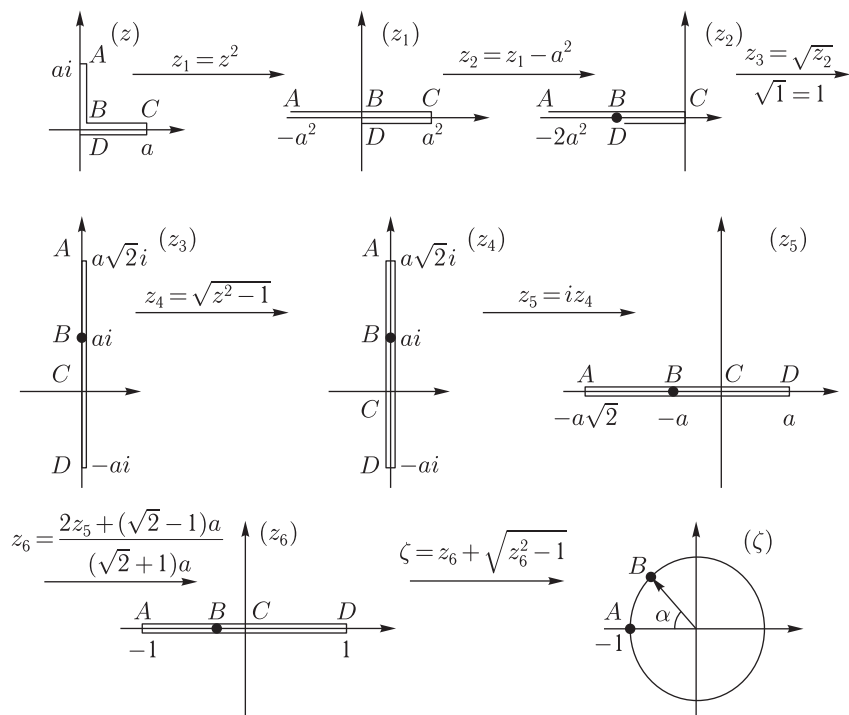


Рис. 7.25.

Последовательность этапов построения конформного отображения $\zeta = \zeta(z)$ приведена на рис. 7.25. Сначала полуплоскость $\operatorname{Re} z \geq 0$, которой принадлежит S^+ (незамкнутая ломаная линия $ABCD$) — часть S , отображается на плоскость (z_1)

с разрезом по линии $ABCD$. После параллельного переноса и извлечения квадратного корня получается полуплоскость $\operatorname{Re} z_3 > 0$, границе которой принадлежит отрезок AD — образ S^+ . Согласно принципу симметрии Римана–Шварца аналитическое продолжение функции $z_3(z)$ через AD на полуплоскость $\operatorname{Re} z_3 < 0$ определяет функцию $z_4(z) = \sqrt{z^2 - a^2}$, которая отображает плоскость (z) с разрезом по линии S на плоскость (z_4) с разрезом (двубережным) по отрезку AD . Затем посредством поворота и линейного отображения получается плоскость z_6 с разрезом по отрезку $[-1; 1]$. Применение функции Жуковского преобразует плоскость (z) с разрезом S на внешность единичного круга $|\zeta| = 1$; при этом выполнено условие $z = \infty \rightarrow \zeta = \infty$ (см. пример 7.7).

Точка $z = ai$ (точка A) отображается в точку $\zeta = -1$, а точка $z = +0 + 0i$ (точка B) отображается (в соответствии с выбранной ветвью) в точку $\zeta = -\frac{3 - \sqrt{2}}{\sqrt{2} + 1} + i\frac{\sqrt{2\sqrt{2} - 2}}{\sqrt{3} - 2}$. При движении точки z от A к B область (внешность S) остается слева, поэтому отрезок AB отображается на дугу α , так что

$$q_1 = \frac{q}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2\sqrt{2} - 2}}{\sqrt{3} - 2}.$$

В задачах 7.199–7.213 определить заряд q_1 единицы длины (вдоль оси) части S_1 поверхности S проводника, заряд единицы длины (вдоль оси) которого равен q ; S, S_1 поперечные сечения.

7.199. Сечение проводника — полукруг, S_1 — плоская часть поверхности.

7.200. Сечение проводника дано на рисунке 7.22, S_1 — плоская часть поверхности.

7.201. Поперечное сечение проводника — лунка, ограниченная окружностями S_1 и S_2 (рис. 7.19); определить заряд части S_1 .

7.202. Сечение проводника полукруг ($x^2 + y^2 = r_0^2, y > 0$) и отрезок ($x = 0, r_0 < y < d$). При каком условии заряд части: 1) ($r = r_0, 0 < \varphi < \pi$), 2) ($0 < r < d, \varphi = 3\pi/2$), равен $q/2$?

7.203. Сечение проводника — полукруг ($x^2 + y^2 = r_0^2, y > 0$) и отрезок ($x = 0, r_0 < y < d$). При каком условии заряд части ($x = 0, r_0 < y < d$) равен $q/2$?

7.204. Сечение проводника — две касающиеся (внешним образом) окружности $S_1 = \{x, y: (x + r_1)^2 + y^2 = r_1^2\}$ и $S_2 = \{x, y: (x - r_2)^2 + y^2 = r_2^2\}$.

7.205. Сечение проводника — две касающиеся (внутренним образом) окружности $S_1 = \{x, y: (x - r_1)^2 + y^2 = r_1^2\}$ и $S_2 = \{x, y: (x - r_2)^2 + y^2 = r_2^2\}$, $r_1 < r_2$; найти заряд на S_1 и S_2 .

7.206. Сечение проводника — отрезок $(-a \leq x \leq a)$, $S_1 = \left(x: \frac{a}{2} \leq x \leq a\right)$.

7.207. Сечение цилиндра со щелью ($r = r_0$, $\alpha < \varphi < 2\pi - \alpha$, $0 < \alpha < \pi$), S_1 — выпуклая сторона.

7.208. Сечение проводника — эллипс $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1\right)$, S_1 — меньшая часть, отсекаемая прямой $x = c$, где $c = \sqrt{a^2 - b^2}$.

7.209. Сечение проводника — эллипс $(x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1)$, где $a > b$, и отрезок: 1) $(a < x < d, y = 0)$; 2) $x = 0, b < y < d)$. При каком значении d заряд эллиптической поверхности окажется равным $q/3$?

7.210. Сечение проводника S — объединение отрезков $(|x| \leq a, y = 0)$ и $(x = 0, |y| \leq a)$, $S_1 = \left\{x, y: \frac{a}{2} < x < a, y = 0\right\}$.

7.211. Найти заряд q_1 на части $S_1 = \{x, y: -a < x < a, y = -0\}$ поверхности проводника из примера 7.13.

7.212. $S = (|x| \leq a, y = 0) \cup (x = 0, -2\sqrt{2}a \leq y \leq \sqrt{3}a)$. Найти заряд следующих частей поверхности S : $S_1 = \{x, y: x = +0, 0 < y < \sqrt{3}a\}$, $S_2 = \{x, y: 0 < x < a, y = +0\}$, $S_3 = \{x, y: 0 < x < a, y = -0\}$, $S_4 = \{x, y: x = +0, -2\sqrt{2}a < y < 0\}$.

7.213. $S = (|x| \leq a, y = 0) \cup (x = 0, -c \leq y \leq \frac{a}{3})$; при каком условии заряд части $S_1 = \{x, y: -a < x < a\}$ равен $q/4$?

Пример 7.14. Параллельно оси заземленного цилиндрического проводника, поперечное сечение которого полукруг $\Omega_z = \{r, \varphi: 0 < r < r_0, 0 < \varphi < \pi\}$, расположен заряд $(d; q)$, $r_0 < d$. Найти заряд q_1 единицы длины (вдоль оси) части S_1 поверхности $S = \partial\Omega_z$, поперечное сечение которой $S_1 = \{r, \varphi: 0 < r < r_0, \varphi = 0\}$.

Если $\zeta = \zeta(z)$ — конформное отображение Ω_z на внешность круга $|\zeta| \leq 1$, центр $\zeta = 0$ которого — образ точки $z_0 = d$, то

на окружности $|\zeta| = 1$ заряд распределяется равномерно (см. замечание в конце примера 7.10). В силу соотношений (7.29) заряд

$$q_1 = -\frac{q}{2\pi} S_{1\zeta},$$

где $S_{1\zeta}$ — длина дуги, на которую отображается S_1 .

Требуемое отображение $\zeta = \zeta(z)$ — композиция отображений

$$z_1 = \lambda \frac{r_0 + z}{r_0 - z}, \lambda > 0, \quad z_2 = -iz_1, \quad z_3 = z_2^{\frac{2}{3}}, \arg z_2 \in [0; 2\pi),$$

при которых $d \rightarrow \lambda^{\frac{2}{3}} d_1^{\frac{2}{3}}$, где $d_1 = \frac{d + r_0}{d - r_0}$. Пояснение: в соответствии с выбранной однозначной ветвью функции $z^{\frac{2}{3}}$ для вычисления ее значений следует представить число z в показательной форме с $\arg z \in [0, 2\pi)$, так что $(-i)^{\frac{2}{3}} = (e^{\frac{3\pi i}{2}})^{\frac{2}{3}} = e^{\pi i} = -1$. Таким образом,

$$\zeta = e^{i\beta} \frac{z_2^{\frac{2}{3}} - \lambda^{\frac{2}{3}} d_1^{\frac{2}{3}} e^{\frac{i\pi}{3}}}{z_2^{\frac{2}{3}} - \lambda^{\frac{2}{3}} d_1^{\frac{2}{3}} e^{-\frac{i\pi}{3}}}.$$

Без ограничения общности можно считать $\beta = 0$ (поворот не влияет на длину линии), тогда

$$\zeta(0) = \frac{1 + d_1^{\frac{2}{3}} e^{\frac{i\pi}{3}}}{1 + d_1^{\frac{2}{3}} e^{-\frac{i\pi}{3}}}, \quad \zeta(r_0) = 1.$$

Согласно правилу обхода образом линии S_1 является дуга окружности $|\zeta| = 1$ с центральным углом

$$\begin{aligned} \alpha = \arg \zeta(0) &= \arg \left(1 + d_1^{\frac{2}{3}} e^{\frac{i\pi}{3}} \right)^2 = \\ &= \arg \left[1 + d_1^{\frac{2}{3}} - \frac{1}{2} d_1^{\frac{4}{3}} + i\sqrt{3} d_1^{\frac{2}{3}} \left(1 + d_1^{\frac{2}{3}} \right) \right]. \end{aligned}$$

Ввиду того, что мнимая часть выражения и квадратных скобках положительна, при любом знаке действительной части

$$\alpha = \operatorname{arccctg} \frac{2 + 2d_1^{\frac{2}{3}} - d_1^{\frac{4}{3}}}{\sqrt{3} d_1^{\frac{2}{3}} (1 + d_1^{\frac{2}{3}})}.$$

Заряд поверхности S_1

$$q_1 = -\frac{q\alpha}{2\pi}.$$

В задачах 7.214–7.240 S — поперечное сечение проводящей заземленной цилиндрической поверхности, параллельно которой расположен заряд $(z_0; q)$. Требуется определить заряд единицы длины (вдоль оси) части поверхности S , поперечное сечение которой S_1 ; h и d — действительные числа.

7.214. $S = \{x, y: -\infty < x < \infty, y = 0\}$, $S_1 = \{x, y: 0 < x < d, y = 0\}$, заряд $(ih; q)$, $0 < h$. При каком значении d заряд на S_1 равен: 1) $\frac{q}{3}$; 2) $\frac{q}{4}$; 3) $\frac{5q}{12}$?

7.215. S — граница $\Omega = \{r, \varphi: 0 < r < \infty, 0 < \varphi < \alpha\}$, $S_1 = \{r, \varphi: 0 < r < d, \varphi = 0\}$, заряд $(r_0 e^{i\varphi_0}; q)$, $0 < \varphi_0 < \alpha$.

7.216. $S = \{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2\}$, $z_0 = d$, где: 1) $|d| < r_0$; 2) $|d| > r_0$, $S_1 = \{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2, x > 0\}$.

7.217. S — граница полукруга $\{r, \varphi: 0 < r < r_0, 0 < \varphi < \pi\}$, S_1 — диаметр $(-r_0; r_0)$, $z_0 = ih$, где: 1) $0 < h < r_0$; 2) $h > r_0$; 3) $h < 0$.

7.218. Решить предыдущую задачу, если $z_0 = d$, $|d| > r_0$.

7.219. S — граница сектора $\{r, \varphi: 0 < r < r_0, 0 < \varphi < \alpha\}$, $S_1 = \{r, \varphi: 0 < r = r_0, 0 < \varphi < \alpha\}$, заряд $\left(de^{\frac{i\alpha}{2}}; q\right)$.

7.220. Решить задачу из примера 7.13 для заряда $(-d; q)$ при условии $|d| > r_0$.

7.221. Сечение проводника дано на рис. 7.22, S_1 — плоская часть поверхности, заряд $(ih; q)$, где: 1) $0 < h < a \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}$; 2) $h > a \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}$; 3) $h < 0$.

7.222. Решить предыдущую задачу для заряда $(d; q)$, где $|d| > a$.

7.223. S — граница области, изображенной на рисунке 7.18, S_1 — часть границы, соответствующая $y > 0$, заряд $(ih; q)$, где: 1) $-a \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} < h < a \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$; 2) $a \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} < h$; 3) $h < -a \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$.

7.224. Линия S (граница лунки) и S_1 изображены на рисунке 7.19, заряд $(ih; q)$, где: 1) $a \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} < h < a \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}$; 2) $a \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} < h$; 3) $h < a \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$.

7.225. Решить предыдущую задачу для заряда $(d; q)$, где: 1) $|d| < a$, $\alpha > 0$; 2) $|d| > a$.

7.226. S — граница полосы $\Omega = \{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y < H\}$, $S_1 = \{x, y: 0 < x < \infty, y = H\}$, заряд $(ih; q)$, $0 < h < H$.

7.227. S и S_1 даны на рисунке 7.2, заряд $(d; q)$, $2r_1 < d < 2r_2$.

7.228. Сечение проводника — область, ограниченная двумя окружностями $S_1 = \{x, y: (x - r_1)^2 + y^2 = r_1^2\}$ и $S_2 = \{x, y: (x + r_2)^2 + y^2 = r_2^2\}$, заряд $(z_0; q)$, где: 1) $z_0 = ih$, $h \neq 0$; 2) $z_0 = d$, $d > 2r_1$; 3) $z_0 = -d$, $d > 2r_1$.

7.229. Сечение проводника — объединение полуплоскости $\{x, y: -\infty < x < \infty, y < 0\}$ и полукруга $\{x, y: x^2 + y^2 < r_0^2, y > 0\}$, $S_1 = \{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2, y > 0\}$, заряд $(ih; q)$, $h > r_0$.

7.230. Сечение проводника — полуполоса $\left\{x, y: 0 < x, -\frac{H}{2} < y < \frac{H}{2}\right\}$, $S_1 = \left\{x, y: x = 0, -\frac{H}{2} < y < \frac{H}{2}\right\}$, заряд $(a; q)$, $a > 0$. При каком условии заряд на S_1 равен $\frac{q}{2}$?

7.231. Сечение проводника — полуплоскость $\{x, y: -\infty < x < \infty, y < 0\}$ без полукруга $\{x, y: x^2 + y^2 < r_0^2, y < 0\}$, $S_1 = \{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2, y < 0\}$, заряд $(ih; q)$, $h > -r_0$.

7.232. Сечение проводника — объединение полуплоскости $\{x, y: -\infty < x < \infty, y < 0\}$ и полуэллипса $\left\{x, y: \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 < 1, y > 0\right\}$, где $a > b$, $S_1 = \left\{x, y: \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1, y > 0\right\}$, заряд $(ih; q)$, $h > b$.

7.233. Сечение проводника — объединение полуплоскости $\{x, y: -\infty < x < \infty, y < 0\}$ и полуэллипса $\left\{x, y: \left(\frac{x}{b}\right)^2 + \left(\frac{y}{a}\right)^2 < 1, y > 0\right\}$, где $a > b$, $S_1 = \left\{x, y: \left(\frac{x}{b}\right)^2 + \left(\frac{y}{a}\right)^2 = 1, y > 0\right\}$, заряд $(ih; q)$, $h > a$.

7.234. Сечение проводника $S = \{x, y: -\infty < x < \infty, y = 0\}$, $S_1 = \{x, y: -\infty < x < \infty, y = +0\}$, заряд $(r_0 e^{i\varphi_0}; q)$.

7.235. Сечение проводника — два луча $S_1 = \{x, y: a < x < \infty, y = 0\}$ и $S_2 = \{x, y: -\infty < x < a, y = 0\}$, заряд $(d; q)$, $-a < d < a$.

7.236. Сечение проводника — отрезок $\{x, y: -a \leq x \leq a, y = 0\}$, $S_1 = \{x, y: 0 \leq x \leq a, y = 0\}$, заряд $(d; q)$, $d > 0$.

7.237. Сечение проводника — отрезок $\{x, y: -a \leq x \leq a, y = 0\}$, $S_1 = \{x, y: -a \leq x \leq a, y = +0\}$, заряд: 1) $(ih; q)$, $h > 0$; 2) $(ae^{\frac{i\pi}{6}}; q)$.

7.238. Сечение проводника $S = \left\{x, y: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1\right\}$, заряд $(z_0; q)$.

1) $z_0 = d > a$, S_1 — половина эллипса, соответствующая $x > 0$;
2) $z_0 = ih$, $h > b$, S_1 — половина эллипса, соответствующая $y > 0$.

7.239. Сечение проводника — полуокружность $= \{r, \varphi: r = r_0, 0 < \varphi < \pi\}$, S_1 — выпуклая сторона, заряд $(z_0; q)$, где: 1) $z_0 = ih$, $h > r_0$; 2) $z_0 = ih$, $h < r_0$; 3) $z_0 = d$, $-r_0 < d < r_0$; 4) $z_0 = d$, $d > r_0$; 5) $z_0 = r_0 e^{i\varphi_0}$, $\pi < \varphi_0 < 2\pi$.

7.240. Сечение полого цилиндра со щелью $S = \{r, \varphi: r = r_0, \alpha < \varphi < 2\pi - \alpha\}$, $0 < \alpha < \pi$, S_1 — выпуклая сторона, заряд $(z_0; q)$, где: 1) $z_0 = d < -r_0$, 2) $z_0 = d > -r_0$; 3) $z_0 = a + ih$, $|h| < r_0 \sin \alpha$; 4) $z_0 = a + ih$, $|h| > r_0 \sin \alpha$; 5) $z_0 = r_0 e^{i\varphi_0}$, $-\alpha < \varphi_0 < \alpha$.

7.241. В слое $\{x, y, z: -\infty < x < \infty, 0 < y < H, -\infty < z < \infty\}$ действует линейный источник тепла, расположенный на прямой $\{x, y, z: x = 0, y = h, -\infty < z < \infty\}$, мощность единицы длины источника q_0 ; температура поверхностей $y = 0$ и $y = l$ равна нулю. При условии стационарности теплового режима найти тепловой поток Q через поверхность $\{x, y, z: 0 < a < x < \infty, y = 0, l_1 < z < l_2\}$.

7.242. Параллельно проводящей цилиндрической поверхности с зарядом q_0 на единицу длины (вдоль оси) расположен заряд $(z_0; q)$. Поперечное сечение поверхности плоскостью xOy — ограниченная линия $L = \partial\Omega$, где Ω — область, которой принадлежат точки $z = \infty$ и $z_0 = x_0 + iy_0$ (след нити на плоскости xOy). Пусть функция $\zeta = \zeta(z)$ конформно отображает Ω на внешность единичного круга при условии $\zeta(\infty) = \infty$. Показать, что комплексный потенциал поля зарядов

$$w(z) = 2qi \ln \frac{\zeta \bar{\zeta}_0 - 1}{\zeta - \zeta_0} + 2(q + q_0)i \ln \frac{1}{\zeta} + C, \quad \zeta_0 = \zeta(z_0).$$

7.243. Внутри полого проводящего цилиндра $(x^2 + y^2 = r_0^2)$, заряд единицы длины (вдоль оси) которого равен q_0 , находится заряд $(d; q)$, $d \in (-r_0; r_0)$. Найти комплексный потенциал внутри и вне цилиндра.

7.244. Вне полого проводящего цилиндра ($x^2 + y^2 = r_0^2$), заряд единицы длины (вдоль оси) которого равен q_0 , расположен заряд $(d; q)$, $d \in (-\infty; -r_0) \cup (r_0; +\infty)$. Найти комплексный потенциал внутри и вне цилиндра.

7.245. Полый проводящий цилиндр ($x^2 + y^2 = r_0^2$), заряд единицы длины (вдоль оси) которого равен q_0 , находится в поле зарядов $(d_1; q_1)$, $d_1 \in (-r_0; r_0)$ и $(d_2; q_2)$, $d_2 \in (-\infty; -r_0) \cup (r_0; +\infty)$. Найти комплексный потенциал внутри и вне цилиндра.

7.246. Проводящий незаземленный цилиндр, радиус которого r_0 , заряд единицы длины q_0 , находится в поле заряда $(d; q)$, $d > r_0$. Найти плотность заряда на поверхности цилиндра.

7.247. Заряд $(z_0; q)$ расположен параллельно проводящей незаземленной полосе, поперечное сечение которой $(-a < x < a, y = 0)$, заряд единицы длины (вдоль оси) q_0 . Определить плотность заряда на полосе, если: 1) $z_0 = d > a$; 2) $z_0 = ih$, $h > 0$.

7.248. Внутри полого проводящего незаземленного цилиндра ($r < r_0$) с зарядом q_0 на единицу длины находится заряд $(d; q)$. Определить плотность заряда σ_- на внутренней и σ_+ на внешней сторонах поверхности цилиндра.

7.249. Параллельно оси проводящего незаземленного эллиптического цилиндра ($x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$), заряд единицы длины которого q_0 , расположен заряд $(ih; q)$, $h > b$. Определить заряд q_1 единицы длины верхней части ($y > 0$) и q_2 — нижней части ($y < 0$) поверхности цилиндра.

7.250. В полупространстве ($y > 0$) параллельно границе $y = 0$ на расстоянии h от нее расположен прямолинейный проводник с током, с единицы длины которого выделяется тепловая мощность q . Температура полупространства не зависит от времени. Какова плотность теплового потока, проходящего через границу, если ее температура постоянна?

7.251. Внутри цилиндра ($r < r_0$) параллельно оси на расстоянии d от нее расположен прямолинейный проводник с током, с единицы длины которого выделяется тепловая мощность q . Температура цилиндра не зависит от времени и постоянна на поверхности $r = r_0$. Определить плотность теплового потока, проходящего через поверхность цилиндра.

Пример 7.15. Обтекание цилиндрической поверхности, параллельно которой расположен линейный источник идеальной

несжимаемой жидкости. Поперечным сечением поверхности плоскостью (z) является кусочно-гладкая линия S , источник ($z_0; q$) представляет собой прямую, с единицы длины которой равномерно по направлениям, перпендикулярным прямой, выделяется постоянное количество жидкости q (обильность источника) и которая пересекает плоскость (z) в точке z_0 . Источник ($z_0; -q$) называется стоком. Требуется найти комплексный потенциал течения в неограниченной области Ω_z , которой принадлежит точка z_0 , а линия S — граница области (рис. 7.26).

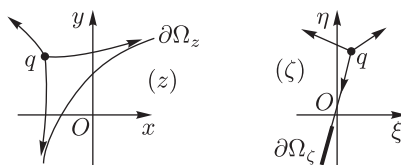


Рис. 7.26

Поле скоростей линейного изотропного источника жидкости выражается формулой (7.17), где $N = q$, $A = V \rho_0 = 1$:

$$V = \frac{q}{2\pi\bar{z}}.$$

Отсюда и из (7.16) следует, что комплексный потенциал

$$w(z) = \frac{q}{2\pi} \ln z + C. \quad (7.30)$$

Чтобы найти комплексный потенциал скоростей жидкости, обтекающей поверхность S , нужно построить аналитическую функцию $\zeta = \zeta(z)$, конформно отображающую область Ω_z на всю плоскость (ζ) так, чтобы $\partial\Omega_z$ отобразилась в разрез, принадлежащий некоторой прямой, на которую отображается также и точка z_0 . При таком отображении образ границы $\partial\Omega_z$, являющейся линией тока на плоскости (z), принадлежит одной из радиальных линий тока источника q на плоскости (ζ) (рис. 7.26.)

Чтобы применить формулу (7.30), необходимо соблюсти условие $\zeta(\infty) = \infty$, что следует из аналитичности функции $w' = \bar{V}$ в любой конечной точке $z \in \Omega_z$, отличной от z_0 ; тогда

$$w(z) = \frac{q}{2\pi} \ln[\zeta(z) - \zeta(z_0)] + C. \quad (7.31)$$

Это решение единственно с точностью до аддитивной постоянной (см. задачу 7.252).

В полуплоскости $y > 0$ находится источник $(hi; q)$; найти комплексный потенциал течения. В данном случае $\zeta = z^2$, так что

$$w(z) = \frac{q}{2\pi} \ln(z^2 + h^2) + C.$$

Другой способ основан на методе изображений: такое же поле скоростей в полуплоскости $y > 0$ создают источник $(hi; q)$ и его зеркальное изображение $(-hi; q)$. Достаточно проверить, что $y = 0$ — линия тока, т. е. скалярное произведение вектора скорости и вектора i равно нулю (см. (7.9) в примере 7.3):

$$\operatorname{Re}(\bar{V}i)|_{y=0} = \operatorname{Re}(w'i)|_{y=0} = \operatorname{Re}\left(\frac{x}{x^2 + y^2}i\right) = 0.$$

Если уравнение (7.15) записать в виде

$$\nabla\left(\frac{|V|^2}{2} + P\right) = 0$$

и проинтегрировать, то получится соотношение

$$\frac{|V|^2}{2} + P = C, \quad C = \left(\frac{|V|^2}{2} + P\right)\Big|_{z=\infty}.$$

Следовательно, давление на S будет

$$P = P_0 + \frac{\rho_0}{2} (|V(\infty)|^2 - |w'(z)|^2), \quad z \in \partial\Omega.$$

7.252. Доказать, что комплексный потенциал (7.31) представляет собой единственное решение (с точностью до аддитивной постоянной) задачи обтекания.

Решить задачи 7.253–7.281 при условии полного обтекания цилиндрической поверхности, поперечное сечение которой плоскостью (z) — кусочно гладкая линия S .

7.253. В полупространстве ($0 < y$) действует источник $(ih; q)$, $h > 0$. Найти скорость жидкости на плоскости $y = 0$.

7.254. Внутри угла $\left(0 < r, \varphi < \frac{\pi}{2}\right)$ расположен источник $(r_0 e^{\frac{i\pi}{4}}; q)$. Найти потенциал скоростей.

7.255. Вне угла $\left(0 < r, \frac{3\pi}{2} < \varphi < 2\pi\right)$ расположен источник $(r_0 e^{\frac{3\pi i}{4}}; q)$. Определить потенциал скоростей.

7.256. Источник $(r_0 e^{i\varphi_0}; q)$ расположен параллельно краю полуплоскости ($0 < x, y = 0$). Найти скорость жидкости на этой полуплоскости.

7.257. Источник $(r_0 e^{i\varphi_0}; q)$ расположен внутри угла $(0 < r, 0 < \varphi < \frac{\pi}{2})$. Определить скорость жидкости на гранях угла.

7.258. Вне угла $(-\alpha < \varphi < \alpha)$ расположен источник $(-d; q)$, $d > 0$. Получить комплексный потенциал поля скоростей и найти скорость жидкости на сторонах угла.

7.259. Внутри угла $(0 < x, 0 < y)$ действуют источники $(z_1; q)$ и $(z_2; -q)$. Определить комплексный потенциал поля скоростей, если: 1) $z_1 = r_0$, $z_2 = ir_0$, 2) $z_1 = r_0 e^{i\pi/4}$, $z_2 = 0$.

7.260. Внутри угла $(0 < \varphi < \alpha)$ расположены два источника $(r_0 e^{i\beta}; q)$ и $(r_0 e^{i(\alpha-\beta)}; -q)$, где $0 < 2\beta < \alpha$. Найти точки, в которых скорость жидкости равна нулю.

7.261. Внутри угла $(0 < x, 0 < y)$ действуют два источника жидкости $(r_0 e^{\frac{\pi i}{8}}; q)$ и $(r_0 e^{\frac{3\pi i}{8}}; -q)$. Определить комплексный потенциал скоростей.

7.262. Вне окружности $\{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2\}$ находится источник $(z_1; q)$. Найти комплексный потенциал течения. Убедиться в том, что такое же поле скоростей вне окружности образуют три источника: данный и два изображения $(\frac{r_0^2}{z_1}; q)$, $(0; -q)$.

7.263. Построить течение в круге $(|z| < r_0)$ с двумя источниками: 1) $(z_1; q)$, $(z_2; -q)$, $z_1 \neq z_2$, $z_1 z_2 \neq 0$; 2) $(0; q)$, $(z_1; -q)$, $z_1 \neq 0$.

7.264. Вне круга $\{x, y: x^2 + y^2 < r_0^2\}$ расположен источник $(d; q)$. Найти скорость течения на окружности.

7.265. Полоса $\{x, y: |x| < a, y = 0\}$ находится в поле источника жидкости $(ih; q)$. Какова ее скорость в точках полосы?

7.266. В плоскости $(x = 0)$ имеется щель $(-\frac{H}{2} < y < \frac{H}{2})$, через которую течет жидкость от источника $(d; q)$. Определить скорость жидкости в сечении $x = 0$.

7.267. Жидкость от источника $(z_0; q)$ обтекает плоскость $(y = 0)$ и полуплоскость $(x = 0, 0 < H < y)$. Найти расход жидкости через отрезок $(x = 0, 0 < y < H)$.

7.268. Между двумя плоскостями $(y = \pm H)$ находится источник жидкости $(0; q)$. Найти ее скорость в точках $(x, \pm H)$.

7.269. Линия S — дуга окружности ($r = r_0$, $\pi - \alpha < \varphi < \alpha$), $|\alpha| < \pi$, источник $(0; q)$. Определить скорость жидкости в точках этой дуги.

7.270. Вне полукруга ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$) расположен источник $(-ir_0; q)$. Определить скорость жидкости на границе полукруга.

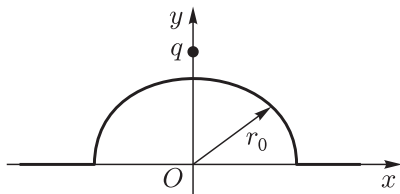


Рис. 7.27

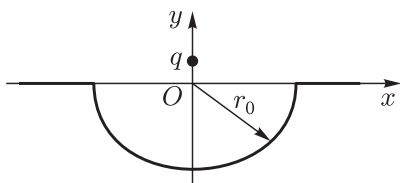


Рис. 7.28

7.271. В полупространстве, ограниченном плоскостью ($y = 0$) с цилиндрическим выступом (рис. 7.27) находится источник $(ih; q)$. Найти комплексный потенциал течения и скорость жидкости на полуокружности.

7.272. Над плоскостью ($y = 0$) с цилиндрической впадиной (рис. 7.28) расположен источник $(ih; q)$. Найти скорость жидкости на поверхности, ограничивающей поток.

7.273. Поперечное сечение цилиндра — пересечение двух кругов с центрами в точках $O_1(0, h_1)$ и $(O_2(0, h_2)$ (см. задачу 7.12), источник $(d; q)$, $d > a$. Определить скорость жидкости на поверхности цилиндра.

7.274. Решить предыдущую задачу для источника $(d; q)$, где $d > a(\sqrt{2} - 1)$.

7.275. Вне эллиптического цилиндра $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, a > b\right)$ расположен источник $(d; q)$, $d > a$. Найти скорость жидкости на поверхности цилиндра.

7.276. Решить предыдущую задачу для источника, координаты которого $x = 0$, $y = h > b$.

7.277. Параллельно оси параболического цилиндра ($y^2 = 2px$, $p > 0$) расположен источник $(-d; q)$, где $d > 0$. Определить скорость жидкости на поверхности цилиндра.

7.278. Решить предыдущую задачу для источника, координаты которого $x = p/2$, $y = 0$.

7.279. Параллельно оси гиперболического цилиндра ($x^2 - y^2 = 1$, $1 \leq x$) расположен источник $(0; q)$. Определить скорость жидкости на поверхности цилиндра.

7.280. Решить предыдущую задачу для источника, координаты которого $x = \sqrt{2}$, $y = 0$.

7.281. В пространстве между двумя гиперболическими цилиндрами ($x = \pm\sqrt{y^2 + 1}$) расположен источник $(0; q)$. Определить скорость жидкости на поверхности цилиндров.

Пример 7.16. 1. В однородном изотропном пространстве с проводимостью σ имеется источник тока $(z_0; J)$. Это прямая, с единицы длины которой равномерно по направлениям, перпендикулярным прямой, поступает постоянный ток J и которая пересекает плоскость (z) под прямым углом в точке z_0 . Найти комплексный потенциал электрического поля токов.

Уравнения, описывающие стационарное поле $\mathbf{E}$ и плотность тока $\mathbf{j}$, содержатся в системах (1.109), (1.110), к которым надо присоединить закон сохранения заряда (1.34):

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}, \operatorname{div} \mathbf{j} = J\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0), \mathbf{r}_0 = |z_0|.$$

Поток поля $\mathbf{E}$ через окружность $C = \{z: |z - z_0| = r_1\}$

$$N = \int_C \mathbf{E} \mathbf{n} dl = \frac{1}{\sigma} \int_C \mathbf{j} \mathbf{n} dl = \frac{1}{\sigma} \int_S \operatorname{div} \mathbf{j} ds = \frac{J}{\sigma} \int_S \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) ds = \frac{J}{\sigma},$$

где S — площадь круга $|z - z_0| \leq r_1$. Комплексный потенциал определяется формулой (7.18), в которой $z \rightarrow z - z_0$:

$$w(z) = \frac{iJ}{2\pi\sigma} \ln \frac{1}{z - z_0} + C.$$

При конформном отображении ток J остается постоянным (задача 7.282).

2. Однородный проводник, проводимость которого σ , занимает полупространство $y > 0$. Определить комплексный потенциал тока $(0; J)$.

Посредством четного продолжения источника тока на все пространство получается предыдущая задача для источника тока $(0; 2J)$, так что

$$w(z) = \frac{iJ}{\pi\sigma} \ln \frac{1}{z} + C.$$

К этому результату можно придти, применяя конформное отображение $z_1 = z^2$ (см. пример 7.15).

3. Однородный проводник, проводимость которого σ , занимает полупространство $y > 0$ без круга ($x^2 + y^2 \leq r_0^2$). Определить плотность тока, источник которого ($ir_0; J$).

Так как граница проводника принадлежит семейству линий тока, то решение достигается способом, рассмотренном в примере 7.15. Конформные отображения

$$z_1 = \frac{z}{r_0}, \quad z_2 = \frac{1}{2} \left(z_1 + \frac{1}{z_1} \right)$$

преобразуют

$$\Omega \doteq \Omega_2 = \text{Im} z_2 > 0, \quad z_0 = ir_0 \doteq z_{20} = 0 \in \partial\Omega_2, \quad z = \infty \doteq z_2 = \infty.$$

Следовательно, (см. предыдущий пункт)

$$w(z) = \frac{iJ}{\pi\sigma} \ln \frac{1}{z_2} + C.$$

Плотность тока

$$j = \sigma E = -i\sigma \overline{w'} = \frac{J}{\pi \overline{z}} \frac{\overline{z}^2 - r_0^2}{\overline{z}^2 + r_0^2}.$$

В переменных (r, φ)

$$j = \frac{J}{\pi r} \frac{r^4 - r_0^4 - i 2r_0^2 r^2 \sin 2\varphi}{r^4 + r_0^4 + 2r_0^2 r^2 \cos 2\varphi} e^{i\varphi}.$$

7.282. Доказать, что при конформном отображении величина тока не изменяется.

В задачах 7.283–7.295 требуется определить комплексный потенциал (если нет дополнительных или других вопросов) стационарных токов в однородном цилиндрическом проводнике, проводимость которого σ , а поперечное сечение которого плоскостью (z) есть область Ω . Ток через границу не проходит.

7.283. Область Ω — полупространство ($y > 0$), источники тока $(-a; J)$ и $(a; -J)$. Определить также линии тока.

7.284. Область Ω — угол ($0 < \varphi < \alpha$), источники тока $(a; J)$, $(ae^{i\alpha}; -J)$, $a > 0$. Определить также плотность тока в проводнике.

7.285. Область Ω — сектор ($r < r_0$, $-\alpha < \varphi < \alpha$), источники тока $(ae^{-i\alpha}; J)$ и $(ae^{i\alpha}; -J)$, $0 < a < r_0$.

7.286. Область Ω — слой $\{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y < H\}$, источник тока $(y_0; J)$, $0 < y_0 < H$. Найти потенциал $v(x, y)$ электрического поля и плотность тока в сечении $y = \frac{H}{2}$ при $y_0 = H/2$.

7.287. В пластинке $(-\infty < x < \infty, 0 < y < H, |z| < \frac{d}{2})$ течет постоянный ток J . Ток втекает через отрезок $(x = 0, y = 0, |z| \leq \frac{d}{2})$ и равномерно распределен по отрезку. Найти плотность тока в пластинке.

7.288. В неограниченной пластинке $(-\infty < x < \infty, 0 < y < H, |z| < \frac{d}{2})$ течет постоянный ток J . Ток втекает и вытекает через отрезки одинаковой длины $(x = 0, y = 0, |z| \leq \frac{d}{2})$ и $(x = 0, y = H, |z| \leq \frac{d}{2})$ соответственно, вдоль которых он распределен равномерно. Найти плотность тока в пластинке.

7.289. Постоянный ток J втекает в круглую пластинку, радиус которой r_0 , толщина d , через образующую $(r = r_0, \varphi = \pi)$ и вытекает через образующую $(r = r_0, \varphi = 0)$ соответственно, вдоль которых он распределен равномерно. Найти также плотность тока в пластинке.

7.290. Цилиндр $\{r, \varphi: r < r_0, 0 \leq \varphi < 2\pi\}$ находится в непроводящей среде. Внутри цилиндра расположены источники тока $(-a; -J)$ и $(a; J)$. Найти также плотность тока в сечении: 1) $x = 0$; 2) $y = 0$.

7.291. Область Ω — полукруг $\{r, \varphi: r < r_0, 0 < \varphi < \pi\}$, источники тока $(0; J)$ и $(r_0 e^{i\frac{\pi}{2}}; -J)$. Определить плотность тока в пластинке.

7.292. В полуограниченной пластинке $(0 < x, |y| < \frac{H}{2}, |z| < d)$, течет ток J . Ток втекает через торец по образующей $(x = 0, y = 0)$, по которой он распределен равномерно. Определить плотность тока в пластинке.

7.293. Постоянный ток J втекает в проводящую цилиндрическую оболочку $(r = r_0, -\pi \leq \varphi < \pi, -\infty < z < \infty)$ через точку $(r = r_0, \varphi = 0, z = 0)$. Найти плотность тока в оболочке.

7.294. Постоянный ток J втекает в проводящую цилиндрическую оболочку ($r = r_0$, $0 < \varphi < \pi$, $-\infty < z < \infty$) через точку ($r = r_0$, $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $z = 0$). Определить плотность тока в оболочке.

7.295. Через точку ($x = 0$, $y = r_0$, $z = 0$) в проводящую цилиндрическую оболочку ($x^2 + y^2 = r_0^2$, $y < 0$, $-\infty < z < \infty$), расположенную на заземленном проводящем основании ($y = 0$), втекает постоянный ток J . Найти плотность тока в оболочке.

Пример 7.17. Найти силу, действующую на единицу длины равномерно заряженной нити, расположенной над проводящей заземленной плоскостью с цилиндрической впадиной (рис. 7.10). Координаты нити $x = 0$, $y = ih$, $h > -r_0$, плотность заряда q .

Поле $E(z)$ является суперпозицией поля $E_\sigma(z)$ зарядов, индуцированных на проводнике, и поля $E_q(z)$ нити, а соответствующий комплексный потенциал $w(z) = w_\sigma(z) + w_q(z)$. Нить находится в поле $E_\sigma(z)$, и на нее действует сила, линейная плотность которой

$$F = q E_\sigma(z_0) = -iq\overline{w'}_\sigma(z_0). \quad (7.32)$$

Потенциал $w(z)$ определен выражением (7.25), куда входит функция $\zeta(z, z_0)$, построенная в примере 7.11, а потенциал $w_q(z)$ имеет вид (7.21). Таким образом,

$$w_\sigma(z) = 2qi \ln \frac{z - \zeta}{\zeta} + C = 2qi \ln \frac{(z_2 - \bar{z}_{20})(z - z_0)}{z_2 - z_{20}} + C.$$

Разность $z_2 - z_{20}$ содержит множитель $z - z_0$:

$$z_2 - z_{20} = z_1^{\frac{2}{3}} - z_{10}^{\frac{2}{3}} = \frac{z_1^2 - z_{10}^2}{z_1^{\frac{4}{3}} + z_1^{\frac{2}{3}} z_{10}^{\frac{2}{3}} + z_{10}^{\frac{4}{3}}} = \frac{z_1 + z_{10}}{z_1^{\frac{4}{3}} + z_1^{\frac{2}{3}} z_{10}^{\frac{2}{3}} + z_{10}^{\frac{4}{3}}} \cdot \frac{2r_0}{z_0 + r_0} \cdot \frac{z - r_0}{z + r_0}.$$

Поэтому

$$w_\sigma(z) = 2qi \ln \frac{(z_2 - \bar{z}_{20})(z_1^{\frac{4}{3}} + z_1^{\frac{2}{3}} z_{10}^{\frac{2}{3}} + z_{10}^{\frac{4}{3}})(z + r_0)(z_0 + r_0)}{2r_0(z_1 + z_{10})} + C,$$

откуда

$$\begin{aligned} w'_\sigma(z_0) &= 2qi \left[\frac{2z'_1(z_0)}{3z_{10}^{\frac{1}{3}}(z_{20} - \bar{z}_{20})} + \frac{2z_{10}^{\frac{1}{3}}z'_1(z_0)}{3z_{10}^{\frac{4}{3}}} - \frac{z'_1(z_0)}{2z_{10}} + \frac{1}{z + r_0} \right] = \\ &= 2qi \left[\frac{z'_1(z_0)}{\lambda} \left(\frac{e^{-i\frac{\alpha}{3}}}{3i \sin \frac{2\alpha}{3}} + \frac{1}{6} e^{-i\alpha} \right) + \frac{1}{r_0 + ih} \right]. \end{aligned}$$

Так как $z_0 + r_0 = (z_0 - r_0)e^{-i\alpha} = -(r_0 - ih)r^{-i\alpha}$, то

$$z'_1(z_0) = \lambda \frac{2r_0}{(z_0 + r_0)^2} = -\lambda \frac{2r_0 e^{i\alpha}}{r_0^2 + h^2}.$$

Следовательно,

$$w'_\sigma(z_0) = \frac{2qr_0 i}{r_0^2 + h^2} \left(-\frac{2e^{\frac{2i\alpha}{3}}}{3i \sin \frac{2\alpha}{3}} + \frac{2}{3} - i \frac{h}{r_0} \right) = \frac{2qr_0}{r_0^2 + h^2} \left(\frac{h}{r_0} - \frac{2}{3} \operatorname{ctg} \frac{2\alpha}{3} \right).$$

Подстановка $w'_\sigma(z_0)$ в (7.32) дает

$$F = -\frac{2q^2 r_0}{r_0^2 + h^2} \left(\frac{h}{r_0} - \frac{2}{3} \operatorname{ctg} \frac{2\alpha}{3} \right) i.$$

В задачах 7.296–7.333 найти линейную плотность силы, действующей на заряд $(z_0; q)$, параллельный проводящей заземленной цилиндрической поверхности, сечение (поперечное) которой — линия S (если нет иных условий и требований).

7.296. Сечение проводника — прямая $\{x, y: -\infty < x < \infty, y = 0\}$, заряд $(ih; q)$.

7.297. Заряд $(r_0 e^{i\frac{3\pi}{4}}; q)$ расположен параллельно ребру двугранного угла $\left(\frac{3\pi}{2} < \varphi < 2\pi\right)$.

7.298. Заряд $(ih; q)$, $h > 0$, расположен параллельно ребру двугранного угла $\left(\frac{3\pi}{2} < \varphi < 2\pi\right)$.

7.299. Сечение проводника $S = \{x, y: 0 < x, y = 0\}$, заряд $(r_0 e^{i\varphi_0}; q)$, $0 < \varphi_0 < 2\pi$.

7.300. Двугранный угол $(0 < \varphi < \alpha \leq 2\pi)$ образован двумя проводящими заземленными полуплоскостями. Внутри угла расположен заряд $(r_0 e^{i\varphi_0}; q)$.

7.301. Сечение проводника $S = \{x, y: |x| < a, y = 0\}$, заряд $(z_0; q)$, где: 1) $z_0 = d$, $d > a$; 2) $z_0 = ih$, $h > 0$.

7.302. Параллельно краю каждой из проводящих заземленных полуплоскостей $(x < -a, y = 0)$ и $(x > a, y = 0)$ помещен заряд $(z_0; q)$, где: 1) $z_0 = d$, $d \in (-a, a)$; $z_0 = ih$, $h < 0$.

7.303. Параллельно проводящим заземленным плоскости $(y = 0)$ и полуплоскости $(x = 0, 0 < H < y)$ расположен заряд $(ih; q)$, где $0 < h < H$.

7.304. Проводящая заземленная плоскость ($y = 0$) имеет тонкое ребро ($x = 0$, $0 \leq y < H$) и находится в поле заряда ($ih; q$), где $h > H$.

7.305. С какой силой действует равномерно заряженная нить (линейная плотность заряда q) на единицу длины полого проводящего заземленного цилиндра, радиус которого r_0 , если нить параллельна оси цилиндра и находится на расстоянии d от нее? Рассмотреть случаи: 1) $d < r_0$; 2) $d > r_0$.

7.306. Внутри полого цилиндра ($x^2 + y^2 = r_0^2$) расположены заряды ($-d; -q$) и ($d; q$), где d — вещественное число. Найти силу, действующую на заряд q .

7.307. Вне цилиндра ($x^2 + y^2 = r_0^2$) расположены заряды ($id; -q$) и ($d; q$), где d — вещественное число. Найти силу, действующую на заряд q .

7.308. Полый цилиндр ($x^2 + y^2 = r_0^2$) находится в поле зарядов ($d; q_1$) и ($\frac{r_0^2}{d}; q_2$), где вещественное число $d \neq \pm r_0$. Найти силу, действующую на единицу длины цилиндра.

7.309. Сечение проводника — граница полукруга ($0 < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), заряд ($z_0; q$), где: 1) $z_0 = d$, $d > r_0$; 2) $z_0 = ih$, $h > 0$; 3) $z_0 = -r_0(\sqrt{2} - 1)$.

7.310. Сечение полого цилиндра — пересечение двух кругов с центрами в точках $O_1(0, a)$ и $O_2(0, -a)$, длина их общей хорды $2a$, заряд ($d; q$), где: 1) $|d| < a$; 2) $|d| > a$.

7.311. Решить предыдущую задачу для заряда ($ih; q$), если: 1) $|d| < a(\sqrt{2} - 1)$; 2) $|d| > a(\sqrt{2} - 1)$.

7.312. Сечение проводника — касающиеся окружности $(x + r_0)^2 + y^2 = r_0^2$ и $(x - r_0)^2 + y^2 = r_0^2$, заряд ($z_0; q$), где 1) $z_0 = ih$; 2) $z_0 = d$, $d > 2r_0$.

7.313. Сечение проводника — полуокружность ($r = r_0$, $|\varphi| > \frac{\pi}{2}$), заряд ($x; q$), $x \neq r_0$.

7.314. Сечение проводника — полуполоса $S = \{x, y: 0 < x, -H < y < H\}$, заряд ($d; q$), $0 < d$.

7.315. Параллельно полому цилиндру со щелью $\{r, \varphi: r = r_0, \alpha < \varphi < 2\pi - \alpha, 0 < \alpha < \pi\}$ помещен заряд ($z_0; q$), где: 1) $z_0 = 0$; 2) $z_0 = r_0 e^{i\varphi_0}$, $-\alpha < \varphi_0 < \alpha$.

7.316. Проводящая поверхность представляет собой плоскость ($y = 0$) с цилиндрическим выступом, поперечное сечение которого — полуокружность ($x^2 + y^2 = r_0^2$, $y > 0$), заряд ($ih; q$), $h > r_0$.

7.317. Между плоскостями ($y = 0$) и ($y = H$) помещен заряд ($ih; q$), $0 < h < H$.

7.318. Между плоскостями ($y = 0$) и ($y = H$), одна из которых ($y = 0$) имеет ребро ($x = 0$, $0 < y < h < H$), расположен заряд ($id; q$), $h < d < H$. Найти силу F , действующую на заряд и условие, при котором $F = 0$.

7.319. Проводник с крестообразным поперечным сечением ($|x| \leq a$, $y = 0$) $\cup$ ($x = 0$, $|y| \leq a$), находится в поле заряда ($d; q$), $d > a$. Какая сила действует на проводник?

7.320. Сечение проводника $S = (|x| \leq a, y = 0) \cup (x = 0, |y| \leq a)$, заряд равен ($a\sqrt{3}i; q$).

7.321. Решить предыдущую задачу для заряда ($-ia; q$).

7.322. Определить силу, действующую на эллиптический цилиндр $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1\right)$, находящийся в поле заряда ($d; q$), $d > a$.

7.323. Сечение проводника — эллипс $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1\right)$, заряд ($ih; q$), $h = d > b$.

7.324. Поверхность проводника представляет собой плоскость с цилиндрическим выступом в форме полуэллипса $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, y > 0, a > b\right)$, заряд ($ih; q$), $h > b$.

7.325. Решить предыдущую задачу для плоскости с цилиндрическим выступом в форме полуэллипса $\left(\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1, y > 0, a > b\right)$, если заряд ($ih; q$), $h > a$.

7.326. Два экрана имеют форму гиперболических цилиндров ($x \pm \sqrt{y^2 + 1}$, $-\infty < y < \infty$), параллельно которым расположен заряд ($z_0; q$), где: 1) $z_0 = d$, $-1 < d < 1$; 2) $z_0 = ih$, $-\infty < h < \infty$.

7.327. Сечение проводника $S = \{x, y: x^2 - y^2 = 1\}$, заряд ($z_0; q$), где: 1) $z_0 = d$, $d > 1$; 2) $z_0 = -\sqrt{2}$.

7.328. Сечение проводника $\{x, y: y^2 = 2px, p > 0\}$, заряд ($z + +0; q$), где: 1) $z_0 = -d$, $d > 0$; 2) $z_0 = p/2$.

7.329. Параллельно проводящему незаземленному цилиндру, радиус которого r_0 , помещен заряд $(d; q)$, $d > r_0$.

7.330. Вне незаземленного цилиндра $(x^2 + y^2 = r_0^2)$, заряд единицы длины которого равен q_0 , расположены заряды $(-d; q)$ и $(d; q)$, где d — вещественное число. Найти силу, действующую на заряд $(d; q)$.

7.331. Полый незаземленный цилиндр $(x^2 + y^2 = r_0^2)$, заряд единицы длины которого равен q_0 , находится в поле зарядов $(d; q_1)$ и $(\frac{r_0^2}{d}; q_2)$, где $d \in (-r_0; r_0)$. Найти силу, действующую на единицу длины цилиндра, если: 1) $q_1 = q_2 = q$; 2) $-q_1 = q_2 = q$; 3) $q_1 = -q_2 = q$.

7.332. Параллельно проводящей незаземленной полосе с поперечным сечением $S = \{x, y: -a < x < a, y = 0\}$ расположен заряд $(z_0; q)$, где: 1) $z_0 = d$, $d > a$; 2) $z_0 = ih$, $h > 0$.

7.333. Незаземленный эллиптический цилиндр $(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1)$ находится в поле заряда $(d; q)$, $d > a$.

Пример 7.18. Найти стационарное распределение температуры в толстостенной трубе, ограниченной коаксиальными цилиндрами (рис. 7.29), если температура внешней поверхности v_1 , внутренней — v_2 , $r_1 = 16a$, $r_2 = 5a$, $d = 7a$.

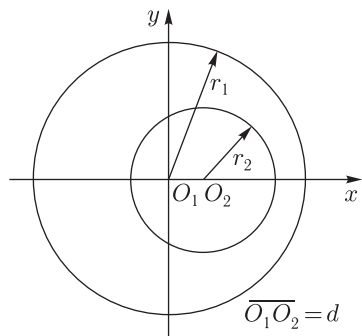


Рис. 7.29

Температура трубы $v(x, y) = \text{Im } w(z)$. Если бы поперечное сечение трубы было концентрическим кольцом, то формулы (7.18), (7.19) решали задачу построения комплексного потенциала. Поэтому нужно отобразить эксцентрическое кольцо на концентрическое. Для этого применяется дробно-линейное отображение,

переводящее пару точек, симметричных относительно обеих окружностей, в 0 и ∞ . Дробно-линейная функция отображает окружность в окружность, симметричные токи — в симметричные. Поэтому точки 0 и ∞ будут симметричны относительно окружностей образов. Следовательно, точка 0 — общий центр этих окружностей (если одна из симметричных точек бесконечно

удаленная, то другая — центр окружности). В данном случае симметричные точки лежат на положительной части действительной оси, а их координаты x_1 и x_2 удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{cases} x_1 z_2 = 256a^2, \\ (x_1 - 7a)(x_2 - 7a) = 25a^2, \end{cases}$$

решение которой $x_1 = 8a$, $x_2 = 32a$. Дробно-линейная функция

$$\zeta = k \frac{z - 8a}{z - 32a}$$

преобразует данное кольцо в концентрическое. Если потребовать, чтобы внутренняя окружность $z = 7a + 5ae^{i\varphi}$ отображалась на окружность радиуса $R_1 = 1$, т. е.

$$|k| \cdot \left| \frac{5ae^{i\varphi} - a}{5ae^{i\varphi} - 25} \right| = 1,$$

то $|k| = 5$. Следовательно,

$$\zeta = 5e^{i\alpha} \frac{z - 8a}{z - 32a},$$

а радиус образа внешней окружности

$$R_2 = 5 \left| \frac{16ae^{i\varphi} - 8a}{16ae^{i\varphi} - 32a} \right| = \frac{5}{2}.$$

Комплексный потенциал имеет вид

$$w = Bi \ln \frac{1}{\zeta} + C = -Bi \ln \left(5e^{i\alpha} \frac{z - 8a}{z - 32a} \right) + C, \quad \text{Im } B = 0,$$

а температура

$$v = \text{Im } w = -B \ln \left| 5 \frac{z - 8a}{z - 32a} \right| + \text{Im } C.$$

Граничные условия приводят к системе

$$\begin{cases} -B \ln R_1 + \text{Im } C = v_1, \\ -B \ln R_2 + \text{Im } C = v_2. \end{cases}$$

В итоге

$$v(x, y) = \frac{v_1 - v_2}{\ln \frac{5}{2}} \ln 5 \sqrt{\frac{(x - 8a)^2 + y^2}{(x - 32a)^2 + y^2}} + v_2.$$

7.334. Плоское поле A определено в области Ω и удовлетворяет условиям существования комплексного потенциала. Показать, что при конформном отображении области Ω поток поля через контур $L \in \Omega$ не меняется.

В задачах 7.335–7.377 цилиндры и плоскости параллельны и являются проводниками (если не указаны другие условия).

7.335. Найти стационарное распределение температуры в трубе, поперечное сечение которой — эксцентрическое кольцо, ограниченное окружностями $(x^2 + y^2 = 10a^2)$, $((x + a)^2 + y^2 = 4a^2)$, если температура внешней поверхности v_1 , внутренней — v_2 .

7.336. Найти стационарную температуру трубы, поперечное сечение которой изображено на рис. 7.29, если температура внешней поверхности v_1 , внутренней — v_2 , $r_1 = 14a$, $r_2 = 10a$, $d = 3a$.

7.337. Труба (рис. 7.29) изготовлена из материала с коэффициентом теплопроводности k . Температура внешней поверхности v_1 , внутренней — v_2 , $r_1 = 5a$, $r_2 = 2a$, $d = 2a$. Какова плотность теплового потока, проходящего через внешнюю поверхность при стационарном распределении температуры?

7.338. Температура внешней и внутренней поверхностей трубы равна, соответственно, v_1 и v_2 . Найти величину теплового потока, проходящего через внешнюю поверхность (на единицу длины трубы) при установившемся тепловом режиме. Дано: $r_1 = 56a$, $r_2 = 4a$, $d = 48a$ (рис. 7.29).

7.339. Температура внешней и внутренней поверхностей трубы не зависит ни от времени, ни от координат. Какова температура v_1 внешней поверхности, если через нее проходит (на единицу длины трубы) тепловой поток Q , а температура внутренней поверхности v_2 ? Дано: $r_1 = 35a$, $r_2 = 9a$, $d = 22a$ (рис. 7.29).

7.340. В трубе (рис. 7.29) диффундирует газ, концентрация которого не зависит от времени. Найти плотность потока q и полный поток Q газа через внешнюю поверхность трубы, если концентрация газа на внешней поверхности v_1 , на внутренней — v_2 , $r_1 = 32a$, $r_2 = 7a$, $d = 15a$, коэффициент диффузии D .

7.341. Внешний контур кольцевой мембраны (рис. 7.29) находится в плоскости xOy , а внутренний смещен перпендикулярно плоскости на расстояние v_0 . Найти равновесную форму мембраны, если $r_1 = 2,5a$, $r_2 = a$, $d = a$.

7.342. Внешняя граница кольцевой мембраны (рис. 7.29) закреплена, а внутренняя получает стационарное отклонение v_0 от положения равновесия $v = 0$ под действием поперечной силы, линейная плотность которой $f(\psi)$. Определить: 1) равновесную форму мембраны; 2) линейную плотность $f(\psi)$ силы, действующей на внутренний контур мембраны. Натяжение мембраны T_0 , $r_1 = 2,5a$, $r_2 = a$, $d = a$.

7.343. Между двумя цилиндрами находится среда с проводимостью σ (рис. 7.29). Найти плотность тока, текущего через цилиндрические поверхности, если внешний цилиндр заземлен, а потенциал внутреннего равен v_0 ; $r_1 = 66a$, $r_2 = 15a$, $d = 17a$.

7.344. Между двумя цилиндрами находится среда с проводимостью σ (рис. 7.29). Найти полный ток через цилиндрические поверхности, если заряд внешнего цилиндра q_1 , внутреннего — q_2 ; $r_1 = 2\sqrt{3}$, $r_2 = \sqrt{5}a$, $d = a$.

7.345. Между цилиндрами находится среда с проводимостью σ (рис. 7.29); ток течет перпендикулярно оси. Определить сопротивление единицы длины (вдоль оси) такого проводника, если $r_1 = 42a$, $r_2 = 9a$, $d = 7a$.

7.346. Труба, радиус которой $r = 7a$, находится в грунте на глубине $h = 25a$ (рис. 7.30.) Определить стационарное распределение температуры в грунте, если температура его поверхности v_1 , трубы — v_2 .

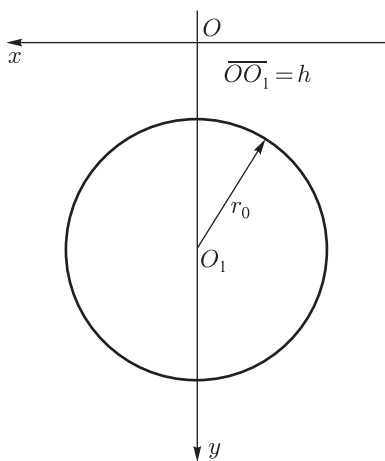


Рис. 7.30

7.347. Один из двух цилиндров заземлен, а другой имеет заряд q на единицу длины (рис. 7.31). Определить потенциал электростатического поля вне цилиндров и разность потенциалов между ними, если $r_1 = 5a$, $r_2 = 9a$, $d = 28a$.

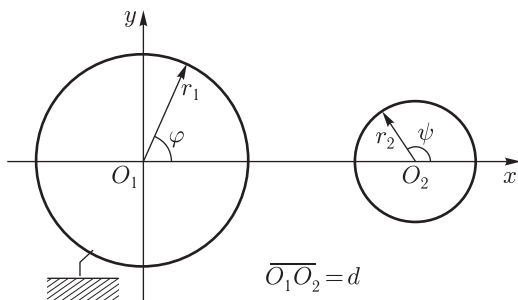


Рис. 7.31

7.348. В грунте, коэффициент теплопроводности которого k , на глубине $h = 13a$ расположена труба, радиус которой $r = 5a$ (рис. 7.30). Температура поверхности грунта v_1 , трубы — v_2 . Определить плотность теплового потока через поверхность грунта при стационарном распределении температуры.

7.349. Два одинаковых кабеля, расстояние между осями которых $2d$, образуют линию. Найти емкость единицы длины линии, если радиусы кабелей $r_0 < d$.

7.350. Найти взаимную емкость единицы длины двух цилиндров (рис. 7.29), если $r_1 = 18a$, $r_2 = 4a$, $d = 11a$.

7.351. Два цилиндра расположены так, как показано на рис. 7.29. Заряд единицы длины внешнего цилиндра q_1 , внутреннего — q_2 . Определить потенциал электростатического поля в пространстве, если $r_1 = 48a$, $r_2 = 21a$, $d = 23a$.

7.352. Один из двух цилиндров заземлен, а другой имеет потенциал v_0 (рис. 7.31). Определить электростатическое поле вне цилиндров и, в частности, в точке $M_0(r_2, \psi)$, если $r_1 = 7a$, $r_2 = 32a$, $d = 65a$.

7.353. Определить электростатическое поле вне цилиндров (рис. 7.31), если один из них заземлен, а другой имеет заряд q на единицу длины. Каковы величина и направление вектора E в точке $M_0(r_2, \psi)$? Дано: $r_1 = 10a$, $r_2 = 4a$, $d = 21a$.

7.354. Пространство между плоскостью и цилиндром заполнено средой с проводимостью σ (рис. 7.30). Определить плотность

тока, текущего через поверхность цилиндра, если его потенциал v_1 , потенциал плоскости v_2 , $r = 33a$, $h = 65a$.

7.355. Два цилиндра находятся в однородной среде с проводимостью σ (рис. 7.31) Определить плотность тока, протекающего через поверхности цилиндров, а также полный ток J , если первый цилиндр (радиус r_1) заземлен, а потенциал второго равен v_0 ; $r_1 = r_2 = 3a$, $d = 10a$.

7.356. Заземленный цилиндр находится в поле цилиндра, заряженного до потенциала v_0 (рис. 7.31) Определить плотность заряда и заряд единицы длины заземленного цилиндра, если $r_1 = 7a$, $r_2 = 10a$, $d = 51a$.

7.357. Внешний цилиндр (рис. 7.29) заземлен, а внутренний заряжен до потенциала v_0 . Найти плотность заряда на цилиндрах, если $r_1 = 10a$, $r_2 = 7a$, $d = a$.

7.358. Найти плотность заряда на поверхности цилиндра и на плоскости (рис. 7.30), а также взаимную емкость (на единицу длины вдоль оси цилиндра) цилиндра и плоскости, если $r = 3a$, $h = 5a$.

7.359. Заряд одного из цилиндров на единицу длины (вдоль оси) равен q , другой цилиндр заземлен (рис. 7.31). Как распределится заряд на незаземленном цилиндре, если $r_1 = 2a$, $r_2 = 5a$, $d = 9a$.

7.360. Два цилиндра расположены так, как показано на рис. 7.29. Внутренний цилиндр имеет заряд q на единицу длины, а внешний заземлен. Определить плотность заряда и заряд единицы длины заземленного цилиндра, если $r_1 = 16a$, $r_2 = 5a$, $d = 7a$.

7.361. Внутри заземленного цилиндра расположен цилиндр с зарядом q на единицу длины (рис. 7.29). Как распределится заряд на внутреннем цилиндре, если $r_1 = 20a$, $r_2 = 6a$, $d = 13a$?

7.362. Цилиндр с зарядом q на единицу длины расположен внутри заземленного цилиндра (рис. 7.29). Найти плотность заряда на цилиндрах, если $r_1 = 15a$, $r_2 = 6a$, $d = 7a$.

7.363. Расположение двух цилиндров дано на рис. 7.29. Заряд единицы длины внешнего цилиндра q_1 , внутреннего — q_2 . Найти плотность заряда на цилиндрах, если $r_1 = 260a$, $r_2 = 22a$, $d = 204a$.

7.364. Два цилиндра расположены так, как показано на рис. 7.31. Один из них заземлен, а другой имеет потенциал v_0 . Найти силу, действующую на единицу длины заземленного цилиндра, если $r_1 = 2a$, $r_2 = 9a$, $d = 14a$.

7.365. Какая сила действует на единицу длины заземленного цилиндра, расположенного вне цилиндра с зарядом q на единицу длины (рис. 7.31), если $r_1 = 10a$, $r_2 = 3a$, $d = 14a$?

7.366. Найти линейную плотность силы, действующей на цилиндр с зарядом q на единицу длины, расположенный внутри заземленного цилиндра (рис. 7.29), если $r_1 = 35a$, $r_2 = 5a$, $d = 24a$.

7.367. Положение двух цилиндров дано на рис. 7.29. Заряд единицы длины внешнего цилиндра q_1 , внутреннего — q_2 . Какая сила действует на единицу длины внутреннего цилиндра, если $r_1 = 70a$, $r_2 = 34a$, $d = 32a$?

7.368. Расположение цилиндра с зарядом q на единицу длины и заземленной плоскости дано на рис. 7.30. Определить плотность заряда на плоскости и силу, действующую на единицу длины цилиндра, если $r = 8a$, $h = 17a$.

7.369. В полупространстве с проводимостью σ находится цилиндр и плоскость $y = 0$ (рис. 7.30.) Найти плотность тока в полупространстве, а также плотность тока через поверхность цилиндра и полный ток через поверхность, если $r = 9a$, $h = 41a$, а потенциалы плоскости ($y = 0$) и цилиндра равны, соответственно, 0 и v_0 .

7.370. Конденсатор образован двумя проводящими эллиптическими цилиндрами, поперечные сечения которых — софокусные эллипсы с полуосями $a_1 = 10a$, $b_1 = 6a$ и $a_2 = 17a$, $b_2 = 15a$. Вычислить емкость единицы длины конденсатора.

7.371. В пространстве между двумя эллиптическими цилиндрами, поперечные сечения которых — софокусные эллипсы с полуосями $a_1 = 13a$, $b_1 = 5a$ и $a_2 = 20a$, $b_2 = 16a$, диффундирует газ. Концентрация газа не зависит от времени и равна v_1 на внутренней и v_2 на внешней поверхности, где v_1 и v_2 — постоянные величины. Определить полный поток (на единицу длины вдоль оси) и плотность потока через внешнюю поверхность, если коэффициент диффузии D .

7.372. В пространстве между двумя проводящими эллиптическими цилиндрами, поперечные сечения которых — софокусные

эллипсы с полуосями $a_1 = 25a$, $b_1 = 20$ и $a_2 = 39a$, $b_2 = 36a$, заполнено средой с проводимостью σ . Цилиндры поддерживаются при постоянных потенциалах. Найти сопротивление единицы длины (вдоль оси) такого проводника.

7.373. Внутри однородного эллиптического цилиндра, коэффициент теплопроводности которого k , находится полоса, ширина которой $2c$ ($c^2 = a^2 - b^2$) (рис. 7.32). Найти плотность теплового потока и полный поток через поверхность цилиндра при стационарном тепловом режиме, если разность постоянных температур цилиндрической поверхности и полосы равна v_0 .

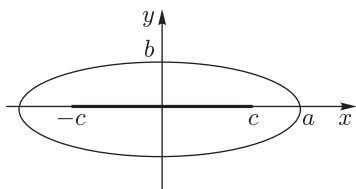


Рис. 7.32

7.374. Внутри полого эллиптического цилиндра с полуосями a и b помещена проводящая полоса, ширина которой $2c$ ($c^2 = a^2 - b^2$) (рис. 7.32). Определить плотность заряда на проводниках, если разность потенциалов между цилиндром и полосой v_0 .

7.375. Внутри полого эллиптического цилиндра с полуосями a и b расположена металлическая полоса, ширина которой $2c$ ($c^2 = a^2 - b^2$) (рис. 7.32). Какова емкость единицы длины такой системы?

7.376. Внутри эллиптического цилиндра с полуосями a и b помещена металлическая полоса, ширина которой $2c$ ($c^2 = a^2 - b^2$) (рис. 7.32). Определить плотность тока, текущего через поверхность цилиндра, если его проводимость σ , потенциал v_2 , а потенциал полосы v_1 .

7.377. Внутри эллиптического цилиндра (полуоси a и b) с проводимостью σ помещена металлическая полоса, ширина которой $2c$ ($c^2 = a^2 - b^2$) (рис. 7.32). Цилиндр и полоса поддерживаются при постоянных потенциалах. Определить сопротивление единицы длины (вдоль оси) такого проводника.

7.378. Горизонтальный пористый пласт с непроницаемыми основаниями имеет форму плоской линзы, в которой пробита круглая скважина; радиус линзы r_1 , радиус скважины r_2 (рис. 7.29).

Пласт заполнен малосжимаемой жидкостью, давление которой на поверхности $r = r_1$ равно P_1 , а в скважине — P_2 . Определить давление, которое устанавливается в линзе в процессе стационарной изотермической фильтрации, если $r_1 = 426a$, $r_2 = a$, $d = 420a$.

7.379. Малосжимаемая жидкость заполняет горизонтальный пористый пласт с непроницаемыми основаниями. Пласт имеет форму плоской линзы, в которой на расстоянии $d = 1008a$ от центра пробита круглая скважина; радиус линзы $r_1 = 1016a$, радиус скважины $r_2 = a$ (рис. 7.29). Найти расход жидкости (поток скорости), поступающей из пласта в скважину в процессе установившейся изотермической фильтрации, если давление при $r = r_1$ равно P_1 , а в скважине — P_2 .

7.380. Горизонтальный недеформируемый пласт, заполненный газом, имеет форму плоской линзы, в которой на расстоянии $d = 1980a$ от центра пробита круглая скважина; радиус линзы $r_1 = 1990a$, радиус скважины $r_2 = a$ (рис. 7.29). Давление в скважине P_2 , на внешней поверхности линзы — P_1 , а ее основания непроницаемы для газа. Какое давление установится в линзе в процессе стационарной изотермической фильтрации?

7.381. Недеформируемый горизонтальный пласт в форме плоской линзы, радиус которой $r_1 = 1499a$, толщина H , заполнен газом. В линзе на расстоянии $d = 1440a$ от центра пробита скважина, радиус которой $r_2 = a$ (рис. 7.29). Давление в скважине P_2 , на внешней поверхности пласта — P_1 , а его основания непроницаемы для газа. Какой поток газа поступает в скважину в процессе установившейся фильтрации, если температура T постоянна?

7.382. Тонкий круговой пласт, радиус которого r_1 , со скважиной, радиус которой r_2 (рис. 7.29), расположен на непроницаемом горизонтальном основании. Пласт частично (по высоте) заполнен жидкостью, уровень которой у поверхности $r = r_1$ равен H_1 , в скважине — H_2 . Найти форму свободной поверхности жидкости в процессе установившейся безнапорной фильтрации, если μ , m , k и температура — постоянные величины, $r_1 = 245a$, $r_2 = a$, $d = 240a$.

7.383. Тонкий круговой пласт, радиус которого $r_1 = 679a$, с непроницаемым горизонтальным основанием частично (по высоте) заполнен жидкостью. На расстоянии $d = 672a$ от центра пласта пробита скважина, радиус которой $r_2 = a$ (рис. 7.29).

В процессе стационарной безнапорной фильтрации устанавливается свободная поверхность жидкости, уровень которой при $r = r_1$ равен H_1 , а в скважине — H_2 . Определить расход жидкости (поток скорости), поступающей в скважину, если μ , m , k и температура — постоянные величины.

Пример 7.19. Найти комплексный потенциал электростатического поля прямой, линейная плотность дипольного момента которой p , где p — постоянный вектор, перпендикулярный к прямой. Установить закон преобразования дипольного момента при конформном отображении.

Комплексный потенциал конечного диполя, образованного линейными зарядами q и $-q$ с координатами z_0 и $z_0 + \Delta z$ соответственно, равен сумме комплексных потенциалов (7.20),

$$\begin{aligned} -2qi \ln \frac{1}{z - z_0} + 2qi \ln \frac{1}{z - (z_0 + \Delta z)} + C = \\ = 2qi \Delta z \frac{\ln(z - z_0) - \ln(z - z_0 - \Delta z)}{\Delta z} + C. \end{aligned}$$

Если устремить Δz к нулю при постоянном $p = q\Delta z$, то в пределе получится комплексный потенциал точечного двумерного диполя

$$w(z) = \frac{2pi}{z - z_0} + C. \quad (7.33)$$

Прямая с постоянной плотностью момента, будет называться диполем и обозначаться $(z_0; p)$, где z_0 — след прямой на комплексной плоскости (z).

Закон преобразования дипольного момента можно найти так же, как это сделано в примере 7.7, а именно, посредством замены переменных в уравнении Пуассона $\Delta u = -4\pi\rho$. Плотность заряда диполя выражается через производную δ -функции по направлению вектора p (задача 10.243) и имеет в записи (7.9) вид $\rho = -\text{Re}(\bar{p}\nabla\delta(x - x_0, y - y_0))$. После замены переменных (7.24) уравнение Пуассона приобретает форму

$$|\zeta'(z)|^2 \Delta U 4\pi \text{Re} \left[\bar{p} \left(\nabla \xi \frac{\partial}{\partial \xi} + \nabla \eta \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \delta(x - x_0, y - y_0) \right].$$

По правилу замены переменных (10.36) в обобщенной функции

$$\begin{aligned} \left(\nabla \xi \frac{\partial}{\partial \xi} + \nabla \eta \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \delta(x - x_0, y - y_0) = \\ = \left| \frac{D(x, y)}{D(\xi, \eta)} \right|^{-1} \left(\nabla \xi \Big|_{z=z_0} \frac{\partial}{\partial \xi} + \nabla \eta \Big|_{z=z_0} \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \delta(\xi - \xi_0, \eta - \eta_0). \quad (7.34) \end{aligned}$$

Функции $\xi(x, y)$ и $\eta(x, y)$ удовлетворяют условиям Коши–Римана, поэтому

$$\nabla \xi = \frac{\partial \xi}{\partial x} + i \frac{\partial \xi}{\partial y} = \frac{\partial \xi}{\partial x} - i \frac{\partial \eta}{\partial x} = \overline{\zeta'(z)}, \quad \nabla \eta = i \overline{\zeta'(z)},$$

следовательно, правая часть уравнения (7.34) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} |\zeta'(z)|^2 \overline{\zeta'(z_0)} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} + i \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \delta(\xi - \xi_0, \eta - \eta_0) = \\ = |\zeta'(z)|^2 \overline{\zeta'(z_0)} \nabla \delta(\xi - \xi_0, \eta - \eta_0). \end{aligned}$$

В результате получается уравнение

$$\Delta U = 4\pi \operatorname{Re} (\overline{p \zeta'(z_0)} \nabla \delta(\xi - \xi_0, \eta - \eta_0)),$$

из которого следует, что дипольный момент преобразуется по закону

$$p \rightarrow p \zeta'(z_0).$$

7.384. На оси полого проводящего заземленного цилиндра, радиус которого r_0 , расположена нить, дипольный момент единицы длины которой p . Найти комплексный потенциал электростатического поля внутри цилиндра.

7.385. Поперечное сечение проводящей заземленной цилиндрической поверхности S представляет собой кусочно-гладкий контур, ограничивающий односвязную (в расширенной комплексной плоскости) область Ω , параллельно которой расположен диполь $(z_0; p)$, $z_0 \in \Omega$. Показать, что комплексный потенциал этой системы зарядов

$$w(z) = 2i \left[\frac{p \zeta'(z_0)}{\zeta(z)} - \overline{p \zeta'(z_0)} \zeta(z) \right] + \lambda, \quad \operatorname{Im} \lambda = 0,$$

где функция $\zeta(z)$ конформно отображает область Ω на единичный круг, а точку z_0 — в его центр.

7.386. Показать, что при условиях предыдущей задачи плотность заряда, индуцированного на поверхности S

$$\sigma(z) = -\frac{|\zeta'(z)|}{\pi} \operatorname{Re} [p \zeta'(z_0) \overline{\zeta(z)}], \quad z \in \partial\Omega.$$

7.387. На расстоянии h от проводящей заземленной плоскости находится диполь p . Определить плотность заряда, индуциро-

ванного на плоскости, если вектор p составляет с положительным направлением оси Ox угол, равный: 1) 0; 2) $\pi/2$; 3) $\pi/4$.

7.388. Внутри угла ($0 < \varphi < \alpha \leq 2\pi$), образованного двумя проводящими заземленными полуплоскостями, расположен диполь ($r_0 \exp(i\alpha/2; |p| \exp(i\beta)$). Найти плотность заряда на гранях угла.

7.389. Внутри проводящего заземленного цилиндра, радиус которого r_0 , расположен диполь p , координаты $(d; p)$. Найти плотность заряда, индуцированного на цилиндре, а также заряд q_1 и дипольный момент p_1 единицы длины цилиндра, если вектор p направлен по оси Ox .

7.390. Решить предыдущую задачу для нити, дипольный момент которой направлен по оси Oy .

7.391. Решить задачу 7.389 для нити, расположенной вне цилиндра.

7.392. Решить задачу 7.390 для нити, расположенной вне цилиндра.

7.393. Между проводящими заземленными плоскостями ($y = 0$) и ($y = H$) параллельно им на расстоянии h от плоскости $y = 0$ расположен диполь p . Определить плотность заряда, индуцированного на плоскостях, если вектор p : 1) параллелен плоскостям; 2) перпендикулярен к плоскостям.

7.394. Вне проводящего заземленного эллиптического цилиндра ($\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, a > b$) расположен диполь $(d; p)$, $d > a$. Найти плотность заряда, индуцированного на цилиндре, а также заряд q_1 и дипольный момент p_1 единицы длины цилиндра, если вектор p составляет с положительным направлением оси Ox угол, равный: 1) 0; 2) $\pi/2$.

7.395. Показать, что сила, действующая на единицу длины нити при условиях задачи 7.385,

$$F = \overline{ip w''_{\sigma}(z_0)},$$

где $w_{\sigma}(z)$ — комплексный потенциал поля зарядов, индуцированных на проводящей поверхности S .

7.396. На расстоянии h от проводящей заземленной плоскости $y = 0$ параллельно ей расположен диполь $p e^{i\beta}$, $p > 0$. Какая сила действует на диполь?

7.397. Диполь $pe^{i\beta}$, $p > 0$, расположен между заземленными проводящими плоскостями ($y = 0$) и ($y = H$) параллельно им на расстоянии h от плоскости $y = 0$. Найти силу, действующую на диполь.

7.398. Внутри угла ($0 < r$, $0 < \varphi < \alpha < 2\pi$), образованного заземленными проводящими полуплоскостями, расположен диполь $(r_0 e^{i\varphi_0}; pe^{i\beta})$, $p > 0$. Найти силу, действующую на диполь.

7.399. На расстоянии $d > r_0$ от оси проводящего заземленного цилиндра, радиус которого r_0 , расположен диполь $pe^{i\beta}$, $p > 0$. Найти силу, действующую на диполь.

7.400. Решить предыдущую задачу для диполя, расположенного внутри цилиндра.

Пример 7.20. Даны заряды $(-a; -q)$ и $(a; q)$. Получить (в плоскости xOy) уравнение силовых линий электрического поля. Указать силовую линию: 1) проходящую через точку $(\frac{a}{2}; \frac{a}{2})$; 2) выходящую из точки $(a; 0)$ под углом $\alpha = -\frac{\pi}{6}$.

Комплексный потенциал поля зарядов (см. пример 7.7)

$$w = -2qi \ln \frac{1}{z+a} + 2qi \ln \frac{1}{z-a} + C \implies -2qi \ln \frac{z-a}{z+a} + C \implies \\ \implies w = -2qi \left(\ln \left| \frac{z-a}{z+a} \right| + i\psi \right) + C.$$

Уравнение силовых линий (см. пример 7.1)

$$\operatorname{Re} w = C_1 \implies \psi = C_2,$$

где $\psi = \arg \frac{z-a}{z+a} = \arg(z-a)(\bar{z}+a) = \arg(x^2 + y^2 - a^2 + 2ixy)$.

Если $y \geq 0$, то вектор $x^2 + y^2 - a^2 + 2ixy$ направлен под углом

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{x^2 + y^2 - a^2}{2xy}$$

к действительной оси. Из условия $\psi = C_2$, $0 < C_2 < \pi$ следует уравнение

$$\operatorname{ctg} \psi = \operatorname{ctg} C_2 \implies x^2 + y^2 - a^2 = 2Cay, \quad C \in \mathbb{R}.$$

Таким образом, силовые линии представляют собой семейство дуг окружностей

$$x^2 + (y - aC)^2 = a^2(1 + C^2), \quad y \geq 0.$$

Аналогично получается еще одно семейство:

$$x^2 + (y - aC)^2 = a^2(1 + C^2), \quad y \leq 0.$$

Силовая линия проходит через точку $\left(\frac{a}{2}; \frac{a}{2}\right)$ при условии

$$\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2 - a^2 = Ca^2 \implies C = -\frac{1}{2},$$

так что уравнение линии

$$y = \frac{\sqrt{5a^2 - 4x^2} - a}{2}.$$

2) Если $\alpha = -\frac{\pi}{6}$, то

$$2x + 2(y - Ca)y' = 0 \implies \operatorname{tg} \alpha = -\frac{x}{y - C} \Big|_{x=a, y=0} = \frac{1}{C} = -\frac{1}{\sqrt{3}}.$$

Уравнение линии будет

$$y = -\sqrt{4a^2 - x^2} - a\sqrt{3}.$$

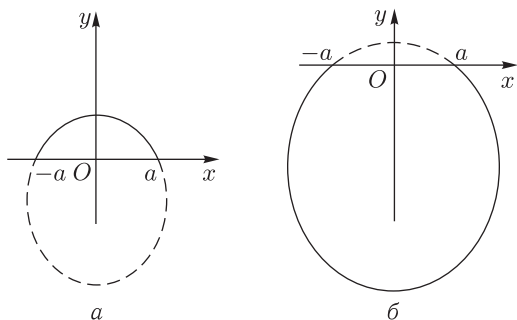


Рис. 7.33

7.401. Заряд $(ih; q)$ расположен параллельно проводящей плоскости $y = 0$. Найти силовую линию, выходящую из точки $z_0 = hi$ под углом $\frac{\pi}{4}$ и указать конечную точку z_1 линии.

7.402. Найти силовую линию поля зарядов $(-a; q)$ и $(a; q)$, проходящую через точку, полярные координаты которой $r = \sqrt{\frac{\sqrt{3} + 1}{2}}$, $\varphi = \frac{\pi}{24}$. Под каким углом выходит эта линия из точки $z = a$?

7.403. Даны заряды $(0; q_1)$ и $(a; q_2)$, где $a > 0$, $0 < q_2 < q_1$. Силовая линия выходит из точки $z = 0$ под углом α и заканчивается

в точке $z = a$, составляя угол β с осью Ox . Выразить β через α ; найти максимально возможное значение α_0 угла α .

7.404. Показать, что уравнение силовых линий поля двух зарядов $(0; 2q)$ и $(a; q)$, где $q > 0$, $a > 0$, в полярных координатах имеет вид

$$r = a \frac{\sin(2\varphi - 2C)}{\sin(\varphi - 2C)}.$$

Построить (схематически) график силовых линий, выходящих из точки $z = 0$ при $C = \frac{k\pi}{8}$, где k принимает целочисленные значения от 1 до 7.

7.405. В поле заряда $(r_0\sqrt{2}; q)$ и проводящего цилиндра $(x^2 + y^2 = r_0^2)$ найти силовую линию, выходящую из точки $z_0 = r_0\sqrt{2}$ под углом $\frac{\pi}{2}$. Какова конечная точка z_1 этой линии?

7.406. В поле заряда $(r_0(\sqrt{2} - 1); q)$ и проводящего цилиндра $(x^2 + y^2 = r_0^2)$ найти силовую линию, конечная точка которой $z_1 = -r_0i$. Под каким углом α эта линия выходит из начальной точки $r_0(\sqrt{2} - 1)$?

7.407. В поле заряда $(a; q)$ и проводящего цилиндра $(x^2 + y^2 = r_0^2)$ существует ли (в зависимости от a) силовая линия, которая выходит из точки $z_0 = a$ под углом $\frac{\pi}{3}$ и заканчивается в точке $z_1 = r_0i$, если: 1) $a < r_0$; 2) $a > r_0$?

7.408. Проводящий цилиндр, радиус которого r_0 потенциал v_0 , расположен параллельно проводящей плоскости, расстояние от которой до оси цилиндра $h = 5$ (рис. 7.30). Найти уравнение силовых линий. Выделить линию, которая выходит из точки $z_0 = 3 + 5i$ и указать конечную точку z_1 этой линии.

7.409. Один из двух параллельно расположенных проводящих цилиндра заземлен, заряд единицы длины (вдоль оси) другого равен q (рис. 7.31), $r_1 = 5a$, $r_2 = 9a$, $d = 28a$. Получить уравнение силовой линии, начальная точка которой $z_0 = 28a + 9ai$ и указать конечную точку z_1 .

7.410. Два проводящих цилиндра расположены параллельно друг другу (рис. 7.29), $r_1 = 10a$, $r_2 = 7a$, $d = a$. Получить уравнение силовой линии, конечная точка которой $z_1 = a + 7ai$ и указать начальную точку z_0 .

7.411. В поле заряда $(-d; q)$, $d > 0$, и проводящей полуплоскости $\{x, y: 0 < x, y = 0\}$ найти силовую линию, выходящую из точки $z_0 = -d$ под углом α , где $\operatorname{tg} \alpha = 2$.

7.412. В поле заряда $(0; q)$ и проводящих плоскостей $\{x, y: -\infty < x < \infty, y = -H\}$ и $\{x, y: -\infty < x < \infty, y = H\}$ найти силовую линию, выходящую из точки $z_0 = 0$ под углом $\alpha = -\frac{\pi}{6}$, и указать конечную точку z_1 этой линии.

7.413. Дать вывод уравнения силовых линий поля заряда $(r_0 e^{\frac{i\pi}{4}}; q)$ и проводящих полуплоскостей $\{x, y: 0 < x, y = 0\}$ и $\{x, y: x = 0, 0 \leq y\}$. Выделить линию, выходящую из точки $z_0 = r_0 e^{\frac{i\pi}{4}}$ под углом $\alpha = -\frac{11\pi}{12}$ к оси Ox , и указать конечную точку z_1 этой линии.

7.414. Бесконечная нить, дипольный момент единицы длины которой pi , $\operatorname{Im} p = 0$, перпендикулярна к плоскости xOy и пересекает ее в точке $z = 0$. Получить уравнение силовых линий электрического поля.

Пример 7.21. Методом конформных отображений найти функцию Грина двумерной задачи Дирихле для области Ω . Рассмотреть случай $\Omega = \{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y\}$.

Согласно физическому смыслу функции Грина (см. пример 6.3) она представляет собой потенциал бесконечной нити с зарядом $q = \frac{1}{4\pi}$ на единицу длины, расположенной параллельно проводящей заземленной цилиндрической поверхности. В примере 7.11 построен соответствующий комплексный потенциал в виде (7.25). Электростатический потенциал

$$v = \operatorname{Im} w = 2q \ln \frac{1}{|\zeta(z, z_0)|} + \operatorname{Im} C.$$

Так как $v|_{\partial\Omega} = 0$, $|\zeta|_{\partial\Omega} = 1$, то $\operatorname{Im} C = 0$. Следовательно, функция Грина

$$G(z, z_0) = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{|\zeta(z, z_0)|}.$$

Если Ω — полуплоскость, то ее отображение на единичный круг, в центр которого переходит точка z_0 , осуществляет дробно-линейная функция

$$\zeta(z, z_0) = e^{i\alpha} \frac{z - z_0}{z - \bar{z}_0}.$$

Таким образом, функция Грина задачи Дирихле для полуплоскости

$$G(z, z_0) = \frac{1}{2\pi} \ln \left| \frac{z - \bar{z}_0}{z - z_0} \right| = \frac{1}{4\pi} \ln \frac{(x - x_0)^2 + (y + y_0)^2}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}.$$

Решение задачи Дирихле для полуплоскости

$$\begin{aligned} \Delta v &= 0, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < y, \\ v(x, 0) &= f(x), \quad |v| < \infty, \end{aligned}$$

определяется формулой

$$v(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y f(\xi) d\xi}{(x - \xi)^2 + y^2}. \quad (7.35)$$

7.415. Дана область ($0 < r$, $0 < \varphi < \alpha < 2\pi$); построить функцию Грина задачи Дирихле для этой области.

7.416. В области ($0 < r$, $0 < \varphi < \pi/8$) найти решение $v(r, \varphi)$ задачи Дирихле, если $v(r, 0) = v_0 \sin r$, $v(r, \pi/8) = 0$.

7.417. Решить краевую задачу

$$\begin{aligned} \Delta v &= 0, \quad 0 < r, \quad 0 < \varphi < \frac{\pi}{8}, \\ v(r, 0) &= u_0 \sin r, \quad \left. \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\frac{\pi}{8}} = 0, \quad |v| < \infty. \end{aligned}$$

7.418. В области ($0 < r$, $0 < \varphi < \frac{\pi}{2^n}$), где $n \in \mathbb{N}$, найти решение $v(r, \varphi)$ задачи Дирихле, если $v(r, 0) = v_0 \sin r$, $v\left(r, \frac{\pi}{2^n}\right) = 0$.

7.419. Найти стационарное распределение температуры в двугранном угле ($0 < x$, $0 < y$), грань $y = 0$ которого поддерживается при нулевой температуре, а через грань $x = 0$ внутрь угла проходит тепловой поток плотности $q_0 \sin \alpha y$.

7.420. Грань $\varphi = 0$ двугранного угла ($0 < r$, $0 < \varphi < \pi/4$) имеет нулевую температуру, а грань $\varphi = \pi/4$ теплоизолирована, кроме полосы ($0 < r < a$), через которую внутрь угла поступает тепловой поток плотности $q_0 r/a$. Найти стационарную плотность потока через грань $\varphi = 0$.

7.421. Получить функцию Грина внутренней задачи Дирихле для: 1) круга, радиус которого r_0 ; 2) полукруга, радиус которого r_0 ; 3) неограниченной области ($r_0 < r$, $0 < \varphi < \alpha < 2\pi$).

7.422. Внутри длинного бруса, поперечным сечением которого является полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), помещен параллельно оси прямолинейный проводник с током. С единицы длины проводника выделяется тепловая мощность q , координаты проводника $r = h$, $\varphi = \pi/2$. Найти стационарную температуру бруса, если диаметральной плоскостью теплоизолирована, а остальная поверхность имеет температуру v_0 .

7.423. Построить функцию Грина задачи Дирихле для следующих областей: 1) полосы ($-\infty < x < \infty$, $0 < y < H$); 2) полуполосы ($0 < x$, $0 < y < H$).

7.424. Найти решение $v(x, y)$ задачи Дирихле для уравнения Лапласа в полосе ($-\infty < x < \infty$, $0 < y < H$), если:

$$\begin{aligned} 1) \quad v(x, 0) = v_0 \sin x, \quad 2) \quad v(x, 0) = 0, \quad 3) \quad v(x, 0) = v_0 \operatorname{th} \frac{\pi x}{H}, \\ v(x, H) = 0; \quad v(x, H) = v_0 \cos x; \quad v(x, H) = 0. \end{aligned}$$

7.425. Поверхность $y = 0$ слоя ($0 < y < H$) поддерживается при температуре $v_0 e^{-x} \eta(x)$, а поверхность $y = H$ — при нулевой температуре. Какой стационарный тепловой поток проходит через поверхность $y = 0$?

7.426. Решить задачу Дирихле для полуполосы ($0 < x$, $0 < y < H$), если:

$$\begin{aligned} 1) \quad v(x, 0) = v(x, H) = v_0 \operatorname{th} \frac{\pi x}{H}, \quad 2) \quad v(0, y) = v_0 \sin \frac{\pi y}{H}, \\ v(0, y) = 0; \quad v(x, 0) = v(x, H) = 0. \end{aligned}$$

7.427. Решить задачу Дирихле для полуполосы ($0 < x$, $0 < y < H$), если $v(0, y) = v_0 \cos y$, $v(x, 0) = v(x, \pi) = 0$.

7.428. В полуслой ($0 < x$, $0 < y < H$, $-\infty < z < \infty$) через торец $x = 0$ входит тепловой поток постоянной плотности q_0 . Определить стационарную плотность потока через грани $y = 0$ и $y = H$, если температура каждой из них постоянна.

7.429. Внутри бруса, поперечным сечением которого является полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), через поверхность $r = r_0$ поступает радиальный тепловой поток плотности q_0 . Определить стационарную плотность потока через диаметральной плоскостью, если ее температура постоянна.

7.430. Грань $y = 0$ двугранного угла ($0 < x$, $0 < y$) поддерживается при постоянной температуре v_0 , а грань $x = 0$ — при нулевой температуре, кроме участка ($0 < y < a$), покрытого

теплоизоляцией. Найти закон изменения температуры на участке ($0 < y < a$) при стационарном тепловом режиме.

7.431. Поперечным сечением неограниченного бруса служит полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$). Определить стационарную температуру бруса, если его диаметральной плоскость имеет нулевую температуру, а поверхность $r = r_0$ теплоизолирована, кроме образующей ($r = r_0$, $\varphi = \pi/2$), через которую внутрь бруса поступает тепловой поток линейной плотности q .

7.432. Внутри бесконечного бруса, поперечным сечением которого служит полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), расположен параллельно оси прямолинейный проводник с током; координаты проводника $r = h$, $\varphi = \frac{\pi}{2}$, выделяемая с единицы длины тепловая мощность равна q . Определить стационарную температуру бруса, если его диаметральной плоскость имеет нулевую температуру, а поверхность $r = r_0$ теплоизолирована.

7.433. Определить стационарную температуру бруса, поперечным сечением которого служит полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), если поверхность $r = r_0$ теплоизолирована, а диаметральной плоскость имеет температуру v_0 при $-r_0 < x < a$ и нулевую температуру при $a < x < r_0$, где $-r_0 < a < r_0$.

7.434. Внутри неограниченного бруса, поперечным сечением которого является полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), через диаметральной плоскость поступает тепловой поток постоянной плотности q_0 . Найти стационарную плотность потока через поверхность $r = r_0$, если ее температура постоянна.

7.435. Грань $\varphi = 0$ однородного клина ($0 < \varphi < \alpha$) поддерживается при нулевой температуре, а грань $\varphi = \alpha$ теплоизолирована на участке $r > r_0$ и имеет температуру v_0 на участке $0 < r < r_0$. Найти стационарную температуру теплоизолированного участка.

7.436. Поперечное сечение бруса — полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$). Часть диаметральной плоскости ($0 < r < r_0$, $\varphi = 0$) теплоизолирована, участок поверхности: 1) ($r = r_0$, $0 < \varphi < \pi$); 2) ($r = r_0$, $0 < \varphi < \pi/2$), поддерживается при температуре v_0 , а остальная поверхность — при нулевой температуре. Найти температуру теплоизолированной части при условии стационарности теплового режима.

7.437. Поперечное сечение бруса — область Ω , граница которой $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ (рис. 7.1). Одна часть Γ_1 этой границы имеет

температуру v_0 , а другая (кусочно-гладкая) часть Γ_2 теплоизолирована. Определить стационарную температуру бруса.

7.438. Найти комплексный потенциал поля скоростей идеальной несжимаемой жидкости при условиях задачи 1.320, если Ω_1 — полукруг, радиус которой r_0 , S_1 — полуокружность. Какова скорость жидкости на свободной поверхности и на поверхности S_1 ?

7.439. Длинный цилиндр плавает на поверхности воды (см. задачу 1.320); Ω_1 — полукруг, радиус которого r_0 , S_1 — полуокружность. В результате мгновенного воздействия цилиндр приобретает поступательную скорость V_1 , направленную по оси Oy . Показать, что скорость цилиндра после удара о воду

$$V_2 = \frac{mV_1}{m + \mu}, \quad \mu = 2\rho r_0^2,$$

где m и μ — соответственно масса и (так называемая) приведенная масса единицы длины цилиндра, ρ — плотность воды.

7.440. На поверхности идеальной несжимаемой жидкости плавает тонкая пластинка, ширина которой $2a$. Определить комплексный потенциал поля скоростей жидкости при условиях задачи 1.320, если S_1 — отрезок $[-a, a]$ оси Ox . Какова скорость жидкости на свободной поверхности и на поверхности S_1 ?

7.441. Найти приведенную массу единицы длины тонкой пластинки, плавающей на поверхности идеальной несжимаемой жидкости, если ширина пластинки $2a$ (см. задачу 7.439).

7.442. Определить комплексный потенциал поля скоростей идеальной несжимаемой жидкости при условиях задачи 1.320, если двумерная область $\Omega_1 = \{x, y: x^2/a^2 + y^2/b^2 < 1, y > 0, a > b\}$. Какова скорость жидкости на свободной поверхности и на поверхности S_1 ?

7.443. Длинный цилиндр, поперечным сечением которого является область $\Omega_1 = \{x, y: x^2/a^2 + y^2/b^2 < 1, y > 0, a > b\}$, плавает на поверхности идеальной несжимаемой жидкости (рис. 1.19). Определить приведенную массу единицы длины цилиндра.

Пример 7.22. Построить комплексный потенциал стационарного теплового поля в полупространстве $y > 0$, если температура плоскости $y = 0$ равна $f(x)$. Решить задачу в частном случае $f(x) = v_0 a^2 / (x^2 + a^2)$.

Решение задачи Дирихле для полуплоскости имеет вид (7.35). Так как

$$\frac{y}{(\xi - x)^2 + y^2} = \operatorname{Im} \frac{1}{\xi - x},$$

то выражение (7.35) является мнимой частью функции

$$w(z) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\xi) d\xi}{\xi - z} + C, \quad \operatorname{Im} C = 0,$$

которая представляет собой (при условии сходимости интеграла) искомый комплексный потенциал.

В частном случае интеграл берется с помощью теоремы о вычетах

$$\begin{aligned} w(z) &= \frac{v_0}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{a^2 d\xi}{(\xi^2 + a^2)(\xi - z)} + C = \\ &= 2v_0 i \left(\frac{a^2}{z^2 + a^2} + \frac{a^2}{2ai(ai - z)} \right) + C = \\ &= \frac{2v_0 a^2 i}{z - ai} \left(\frac{1}{z + ai} - \frac{1}{2ai} \right) + C = -\frac{v_0 a}{z + ai} + C, \end{aligned}$$

откуда

$$v(x, y) = \operatorname{Im} w = \frac{v_0 a(y + a)}{x^2 + (y + a)^2}.$$

7.444. Построить решение $u(x, y)$ задачи Дирихле для полуплоскости $y > 0$, если функция $u(x, 0)$ равна:

$$\begin{aligned} &1) \frac{x}{x^2 + 1}; \quad 2) \frac{x^2}{x^2 + 1}; \quad 3) \frac{x}{(x^2 + 1)^2}; \\ &4) \frac{x^2 - 1}{(x^2 + 1)^2}; \quad 5) \frac{1}{(x^2 + 1)^2}; \quad 6) \cos x. \end{aligned}$$

7.445. Определить стационарную температуру в полупространстве $y > 0$, если температура границы $v_0 \frac{x}{a} [\eta(x) - \eta(x - a)]$, где $a > 0$.

7.446. Найти решение задачи Дирихле в квадранте ($0 < x$, $0 < y$), если при $x = 0$ оно равно нулю, а при $y = 0$ принимает значение: 1) $\frac{1}{x^2 + 1}$; 2) $\frac{x^2}{x^2 + 1}$.

7.447. Решить стационарную задачу теплопроводности для бруса, поперечным сечением которого является полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), если поверхность $r = r_0$ поддерживается при нулевой температуре, а температура диаметральной плоскости равна $v_0(r_0^2 - r^2)/(r_0^2 + r^2)$.

7.448. Диаметральная плоскость бруса, поперечным сечением которого является полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), поддерживается при температуре $v_0(r_0^2 - r^2)/(r_0^2 + r^2)$, а поверхность $r = r_0$ теплоизолирована. Определить температуру поверхности $r = r_0$,

7.449. Температура поверхности бесконечного цилиндра, радиус которого r_0 , равна $f(\varphi)$. Показать, что комплексный потенциал стационарного теплового поля: 1) внутри; 2) вне цилиндра,

$$w_{1,2}(z) = \mp \frac{1}{2\pi i} \int_0^{2\pi} f(\psi) \frac{r_0 e^{i\psi} + z}{r_0 e^{i\psi} - z} d\psi, \quad z = r e^{i\varphi}.$$

7.450. Найти решение $v(r, \varphi)$ внутренней задачи Дирихле для круга, радиус которого r_0 , если $v(r_0, \varphi) = v_0 \cos \varphi / (2 + \cos \varphi)$.

7.451. Найти решение $v(r, \varphi)$ внешней задачи Дирихле для круга, радиус которого r_0 , если $v(r_0, \varphi) = v_0 / (4 + 3 \sin \varphi)$.

7.3. Комплексный потенциал точечного вихря

Пример 7.23. Точечный вихрь, расположенный в точке $z = 0$, создает аксиально симметричное плоское поле A , силовыми линиями которого являются концентрические окружности с центром в точке $z = 0$. Найти комплексный потенциал поля A .

В области Ω , не содержащей точку $z = 0$, выполняются условия (7.1). Из теоремы Стокса для кольца S , ограниченного окружностями ($|z| = r_1 > 0$) и ($|z| = r_2 > r_1$),

$$\int_S (\operatorname{rot} A)_n ds = \int_{|z|=r_2} A_l dl - \int_{|z|=r_1} A_l dl$$

следует постоянство циркуляции

$$\Gamma = \int_{|z|=r} A_l dl.$$

Так как $A = f(|z|) \frac{iz}{|z|}$, то (см. (7.9))

$$\Gamma = \int_{|z|=r} f(|z|) \operatorname{Re} \left(\frac{iz}{|z|} \cdot \frac{\bar{iz}}{|z|} \right) |dz| = 2\pi |z| f(|z|),$$

т. е.

$$A = \frac{i\Gamma z}{2\pi |z|^2} = \frac{i\Gamma}{2\pi \bar{z}}.$$

Из соотношения (7.4) вытекает, что

$$w(z) = \frac{\Gamma}{2\pi} \ln \frac{1}{z} + C. \quad (7.36)$$

7.452. Плоское поле A определено в области Ω и удовлетворяет условиям существования комплексного потенциала. Показать, что при конформном отображении области Ω циркуляция поля по контуру $L \in \Omega$ не меняется.

7.453. В трубе, поперечным сечением которой является концентрическое кольцо ($r_1 < r < r_2$), течет жидкость в направлении, перпендикулярном оси трубы. Найти скорость течения, если на окружностях ($r = r_1$) и ($r = r_2$) циркуляция скорости равна Γ .

7.454. В трубе, поперечным сечением которой является эксцентрическое кольцо (рис. 7.29), течет жидкость в направлении, перпендикулярном оси трубы; циркуляция скорости на каждой из окружностей, ограничивающих кольцо, равна Γ . Найти скорость жидкости на поверхности трубы, если $r_1 = 16a$, $r_2 = 9a$ и $d = 5a$.

7.455. Два параллельных цилиндра (рис. 7.31) вращаются в жидкости около своих осей: первый против, а второй по часовой стрелке. Найти скорость жидкости у поверхности цилиндров, если циркуляция скорости на окружностях ($|z| = r_1$) и ($|z - d| = r_2$) равна, соответственно, Γ и $-\Gamma$, $V(\infty) = 0$, $r_1 = 9a$, $r_2 = 5a$, $d = 28a$.

7.456. Построить комплексный потенциал магнитного поля прямого тока J .

7.457. Найти форму силовых линий магнитного поля двух прямых параллельных токов J_1 и J_2 , координаты которых $x_{1,2} = \mp a$, $y_{1,2} = 0$, если: 1) $J_1 = -J_2$; 2) $J_1 = J_2$.

7.458. Прямой ток J находится в однородной изотропной среде. Показать, что при конформном отображении величина тока не меняется.

7.459. Определить магнитное поле цилиндрического соленоида, поперечное сечение которого — ограниченная область Ω (см. задачу 1.432).

Часть пространства, ограниченная цилиндрической поверхностью, заполнена средой с магнитной проницаемостью $\mu = \infty$, поперечное сечение поверхности xOy представляет собой область Ω . Магнитная проницаемость остальной части $\mu = 1$. Параллельно образующей расположен прямой ток $(z_0; J)$, где $z_0 \notin \overline{\Omega}$ — след тока на плоскости xOy . В задачах 7.460–7.463 найти магнитное поле тока; в задачах 7.465–7.478 определить силу, действующую на единицу длины тока.

7.460. Область Ω — внешность угла $(0 < \varphi < \alpha < 2\pi)$, $z_0 = r_0 e^{i\frac{\alpha}{2}}$.

7.461. Область Ω — полуплоскость без полукруга (рис. 7.27); вне Ω расположен ток $(ih; J)$. Найти комплексный потенциал магнитного поля.

7.462. В среде имеется зазор, ограниченный плоскостями $y = \pm H$, внутри которого параллельно плоскостям, на одинаковом расстоянии от них находится прямой ток J .

7.463. В среде имеется зазор, поперечное сечение которого — полуполоса $(0 < x, |y| < h)$; $z_0 = a > 0$.

7.464. В среде имеется цилиндрическая полость $(x^2 + y^2 < r_0^2)$, внутри которой расположены токи $(d_1; -J)$ и $(d_2; J)$, где $0 < d_1 < d_2 < r_0$. Найти комплексный потенциал магнитного поля в полости.

7.465. Область Ω — полуплоскость $(y < 0, z_0 = x_0 + ih, h > 0)$.

7.466. Ток $(-d; J)$, $d > 0$, расположен вне угла $\Omega = \{x, y: 0 < x, 0 < y\}$.

7.467. Область Ω — внешность угла $(0 < \varphi < \alpha < 2\pi)$, внутри которого находится точка $z_0 = r_0 e^{i\varphi_0}$.

7.468. Расстояние тока J от плоскости $(y = H)$ (см. задачу 7.462) равно $H - h$, $|h| < H$.

7.469. Определить силу, действующую на единицу длины тока, при условиях задачи 7.463.

7.470. Параллельно цилиндру, радиус которого r_0 , на расстоянии d от оси расположен прямой ток J .

7.471. Прямой ток ($d > a$; J) расположен параллельно эллиптическому цилиндру $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, a > b\right)$.

7.472. Решить предыдущую задачу для тока, координаты которого $x = 0, y = d > b$.

7.473. Прямой ток (id ; J), $d > r_0$, параллелен брусу, поперечное сечение которого — полукруг ($x^2 + y^2 = r_0^2, 0 < y$).

7.474. Решить предыдущую задачу для тока, координаты которого: 1) $x = 0, y = (\sqrt{2} + 1)r_0$; 2) $x = 0, y = -r_0$.

7.475. Поперечное сечение цилиндра представляет собой пересечение двух кругов с центрами в точках $O_1(0, h_1)$ и $O_2(0, -h_2)$, где $h_1 = h_2 = a$, а длина общей хорды равна $2a$. Вне цилиндра параллельно оси расположен ток (d ; J), $d > a$.

7.476. Решить предыдущую задачу для тока, координаты которого $x = 0, y = d > a(\sqrt{2} - 1)$.

7.477. В среде имеется цилиндрическая полость, радиус которой r_0 . Внутри полости параллельно оси расположены прямые токи $(-d$; $J)$ и $(d$; $J)$. Какая сила действует на единицу длины тока $-J$?

7.478. Решить предыдущую задачу для токов: 1) $(0; -J), (d; J), 0 < d < r_0$; 2) $(-d; -J), (id; J), 0 < d < r_0$.

Пример 7.24. Потенциальное движение жидкости, обусловленное источниками. Поле скоростей плоского течения идеальной несжимаемой жидкости определяется комплексным потенциалом

$$w = u + iv,$$

где u — потенциальная функция, а v — функция тока. Семейства эквипотенциальных линий $u = C_1$ и линий тока $v = C_2$ ортогональны (пример 7.6). Скорость течения $V = \nabla \bar{w}'$.

Изотропный источник помещен в точку z_0 , его обильность (количество жидкости, вытекающей в единицу времени) — q : обозначение $(z_0; q)$. Источник $(z_0; -q)$ называется стоком. В гидродинамике идеальной несжимаемой жидкости полагают плотность $\rho = 1$, стало быть, величина q равна потоку скорости через контур $L = \partial\Omega$, где Ω — ограниченная область, которой принадлежит точка z_0 , n — внешняя нормаль к L . Комплексный потенциал поля скоростей (см. пример 7.7 и формулу (7.16))

$$w(z) = \frac{q}{2\pi} \ln(z - z_0).$$

Изотропный вихрь находится в точке z_0 , его интенсивность (циркуляция скорости по замкнутому контуру $L = \partial\Omega$) равна Γ , обход контура считается положительным, $z_0 \in \Omega$: обозначение $(z_0; \Gamma)$. Комплексный потенциал поля скоростей (см. пример 7.23 и формулу (7.16))

$$w(z) = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln(z - z_0).$$

Источник $(z_0; q)$ и вихрь $(z_0; \Gamma)$, расположенные в одной точке, образуют вихресточник обильности q , интенсивности Γ : обозначение $(z_0; q, \Gamma)$. Комплексный потенциал поля скоростей вихресточника

$$w(z) = \frac{\Gamma + iq}{2\pi i} \ln(z - z_0).$$

Слияние двух источников $(z_0; q, \Gamma)$ и $(z_0 + \Delta z; -q, -\Gamma)$ при $\Delta z \rightarrow 0$ и при постоянном произведении $\frac{\Gamma + iq}{2\pi i} = p$ образует диполь с моментом p : обозначение $(z_0; p)$. Комплексный потенциал поля скоростей

$$\begin{aligned} w(z) &= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Gamma + iq}{2\pi i} (\ln(z - z_0) - \ln(z - z_0 - \Delta z)) = \\ &= \frac{p}{2\pi} \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\ln(z - z_0) - \ln(z - z_0 - \Delta z)}{\Delta z} = \frac{p}{2\pi(z - z_0)}. \end{aligned}$$

Вектор p направлен от положительного источника к отрицательному.

Слияние двух диполей $(z_0; p)$ и $(z_0 + \Delta z; -p)$ образует квадруполь и т. д. Мультиполь $(z_0; p_{2k})$ порядка $2k$ образуется слиянием мультиполей $(z_0; p_{2k-2})$ и $(z_0 + \Delta z; -p_{2k-2})$. Комплексный потенциал (см. задачу 7.480)

$$w = \frac{p_{2k}}{2\pi(z - z_0)^k}.$$

Значению $k = 1$ соответствует потенциал диполя. В приведенных выражениях для комплексных потенциалов опущена аддитивная постоянная.

Если в ограниченной области Ω с кусочно-гладкой границей находится n источников $(z_k; q_k, \Gamma_k)$, $k = 1, 2, \dots, n$, обильность

которых $q = \sum_{k=1}^n q_k$, интенсивность $\Gamma = \sum_{k=1}^n \Gamma_k$, то

$$\Gamma = \operatorname{Re} \int_L \bar{V} dz = \operatorname{Re} \int_L w' dz,$$

$$q = \operatorname{Re} \int_L \bar{V}(-i) dz = \operatorname{Im} \int_L \bar{V} dz = \operatorname{Im} \int_L w' dz.$$

Следовательно,

$$\Gamma + iq = \int_L w' dz = 2\pi i \sum_{k=1}^n \operatorname{res} w'(z_k),$$

откуда

$$\Gamma = \sum_{k=1}^n a_k, \quad q = \sum_{k=1}^n b_k,$$

где a_k — вещественная часть вычета, а b_k — мнимая часть вычета функции $w'(z)$ в точке z_k .

В окрестности полюса z_0 функция $w'(z)$ представима рядом Лорана, так что (после интегрирования)

$$w(z) = \frac{c_{-n}}{(z - z_0)^n} + \dots + \frac{c_{-1}}{z - z_0} + c_0 \ln(z - z_0) + c_1(z - z_0) + \dots$$

Гидродинамическая интерпретация этого разложения: в точке z_0 расположены мультиполи порядка $2k$ с моментами $p_{2k} = 2\pi c_{-k}$, $k = 1, 2, \dots, n$, и вихреисточник с $\Gamma + iq = 2\pi i c_0$.

7.479. Найти комплексный потенциал течения, обусловленного источниками $(i; q, \Gamma)$, $(-i; p)$; скорость течения на бесконечности $V e^{i\alpha}$.

7.480. Найти комплексный потенциал течения, обусловленного мультиполем $(z_0; p_{2k})$

7.481. Найти линии тока течения, образованного источниками $(-i; q)$, $(i; q)$, $(0; -q)$.

7.482. Течение обусловлено источниками $(r_0; q)$, $(r_0 e^{\frac{2\pi i}{3}}; q)$, $(r_0 e^{\frac{4\pi i}{3}}; q)$. Найти скорость жидкости в точках $z_1 = r_0 e^{\frac{\pi i}{3}}$ и $z_2 = \frac{r_0}{2}$.

7.483. В точке $z = 0$ находится вихреисточник; найти уравнение линий тока.

7.484. Комплексный потенциал поля скоростей течения равен $w = \ln \frac{z^2 - a^2}{z^2 + a^2}$. Найти уравнения линий тока и эквипотенциальных линий.

7.485. Функция тока $v = \ln(r^2 - 2ar \cos \varphi + a^2)$. Найти комплексный потенциал течения.

7.486. Функция тока $v = \frac{\sin 2\varphi}{r^2}$. Найти скорость течения.

7.487. Уравнение линии тока $v = x \left(1 + \frac{2}{x^2 + y^2} \right)$. Найти скорость течения в точке $z = 1 + i$.

7.488. Комплексный потенциал $w = \ln(z^2 + r_0 z + z^2)$. Описать источники. Получить уравнение линий тока.

7.489. Комплексный потенциал $w = \ln \left(z - \frac{1}{z^2} \right)$. Каковы источники?

7.490. Найти комплексный потенциал течения, образованного вихреисточниками $\left(e^{\frac{2\pi k i}{n}}; q, \Gamma \right)$, $k = 0, 1, \dots, n-1$.

7.491. Комплексный потенциал течения $w = 2i \ln(z^2 + a^2)$. Найти циркуляцию скорости по окружности $(|z + a| = 2a, a > 0)$.

7.492. Комплексный потенциал течения $w = (2 + 3i) \ln(z^2 + 2) + (i - 1) \ln(z^2 - 3) + \frac{4}{z}$. Найти поток скорости через окружность $(|z| = 2)$ и циркуляцию скорости по этой окружности.

7.493. Комплексный потенциал течения $w = \ln \operatorname{sh} \pi z$. Найти поток скорости через окружность $2|z| = 3$ и циркуляцию скорости по этой окружности.

7.494. Комплексный потенциал течения $w = \ln \sin z$. Найти поток скорости через контур $\left(\left| z + \frac{\pi}{2} \right| + \left| z - \frac{3\pi}{2} \right| = 2\pi \right)$ и циркуляцию скорости по этому контуру.

7.495. Найти комплексный потенциал течения, образованного системой источников $(kai; q)$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$.

7.496. Найти комплексный потенциал течения, источниками которого являются диполи $(kai; p)$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$.

7.497. В плоско-параллельный поток жидкости, скорость которой $V_0 > 0$, внесен точечный источник $(0; q)$. Найти уравнения:

1) линий тока, выходящих из источника; 2) остальных линий тока. 3) Указать область, в которой находятся все линий тока, выходящие из источника, и только они. Дать графическое изображение течения.

Пример 7.25. В круге $\{x, y: x^2 + y^2 < r_0^2\}$ находится точечный вихрь $(z_1; \Gamma)$, $z_1 = r_1 e^{i\varphi_1}$. Найти комплексный потенциал течения.

Комплексный потенциал точечного вихря $(0; \Gamma)$ в $\mathbb{R}^2$ (см. пример 7.23 и формулу (7.16))

$$w(z) = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln z + C;$$

линиями тока течения в этом случае являются окружности ($|z| = C$). Замена какой-либо окружности ($|z| = r$) непроницаемой границей не изменит течения в круге ($|z| < r$). Поэтому, если в предложенной задаче $z_1 = 0$, то комплексный потенциал

$$w(z) = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln z + C, \quad |z| < r_0.$$

Если $z_1 \neq 0$, то конформное отображение

$$\zeta = \frac{r_0 e^{i\alpha}}{r_1} \frac{z - z_1}{z - \frac{r_0^2}{\bar{z}_1}}$$

преобразует круг ($|z| < r_0$) в круг ($|\zeta| < 1$), в центр которого переходит точка z_1 . Следовательно, комплексный потенциал

$$w(z) = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln \zeta(z) + C = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln \frac{z - z_1}{z - \frac{r_0^2}{\bar{z}_1}} + C, \quad |z| < r_0.$$

Исходя из вида комплексного потенциала можно заключить, что такое же течение в круге ($|z| < r_0$) создают два источника: данный и его изображение (относительно окружности) $\left(\frac{r_0^2}{\bar{z}_1}; -\Gamma\right)$.

7.498. В круге $\{x, y: x^2 + y^2 < r_0^2\}$ находится точечный вихрь $(d; \Gamma)$, $d < r_0$. Найти скорость течения на окружности ($|z| = r_0$).

7.499. Определить комплексный потенциал течения в полуплоскости $y > 0$, обусловленного точечным вихрем $(ih; \Gamma)$, $h > 0$. Установить закон изображения источника относительно прямой ($y = 0$). Найти скорость на границе $y = 0$ течения.

7.500. Точечный вихрь $(z_1; \Gamma)$ расположен вне окружности $(|z| = r_0)$. Найти комплексный потенциал течения. Можно ли решить задачу методом изображений?

7.501. Точечный вихрь $(ih; \Gamma)$ расположен в полуплоскости с выступом (рис. 7.27). Определить комплексный потенциал течения.

7.502. В z -плоскости с разрезом по положительной части вещественной оси находится точечный вихрь $(-d; \Gamma)$, $d > 0$. Найти скорость течения на верхнем $(x + i0)$ и нижнем $(x - i0)$ берегах разреза.

7.503. Построить течение в области $\Omega = \{r, \varphi: 0 < r, 0 < \varphi < \alpha < 2\pi\}$, вызванное точечным вихрем $(r_1 e^{i\frac{\alpha}{2}}; \Gamma)$.

7.504. Методом конформных отображений найти комплексный потенциал течения в полосе $(0 < y < H)$ с источником $(ih; \Gamma)$, где $0 < h < H$.

7.505. Решить предыдущую задачу методом изображений.

7.506. Найти комплексный потенциал течения в полуполосе $\Omega = \{x, y: 0 < x, 0 < y < H\}$, созданного источником $(z_0; \Gamma)$, $z_0 \in \Omega$.

7.507. В области Ω действует вихреисточник $(z_1; q, \Gamma)$. Найти комплексный потенциал течения, если Ω : 1) полуплоскость $(y > 0)$; 2) внешность круга $(|z| > r_0)$; 3) полуплоскость без полукруга (рис. 7.27); 4) полоса $(0 < y < H)$.

7.508. Построить течение в круге $(|z| < r_0)$ с двумя вихреисточниками: 1) $(z_1; q, \Gamma)$, $(z_2; -q, -\Gamma)$, $z_1 \neq z_2$, $z_1 z_2 \neq 0$; 2) $(0; q, \Gamma)$, $(z_1; -q, -\Gamma)$, $z_1 \neq 0$.

7.509. В области Ω действует точечный диполь $(z_1; p)$. Найти комплексный потенциал течения, если Ω : 1) полуплоскость $(y > 0)$; 2) угол $\{r, \varphi: 0 < r, 0 < \varphi < \alpha < 2\pi\}$, $z_1 = r_1 e^{i\frac{\alpha}{2}}$; 3) круг $(|z| < r_0)$; 4) внешность круга $(|z| > r_0)$; 5) полоса $(0 < y < H)$.

7.510. Решить задачу 7.509, п. 5) методом изображений

Пример 7.26. Обтекание круга. Бесконечный цилиндр находится в плоско-параллельном потоке идеальной несжимаемой жидкости, скорость которой перпендикулярна оси цилиндра (рис. 7.34). Поперечное сечение цилиндра — круг B , радиус которого r_0 , внешность круга — область Ω . Считая течение безвихревым $(\forall z \in \Omega: \operatorname{rot} V = 0)$, а обтекание полным, определить

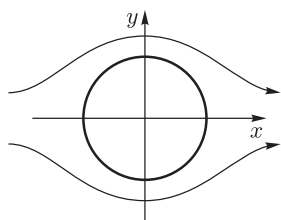


Рис. 7.34

комплексный потенциал потока, если $V(\infty) = V_0 > 0$, а циркуляция скорости по любому кусочно-гладкому контуру, охватывающему круг B , равна Γ . Для бесциркуляционного обтекания (т. е. при $\Gamma = 0$) найти давление на поверхности цилиндра, если $P(\infty) = P_0$.

Течение жидкости в области Ω описывается системой уравнений (7.14), (7.15).

Условия (7.14) гарантируют существование комплексного потенциала $w(z)$ поля скоростей $V = \overline{w}'$. Пусть $L \in \Omega$ — кусочно-гладкий замкнутый контур, тогда

$$\Gamma = \operatorname{Re} \int_L \overline{V} dz, \quad N = \operatorname{Re} \int_L \overline{V}(-i dz) = \operatorname{Im} \int_C \overline{V} dz.$$

Эти два выражения можно объединить:

$$\Gamma + i N = \int_L \overline{V} dz = \int_L w'(z) dz.$$

Скорость $V(z)$ — однозначная в Ω функция, предел которой при $z \rightarrow \infty$ равен V_0 , поэтому $w'(z) = \overline{V}(z)$ — однозначная аналитическая функция в той же области, имеющая на бесконечности устранимую особую точку. Следовательно, ряд Лорана этой функции в окрестности $z = \infty$ не содержит положительных степеней, т. е.

$$w'(z) = \overline{V}(\infty) + \frac{a_{-1}}{z} + \frac{a_{-2}}{z^2} + \dots$$

Коэффициент

$$a_{-1} = \frac{1}{2\pi i} \int_{|z|=r>r_0} w'(z) dz = \frac{1}{2\pi i} (\Gamma + i N).$$

Так как в Ω источников нет, то $N = 0$, и для функции $w(z)$ получается разложение

$$w(z) = \overline{V}(\infty) z + a_0 + \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln z - \frac{a_{-2}}{z} - \dots \quad (7.37)$$

В точках контура $\partial\Omega$ скорость направлена по касательной к контуру, следовательно, $\partial\Omega$ принадлежит семейству линий тока

$$\operatorname{Im} w|_{\partial\Omega} = \text{const.} \quad (7.38)$$

Таким образом, комплексный потенциал $w(z)$ является аналитической в области Ω функцией, имеющей в окрестности точки $z = \infty$ разложение (7.37) и удовлетворяющей условию (7.38).

Поток, обтекающий цилиндр, есть суперпозиция двух потоков. Один из них — только циркуляционный, т.е. такой, для которого разложение (7.37) сводится к

$$w_1(z) = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln z;$$

функция $w_1(z)$ удовлетворяет условию (7.38) на окружности $\partial\Omega$ и, следовательно, является комплексным потенциалом. Второй поток бесциркуляционный. Так как $\Gamma = 0$, то разложение (7.37) представляет собой однозначную аналитическую в области Ω функцию $w_2(z)$, которая при условии (7.38) конформно отображает внешность круга на внешность отрезка, параллельного вещественной оси плоскости (w_2), и удовлетворяет условиям (они вытекают из (7.37))

$$w(\infty) = \infty, \quad w'(\infty) = \overline{V}(\infty). \quad (7.39)$$

В данном случае V_0 — вещественное число и $w_2(z)$ выражается через функцию Жуковского

$$w_2(z) = B \left(\frac{z}{r_0} + \frac{r_0}{z} \right),$$

которая удовлетворяет первому условию (7.39). Второе условие

$$V_0 = \lim_{z \rightarrow \infty} B \left(\frac{1}{r_0} - \frac{r_0}{z^2} \right)$$

выполняется, если $B = r_0 V_0$, так что

$$w_2(z) = V_0 \left(z + \frac{r_0^2}{z} \right).$$

Резльтирующий комплексный потенциал (с точностью до аддитивной постоянной)

$$w(z) = V_0 \left(z + \frac{r_0^2}{z} \right) + \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln z.$$

Если $\Gamma = 0$, то поле скоростей

$$V = \overline{w'} = V_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{\bar{z}^2} \right) = V_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} e^{2i\varphi} \right).$$

Давление жидкости на поверхности цилиндра выражается формулой (см. пример 7.15)

$$P(\varphi) = P_0 + \frac{\rho_0 V_0^2}{2} \left(1 - |1 - e^{2i\varphi}|^2 \right) = P_0 + \frac{\rho_0 V_0^2}{2} (4 \cos^2 \varphi - 3).$$

7.511. Идеальная несжимаемая жидкость обтекает круг B , радиус которого r_0 . Скорость жидкости на бесконечности $V(\infty) = V_0 e^{i\alpha}$, $V_0 > 0$, циркуляция скорости по любому замкнутому кусочно-гладкому контуру, охватывающему B , равна Γ . Построить комплексный потенциал потока.

7.512. При условиях предыдущей задачи найти точки, называемые критическими точками потока, в которых скорость равна нулю. Показать, что в зависимости от величины циркуляции Γ существует либо одна критическая точка (находящаяся вне B), либо две точки (расположенные на ∂B), в одной из которых (точке ветвления) линия тока разветвляется на две, а в другой (точке схода) обе линии сходятся. Показать, что между величиной Γ и координатами точки схода $z_2 = r_0 e^{i\varphi_2}$ имеется зависимость

$$\Gamma = 4\pi V_0 r_0 \sin(\varphi_2 - \alpha). \quad (7.40)$$

7.513. Безвихревой поток идеальной несжимаемой жидкости обтекает простой кусочно-гладкий замкнутый контур, внешность которого — область Ω . Скорость жидкости на бесконечности $V(\infty) = V_0 e^{i\alpha}$, $V_0 > 0$, и точка схода потока z_2 заданы. Показать, что комплексный потенциал поля скоростей жидкости

$$w(z) = \overline{V}(\infty) \zeta(z) + \frac{V(\infty) R_0^2}{\zeta(z)} + \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln \zeta(z) + C,$$

где функция $\zeta(z)$ конформно отображает область Ω на внешность круга, радиус которого R_0 ,

$$\zeta(\infty) = \infty, \quad \zeta'(\infty) = 1; \quad (7.41)$$

величина R_0 определена условиями (7.41), циркуляция выражается формулой (см. (7.40)) $\Gamma = 4\pi V_0 R_0 \sin(\theta - \alpha)$, в которой (R_0, θ) — координаты образа точки z_2 .

7.514. Неподвижный цилиндр, поперечное сечение которого есть полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), находится в бесциркуляционном потоке жидкости, перпендикулярном оси цилиндра.

Найти скорость жидкости на поверхности цилиндра, если: 1) $V(\infty) = V_0$; 2) $V(\infty) = V_0 i$.

7.515. Неподвижный цилиндр, поперечное сечение которого есть пересечение двух кругов с центрами в точках $O_1(0; a)$, $O_2(0; -a)$, длина общей хорды которых $2a$, находится в бесциркуляционном потоке жидкости, перпендикулярном оси цилиндра. Определить скорость потока в точках поверхности цилиндра, если: 1) $V(\infty) = V_0$; 2) $V(\infty) = V_0 i$.

7.516. Бесциркуляционный поток идеальной несжимаемой жидкости обтекает полосу, поперечное сечение которой плоскостью xOy — отрезок ($|x| \leq a$, $y = 0$). Построить комплексный потенциал поля скоростей жидкости, если $V(\infty) = V_0 e^{i\alpha}$, где $V_0 > 0$. Какова скорость потока в точке 1 с координатами $(x_0, 0 + i0)$ и в точке 2 — $(x_0, 0 - i0)$, где $|x_0| < a$?

7.517. Цилиндрическая поверхность, поперечное сечение которой — дуга окружности $(x^2 + (y + r_0 \cos \beta)^2 = r_0^2, y > 0, 0 < \beta < \frac{\pi}{2})$, находится в бесциркуляционном потоке идеальной несжимаемой жидкости. Найти скорость жидкости в точках поверхности, если: 1) $V(\infty) = V_0$; 2) $V(\infty) = V_0 i$.

7.518. Эллиптический цилиндр помещен в бесциркуляционный поперечный поток жидкости, скорость которого перпендикулярна оси цилиндра. Построить комплексный потенциал поля скоростей потока, если $V(\infty) = V_0 e^{i\alpha}$, $V_0 > 0$. Определить давление на поверхности цилиндра при условии $P(\infty) = P_0$.

7.519. Идеальная несжимаемая жидкость обтекает простой кусочно-гладкий замкнутый контур L . Считая течение безвихревым, вывести формулу Чаплыгина для полной силы P , действующей на контур L (т.е. на единицу длины цилиндра, поперечное сечение которого ограничено контуром L):

$$\bar{P} = \frac{\rho i}{2} \int_L |w'|^2 dz. \quad (7.42)$$

7.520. Какая сила действует на окружность ($|z - a| = a$), находящуюся в потоке, комплексный потенциал которого:

$$1) w(z) = \frac{N}{2\pi} \ln(z^2 - a^2); \quad 2) w(z) = -\frac{\Gamma}{2\pi i} \ln \frac{z-a}{z+a}?$$

7.521. В трубе, поперечным сечением которой является эксцентрическое кольцо (рис. 7.29), течет идеальная несжимаемая жидкость в направлении, перпендикулярном оси трубы; циркуляция скорости на каждой из окружностей, ограничивающих внутренний контур, равна Γ . Определить силу, действующую на единицу длины (вдоль оси) внутренней поверхности трубы.

7.522. Простой кусочно-гладкий замкнутый контур L находится в безвихревом потоке идеальной несжимаемой жидкости, скорость которой на бесконечности $V_0 e^{i\alpha}$, $V_0 > 0$, а циркуляция скорости по любому замкнутому контуру, охватывающему L , равна Γ . Доказать теорему Жуковского о подъемной силе P , действующей на контур L :

$$P = -i\rho\Gamma V_0.$$

7.523. Крыло находится в плоскопараллельном потоке идеального газа. Расчет подъемной силы крыла проводится при следующих предположениях (в системе отсчета, связанной с крылом).

1. Крыло трактуется как неограниченный цилиндр с образующей, перпендикулярной скорости потока.

2. При дозвуковых скоростях воздух считается идеальной несжимаемой жидкостью, а его движение — безвихревым; скорость потока на бесконечности $V_0 e^{i\alpha}$, $V_0 > 0$.

3. Для профиля (поперечного сечения крыла) с острой кромкой ставится условие Чаплыгина: точка схода находится на острие (отсюда следует ограниченность скорости у острия).

Найти подъемную силу, действующую на единицу длины полосы, поперечное сечение которой — отрезок $(-a \leq x \leq a)$; условие Чаплыгина поставить в точке $x = a$.

7.524. Бесконечно длинная полоса, поперечное сечение которой — отрезок $(-a \leq x \leq a)$ оси Ox , находится в плоскопараллельном потоке идеального газа. При условиях предыдущей задачи определить поле скоростей газа, полагая, что точка с координатами $(x = -a, y = 0)$ является точкой схода. Какова скорость газа на поверхности полосы?

7.525. Функция $\zeta = z + \sqrt{z^2 - a^2}$ отображает окружность L_{1z} с центром в т. O_1 в дугу $L_{1\zeta}$ окружности с центром в т. O , а окружность L_{2z} с центром O_2 , $|\overline{O_1 O_2}| = d$, касательную к L_{1z} в точке $z = a$, — в замкнутый контур $L_{2\zeta}$, называемый профилем Жуковского (рис. 7.35.) В предположениях задачи 7.523 вычислить подъемную силу, действующую на профиль Жуковского.

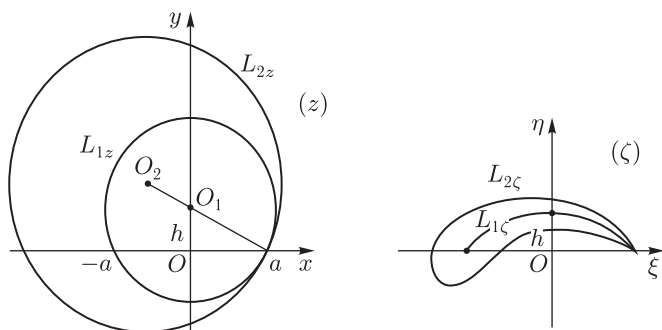


Рис. 7.35

7.526. При условиях задачи 7.523 вычислить подъемную силу, действующую на единицу длины изогнутой полосы, поперечное сечение которой — дуга окружности $\left(x^2 + (y + r_0 \cos \beta)^2 = r_0^2, y > 0, 0 < \beta < \frac{\pi}{2}\right)$; в качестве точки схода взять точку с координатами $x = r_0 \sin \beta, y = 0$.

7.527. При условиях задачи 7.523 найти подъемную силу, действующую на единицу длины цилиндра, поперечное сечение которого — полуокруг ($r \leq r_0, 0 \leq \varphi \leq \pi$); в качестве точки схода взять точку с координатами $x = r_0, y = 0$.

7.528. При условиях задачи 7.523 найти подъемную силу, действующую на единицу длины цилиндра, поперечное сечение которого — пересечение двух кругов с центрами в точках $O_1(0; -a)$ и $O_2(0; a)$, длина общей хорды которых $2a$; в качестве точки схода взять точку с координатами $x = a, y = 0$.

7.529. Решить задачу об обтекании параболы $y^2 = 2px$ потоком, параллельным оси Ox , скорость которого на бесконечности V_0 (жидкость занимает область $2px < y^2$). Найти скорость жидкости в точках параболы.

7.530. Проводящий цилиндр, радиус которого r_0 , помещен в поперечное электростатическое поле E_0 . Найти комплексный потенциал результирующего поля и плотность заряда на цилиндре.

7.531. Проводящий цилиндр, поперечное сечение которого есть ограниченная область Ω с кусочно-гладкой границей, внесен

в поперечное электростатическое поле $E_0 e^{i\alpha}$, $E_0 > 0$. Показать, что комплексный потенциал результирующего поля

$$w(z) = -i \left[\overline{E}(\infty) \zeta(z) - \frac{E(\infty) R^2}{\zeta(z)} \right] + C,$$

где функция $\zeta(z)$ конформно отображает внешность области Ω на внешность круга, радиус которого R ,

$$\zeta(\infty) = \infty, \quad \zeta'(\infty) = 1, \quad (7.43)$$

величина R определена условиями (7.43).

7.532. Показать, что при условиях предыдущей задачи плотность заряда на цилиндрической поверхности

$$\sigma(z) = \frac{|\zeta'|}{2\pi} \operatorname{Re}(\overline{\zeta} E(\infty)), \quad z \in \partial\Omega.$$

7.533. Длинная металлическая полоса, поперечное сечение которой — отрезок ($|x| < a$, $y = 0$), помещена в поперечное электростатическое поле $E_0 e^{i\alpha}$, $E_0 > 0$. Найти комплексный потенциал результирующего поля и плотность заряда на полосе.

7.534. Цилиндрическая поверхность ($x^2 + y^2 = r_0^2$, $y > 0$) внесена в поперечное электростатическое поле E_0 , направленное по оси: 1) Ox ; 2) Oy . Определить плотность заряда σ_1 и σ_2 соответственно на вогнутой и выпуклой сторонах поверхности, полный заряд q_1 и q_2 (на единицу длины вдоль оси) на каждой стороне и указать участки, где заряд сохраняет знак.

7.535. Проводящий эллиптический цилиндр $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1\right)$ внесен в поперечное электростатическое поле $E_0 e^{i\alpha}$, $E_0 > 0$. Найти комплексный потенциал результирующего поля и плотность заряда на цилиндре.

7.536. Проводящий цилиндр, поперечное сечение которого полукруг ($r < r_0$, $0 < \varphi < \pi$), внесен в однородное электростатическое поле $E_0 e^{i\alpha}$, где $E_0 > 0$, перпендикулярное оси цилиндра. Найти плотность заряда на цилиндре, если: 1) $\alpha = 0$; 2) $\alpha = \pi/2$.

7.537. Проводящий цилиндр, поперечное сечение которого — пересечение двух кругов с центрами в точках $O_1(0; a)$ и $O_2(0; -a)$, длина общей хорды которых $2a$, внесен в однородное электростатическое поле $E_0 e^{i\alpha}$, $E_0 > 0$, перпендикулярное оси цилиндра. Определить плотность заряда на поверхности цилиндра, если: 1) $\alpha = 0$; 2) $\alpha = \pi/2$.

7.538. Длинный цилиндр, изготовленный из железа, внесен в однородное магнитное поле H_0 , перпендикулярное к оси цилиндра. Определить результирующее магнитное поле, если радиус цилиндра r_0 , а его магнитная проницаемость $\mu \gg 1$.

7.539. Длинный эллиптический цилиндр $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1\right)$ изготовленный из железа (магнитная проницаемость $\mu \gg 1$), внесен в однородное магнитное поле $H_0 e^{i\alpha}$, $H_0 > 0$, перпендикулярное к оси цилиндра. Определить напряженность магнитного поля на поверхности цилиндра.

7.4. Ответы

7.1. Р е ш е н и е. Согласно теореме Римана существует конформное отображение $z_1 = z_1(z)$, которое отображает область Ω_z на единичный круг; при этом на одной из связных частей границы круга $\text{Im } z_1 = v_1$, а на другой — $\text{Im } z_1 = v_2$. С помощью дробно-линейного отображения $z_2 = z_2(z_1)$ можно круг преобразовать в полуплоскость $\text{Im } z_2 > 0$ так, что $\text{Im } z_2 = v_2$, если $\text{Re } z_2 < 0$ и $\text{Im } z_2 = v_1$, если $\text{Re } z_2 > 0$. Построение конформного отображения завершается применением логарифмической и линейной функций.

Пусть есть два отображения w и w_1 . Функция $W = w - w_1$ непрерывна в Ω_z , а ее мнимая часть $\text{Im } W = \text{Im } (U + iV) = V$ непрерывна в $\overline{\Omega}_z$ и равна нулю на границе области. Так как V — гармоническая функция, то она тождественно равна нулю в Ω_z . Из условий Коши–Римана следует, что U равна константе в Ω_z , поэтому $w = w_1 + C$, $\text{Im } C = 0$.

7.2. У к а з а н и е. При конформном отображении $\zeta(z) = \xi(x, y) + i\eta(x, y)$ происходит замена переменных $\xi = \xi(x, y)$, $\eta = \eta(x, y)$. См. также пример 7.8.

7.3. У к а з а н и е. Функция $V = v_1 - v_2$ — разность двух решений, удовлетворяет уравнению Лапласа и нулевым условиям на границе области, а соответствующий комплексный потенциал $W = U + iV$ — аналитическая функция в $\overline{\Omega}$, производная которой $W'|_{\partial\Omega} = 0$.

7.4. $v(r, \varphi) = \frac{v_2 - v_1}{\alpha} \varphi + v_1.$

7.5. Цилиндрическая поверхность, сечение которой плоскостью xOy — окружность, $r = \frac{4r_1 r_2}{r_1 + r_2} \cos \varphi.$

7.6, 7.7. $v(r, \varphi) = v_1 + \frac{v_2 - v_1}{\pi} \text{arctg} \frac{2rr_0 \sin \varphi}{|r^2 - r_0^2|}.$

7.8. $v(r, \varphi) = v_1 + \frac{2(v_2 - v_1)}{\pi} \text{arctg} \frac{2rr_0 \sin \varphi}{r_0^2 - r^2}.$

7.9. $v(r, \varphi) = \frac{4(v_1 - v_2)}{3\pi} \text{arctg} \frac{r(r + \sqrt{2}r_0 \sin \varphi)}{r_0(r_0 + \sqrt{2}r \sin \varphi)} + \frac{4v_2 - v_1}{3}.$

7.10. $v(r, \varphi) = \frac{v_0}{\pi} \text{arctg} \frac{r_0^4 + r^4 - 2rr_0(r_0^2 + r^2) \cos \varphi + 2r_0^2 r^2 \cos 2\varphi}{2rr_0(r_0^2 - r^2 \sin \varphi)}.$

7.11. $v(r, \varphi) = \frac{2v_0}{\pi} \text{arctg} \frac{2r^2 r_0^2 \sin 2\varphi}{r_0^4 - r^4}.$

$$7.12. \quad v(x, y) = \frac{1}{\operatorname{arctg} \frac{84}{13}} \left[(v_1 - v_2) \operatorname{arctg} \frac{2ay}{a^2 - x^2 - y^2} + v_1 \operatorname{arctg} \frac{8}{15} + v_2 \operatorname{arctg} \frac{4}{3} \right].$$

$$7.13. \quad v(x, y) = \frac{1}{\operatorname{arctg} \frac{57}{44}} \left[(v_1 - v_2) \operatorname{arctg} \frac{2ay}{a^2 - x^2 - y^2} - v_1 \operatorname{arctg} \frac{12}{35} - v_2 \operatorname{arctg} \frac{3}{4} \right].$$

$$7.14. \quad q(r_0, \varphi) = \frac{kv_0}{\pi r_0} \frac{\sin^2 \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}}{\sin \frac{\alpha + \varphi}{2} \sin \frac{\alpha - \varphi}{2}} e^{i\varphi}.$$

$$7.15. \quad v(r, \varphi) = v_1 + \frac{v_2 - v_1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{r^2 + r_0^2 - 2\sqrt{2}rr_0 \cos \varphi}{r^2 - r_0^2}.$$

$$7.16. \quad v(r, \varphi) = \frac{2(v_1 - v_2)}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2rr_0 \sin \varphi}{r^2 - r_0^2}.$$

$$7.17. \quad v(r, \varphi) = v_2 + \frac{v_1 - v_2}{\alpha} \operatorname{arctg} \frac{(r^2 + r_0^2) \cos \alpha + 2rr_0 \sin \varphi}{(r^2 - r_0^2) \sin \alpha}.$$

$$7.18. \quad v(r, \varphi) = \frac{2(v_2 - v_1)}{3\pi} \operatorname{arctg} \frac{r^2 - r_0^2}{2rr_0 \sin \varphi} +$$

$$+ \begin{cases} v_1, & 0 < \varphi < \pi, \\ \frac{v_1 + 2v_2}{3}, & \pi < \varphi < 2\pi. \end{cases}$$

$$7.19. \quad v(r, \varphi) = v_2 + \frac{2(v_1 - v_2)}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} r^{\frac{\pi}{\alpha}} \sin \frac{\pi \varphi}{\alpha}}{r_0^{\frac{2\pi}{\alpha}} - r^{\frac{2\pi}{\alpha}}}.$$

$$E(r, \alpha) = \frac{4(v_1 - v_2)r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} r^{\frac{\pi}{\alpha} - 1}}{\alpha(r_0^{\frac{2\pi}{\alpha}} - r^{\frac{2\pi}{\alpha}})} i e^{i\alpha}.$$

$$7.20. \quad v(r, \varphi) = v_1 + \frac{2(v_2 - v_1)}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} r^{\frac{\pi}{\alpha}} \sin \frac{\pi \varphi}{\alpha}}{r^{\frac{2\pi}{\alpha}} - r_0^{\frac{2\pi}{\alpha}}}.$$

$$7.21. \quad v(r, \varphi) = \frac{2(v_1 - v_2)}{3\pi} \operatorname{arctg} \frac{r^2 - r_0^2}{2rr_0 \sin \varphi} +$$

$$+ \begin{cases} v_2, & 0 < \varphi < \pi, \\ \frac{2v_1 + v_2}{3}, & \pi < \varphi < 2\pi. \end{cases}$$

$$7.22. \quad q(\varphi) = \frac{2k(v_1 - v_2)(b \cos \varphi + ia \sin \varphi)}{\pi \sin \varphi (a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi)}.$$

$$7.23. \quad q(\varphi) = \frac{2k(v_2 - v_1)(a \cos \varphi - ib \sin \varphi)}{\pi \sin \varphi (b^2 \sin^2 \varphi + a^2 \cos^2 \varphi)}.$$

$$7.24. \quad v(x, y) = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi y}{2a}}{\cos \frac{\pi x}{2a}}.$$

$$7.25. \quad v(x, y) = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\operatorname{th} \frac{\pi x}{H} \operatorname{ctg} \frac{\pi y}{H} \right).$$

$$7.26. v(x, y) = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\operatorname{th} \frac{\pi x}{2H} \operatorname{tg} \frac{\pi y}{2H} \right).$$

$$7.27. 1) v = \frac{v_2 - v_1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{c \sin \beta}{a \operatorname{sh} \alpha - b \operatorname{ch} \alpha} + \frac{v_1 + v_2}{2};$$

$$2) v = \frac{v_2 - v_1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{c \cos \beta}{a \operatorname{sh} \alpha - b \operatorname{ch} \alpha} + \frac{v_1 + v_2}{2}; \quad x = c \operatorname{ch} \alpha \cos \beta, \quad y = c \operatorname{sh} \alpha \sin \beta,$$

$$\alpha_S \leq \alpha, \quad 0 \leq \beta < 2\pi, \quad \operatorname{sh} \alpha_S = \frac{b}{c}, \quad c = \sqrt{a^2 - b^2}.$$

$$7.28. 1) v = \frac{v_2 - v_1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{c \sin \beta}{b \operatorname{ch} \alpha - a \operatorname{sh} \alpha} + \frac{v_1 + v_2}{2};$$

$$2) v = \frac{v_2 - v_1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{c \cos \beta}{b \operatorname{ch} \alpha - a \operatorname{sh} \alpha} + \frac{v_1 + v_2}{2};$$

$$x = c \operatorname{ch} \alpha \cos \beta, \quad y = c \operatorname{sh} \alpha \sin \beta, \quad 0 \leq \alpha \leq \alpha_S, \quad 0 \leq \beta < 2\pi, \quad \operatorname{sh} \alpha_S = \frac{b}{c}, \quad c = \sqrt{a^2 - b^2}.$$

$$7.29. v(r, \varphi) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{a^{\frac{\pi}{\alpha}} - r^{\frac{\pi}{\alpha}} \cos \frac{\pi \varphi}{\alpha}}{r^{\frac{\pi}{\alpha}} \sin \frac{\pi \varphi}{\alpha}}.$$

$$7.30. v(r, \varphi) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{r^{\frac{2\pi}{\alpha}} - a^{\frac{2\pi}{\alpha}}}{2r^{\frac{\pi}{\alpha}} a^{\frac{\pi}{\alpha}} \sin \frac{\pi \varphi}{\alpha}}.$$

$$7.31. v(r, \varphi) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{a^{\frac{2\pi}{\alpha}} - r^{\frac{2\pi}{\alpha}}}{2a^{\frac{\pi}{\alpha}} r^{\frac{\pi}{\alpha}} \sin \frac{\pi \varphi}{\alpha}}.$$

$$7.32. v(r, \varphi) = v_1 + \frac{2(v_2 - v_1)}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} - r^{\frac{\pi}{\alpha}}}{r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} + r^{\frac{\pi}{\alpha}}} \operatorname{tg} \frac{\pi \varphi}{2\alpha} \right).$$

$$7.33. v(r, \varphi) = \frac{v_2 - v_1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{r_0 - r}{2\sqrt{rr_0} \sin \frac{\varphi}{2}} + v_1.$$

$$7.34. v(x, y) = v_2 + \frac{v_1 - v_2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2H}}{\cos \frac{\pi y}{2H}}.$$

$$7.35. v(x, y) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi y}{2a} - \operatorname{ch} \frac{\pi H}{2a} \sin \frac{\pi x}{2a}}{\operatorname{sh} \frac{\pi H}{2a} \cos \frac{\pi x}{2a}}.$$

$$7.36. v(r, \varphi) = \frac{v_1 - v_2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{r - r_0}{2\sqrt{rr_0} \sin \frac{\varphi}{2}} + v_2.$$

$$7.37. v(y) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{y^2 - 3a^2}{2\sqrt{2}a\sqrt{y^2 - a^2}};$$

$$q(y) = \begin{cases} -\frac{2\sqrt{2}akv_0}{\pi(a^2 + y^2)\sqrt{a^2 - y^2}}, & 0 < y < a, \\ \frac{2\sqrt{2}akv_0}{\pi(a^2 + y^2)\sqrt{y^2 - a^2}}i, & a < y. \end{cases}$$

$$7.38. v(r, \varphi) = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{r_0^2 - r^2}{r_0^2 + r^2} \operatorname{ctg} \varphi \right).$$

$$7.39. v(r, \varphi) = v_2 + \frac{v_1 - v_2}{\pi} \varphi.$$

$$7.40. v(x, y) = \frac{v_1 - v_2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{x_0(x^2 + y^2) - x(x_0^2 + r_0^2) + x_0 r_0^2}{y(r_0^2 - x_0^2)} + v_2.$$

$$7.41. v(r, \varphi) = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2rr_0 \cos \varphi}{r_0^2 - r^2}.$$

$$7.42. v(r, \varphi) = \frac{v_1 - v_2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{r_0^2 + r^2 - 2rr_0(\cos \varphi + \sin \varphi)}{r_0^2 - r^2} + v_2.$$

$$7.43. v(r_0, \varphi) = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\sin(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})}{\sqrt{\sin \varphi}}, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi.$$

$$7.44. v(r, \varphi) = \frac{v_1 - v_2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2rr_0 \cos \varphi}{\sqrt{(r_0^2 + r^2)^2 - 4r^2 r_0^2 \cos^2 \varphi} \sin \psi}, \quad \psi = \operatorname{arctg} \frac{2rr_0 \sin \varphi}{r^2 - r_0^2}.$$

$$7.45. q(x) = \frac{2\pi v_0 k}{H \sqrt{1 + e^{\frac{\pi x}{H}}}} i, \quad v(x) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2 - e^{\frac{\pi x}{H}}}{2 \sqrt{e^{\frac{\pi x}{H}} - 1}}, \quad \text{температура монотонно}$$

возрастает от нуля до v_0 .

$$7.46. v(x, y) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\cos \frac{\pi y}{H} + e^{-\frac{\pi x}{H}}}{\sin \frac{\pi y}{H}}.$$

$$7.47. v(x, y) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi x}{H} + \operatorname{ch} \frac{\pi a}{H} \cos \frac{\pi y}{H}}{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{H} \sin \frac{\pi y}{H}}.$$

$$7.48. v(x, y) = -\frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\operatorname{ctg} \frac{\pi y}{H} \operatorname{th} \frac{\pi x}{H} \right).$$

$$7.49. \sigma_{1,2}(x) = \frac{v_0 \operatorname{sign} x}{2\pi^2 \sqrt{x^2 - a^2}}, \quad |x| > a.$$

$$7.50. \sigma(r) = -\frac{v_0}{2\pi\alpha} \frac{r^{\frac{\pi}{\alpha}-1}}{\sqrt{r_0^{\frac{2\pi}{\alpha}} + r^{\frac{2\pi}{\alpha}}}}.$$

$$7.51. \sigma(x) = -\frac{v_0}{2\pi H} \frac{e^{\frac{\pi x}{H}}}{\sqrt{2 \operatorname{ch} \frac{\pi x}{H}}}.$$

$$7.52. \sigma(x) = -\frac{v_0 \operatorname{ch} \frac{\pi x}{a}}{\pi H \sqrt{\operatorname{ch} \frac{\pi(x-a)}{H} \operatorname{ch} \frac{\pi(x+a)}{H}}}.$$

$$7.53. \sigma(x) = \frac{v_0}{2\pi H} \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi x}{a}}{\sqrt{\operatorname{sh} \frac{\pi(x+a)}{H} \operatorname{sh} \frac{\pi(x-a)}{H}}}.$$

$$7.54. \sigma(y) = \frac{2v_0 y}{2\pi(H^2 - h^2)\sqrt{(y^2 - h^2)(y^2 - h^2)}}.$$

$$7.55. \sigma(x) = \frac{v_0 \operatorname{ch} \frac{\pi x}{2H}}{2\pi H \sqrt{2 \operatorname{ch} \frac{\pi x}{H}}}.$$

$$7.56. \sigma(y) = \frac{v_0}{2\pi^2} \frac{H(y^2 + r_0^2)}{y\sqrt{(y^2 - H^2)(y^2 H^2 - r_0^4)}}.$$

$$7.57. \sigma_{1,2}(y) = \pm \frac{v_0}{\pi^2 \sqrt{2y^2 + 1}}, \text{ знак плюс соответствует правой ветви гиперболы, знак минус — левой.}$$

У к а з а н и е. Функция $z_1 = \frac{z + \sqrt{z^2 - 2}}{\sqrt{2}}$ конформно отображает односвязную область, ограниченную ветвями гиперболы, на сектор $\left(\frac{\pi}{4} < \arg z_1 < \frac{3\pi}{4}\right)$.

$$7.58. \sigma(y) = \frac{v_0}{\pi^2 \sqrt{y^2 + 1}}. \text{ См. указание к предыдущей задаче.}$$

$$7.59. Q_1 = \frac{4k(v_2 - v_1)}{\pi} \ln \frac{\sqrt{l^2 + h^2} + l}{h}.$$

$$7.60. Q_1 = \frac{2k(v_2 - v_1)}{\pi} \ln \frac{\sqrt{l^2 + a^2}}{a}.$$

$$7.61. Q_1 = \frac{2k(v_1 - v_2)}{\pi} \ln \frac{a_1 \left(\sqrt{a_2^2 - a_1^2} + \sqrt{l^2 + a_1^2} \right)}{\sqrt{l^2 + a_1^2} \left(\sqrt{a_2^2 - a_1^2} + a_2 \right)}.$$

$$7.62. Q_1 = \frac{v_0}{4\pi^2} \ln \left(\frac{H^2}{h^2} + \frac{H}{h} \sqrt{\frac{H^2}{h^2} - 1} \right).$$

$$7.63. Q_1 = \frac{4r(v_1 - v_2)}{\pi} \ln \frac{\sqrt{hr_0}}{h - r_0}.$$

$$7.64. Q_1 = \frac{v_0}{4\pi^2} \ln \frac{h \left(H^2 - r_0^2 \right) + \sqrt{(H^2 - h^2)(H^2 h^2 - r_0^4)}}{H \left(h^2 - r_0^2 \right)}.$$

$$7.65. Q_1 = \frac{2k(v_1 - v_2)}{\pi} \ln(\sqrt{2} - 1).$$

$$7.66. Q_1 = \frac{2k(v_1 - v_2)}{\pi} \ln \frac{r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} - a^{\frac{\pi}{\alpha}}}{r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} + a^{\frac{\pi}{\alpha}}}.$$

$$7.67. Q_1 = 0, v(x, y) = v_0.$$

$$7.68. Q_1 = \frac{2k(v_2 - v_1)}{\pi} \ln \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi(l+a)}{2H}}{\operatorname{ch} \frac{\pi(l-a)}{2H}}.$$

$$7.69. Q_1 = \frac{k(v_1 - v_2)}{\pi} \ln e^{\frac{\pi l}{2H}} \operatorname{ch} \frac{\pi l}{2H}.$$

$$7.70. Q_1 = \frac{k(v_1 - v_2)}{\pi} \ln \frac{\sqrt{e^{\frac{\pi l}{H}} + 1} + 1}{(\sqrt{2} + 1) e^{\frac{\pi l}{H}}}.$$

$$7.71. Q_1 = \frac{2k(v_1 - v_2)}{\pi} \ln \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi l}{2H} + \sqrt{\operatorname{sh}^2 \frac{\pi l}{2H} + \operatorname{ch}^2 \frac{\pi a}{2H}}}{\operatorname{ch}^2 \frac{\pi a}{2H}}.$$

$$7.72. Q_1 = \frac{v_1 - v_2}{4\pi^2} \ln(3 + 2\sqrt{2}).$$

$$7.73. Q_1 = \frac{4kv_0}{\pi} \ln \operatorname{th} \frac{\pi h}{4a}.$$

$$7.74. Q_1 = \frac{v_2 - v_1}{\pi^2} \ln 3.$$

$$7.75. Q_1 = \frac{v_0}{\pi^2} \ln \frac{\sqrt{l^2 - a^2} + l}{a}.$$

$$7.76. v(r, \varphi) = v_1 \left(1 - \frac{2\varphi}{\pi}\right) + \frac{v_2 - v_1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{a^2 - r^2 \cos 2\varphi}{r^2 \sin 2\varphi}.$$

$$7.77. v(x, y) = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\operatorname{th} \frac{\pi x}{2H} \operatorname{tg} \frac{\pi y}{2H} \right).$$

$$7.78. v(x, y) = v_0 \left(1 - \frac{y}{H} - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{H}}{\sin \frac{\pi y}{H}} \right).$$

$$7.79. v(x, y) = v_2 + \frac{v_1 - v_2}{\pi} \left(1 - \frac{y}{H} - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{H}}{\sin \frac{\pi y}{H}} \right).$$

$$7.80. Q_1 = \frac{2k(v_1 - v_2)}{\pi} \ln \left(\operatorname{th} \frac{3\pi a}{4H} \operatorname{cth} \frac{\pi a}{4H} \right).$$

$$7.81. v(x, y) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi(y+h)}{2a} \operatorname{sh} \frac{\pi(y-h)}{2a} + \cos^2 \frac{\pi x}{2a}}{\operatorname{sh} \frac{\pi h}{2a} \operatorname{ch} \frac{\pi y}{2a} \cos \frac{\pi x}{2a}}.$$

$$7.82. v(x, y) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi x}{H} - \cos \frac{\pi y}{H} - 2 \operatorname{ch}^2 \frac{\pi a}{2H}}{4 \operatorname{sh} \frac{\pi x}{2H} \cos \frac{\pi y}{2H} \operatorname{ch} \frac{\pi a}{2H}}.$$

$$7.83. q(x) = -\frac{ikv_0}{a} \left[\frac{1}{\cos \frac{\pi x}{2a}} - \frac{2 \operatorname{sh} \frac{\pi h}{2a} \cos \frac{\pi x}{2a}}{\operatorname{ch} \frac{\pi h}{a} + \cos \frac{\pi x}{a}} \right].$$

$$7.84. v(r, \varphi) = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2r^2 r_0^2 \sin 2\varphi}{r_0^4 - r^4} + \frac{2v_1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{r_0^2 - r^2}{2rr_0 \sin \varphi}.$$

$$7.85. v(r, \varphi) = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{a^{\frac{\pi}{\alpha}} - r^{\frac{\pi}{\alpha}}}{a^{\frac{\pi}{\alpha}} + r^{\frac{\pi}{\alpha}}} \operatorname{ctg} \frac{\pi \varphi}{\alpha} \right).$$

$$7.86. v(r, \varphi) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\left(\frac{a_2}{r} \right)^{\frac{\pi}{\alpha}} - \left(\frac{a_1}{r} \right)^{\frac{\pi}{\alpha}} + \left[1 - \left(\frac{a_1 a_2}{r^2} \right)^{\frac{\pi}{\alpha}} \right] \cos \frac{\pi \varphi}{\alpha}}{\left[1 + \left(\frac{a_1 a_2}{r^2} \right)^{\frac{\pi}{\alpha}} \right] \sin \frac{\pi \varphi}{\alpha}}.$$

$$7.87. v(r, \varphi) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\left[1 - \left(\frac{a_1}{r}\right)^{\frac{2\pi}{\alpha}}\right] \left[1 - \left(\frac{a_2}{r}\right)^{\frac{2\pi}{\alpha}}\right] + 4 \left(\frac{a_1 a_2}{r^2}\right)^{\frac{\pi}{\alpha}} \sin \frac{\pi \varphi}{\alpha}}{2 \left[\left(\frac{a_2}{r}\right)^{\frac{\pi}{\alpha}} - \left(\frac{a_1}{r}\right)^{\frac{\pi}{\alpha}}\right] \left[1 + \left(\frac{a_1 a_2}{r^2}\right)^{\frac{\pi}{\alpha}}\right] \sin \frac{\pi \varphi}{\alpha}}.$$

$$7.88. v(r, 0) = -v(r, \alpha) = \frac{4v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{r^{\frac{\pi}{\alpha}} + a^{\frac{\pi}{\alpha}}}{r^{\frac{\pi}{\alpha}} - a^{\frac{\pi}{\alpha}}}} - v_0.$$

$$7.89. v(r_0, \varphi) = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} - a^{\frac{\pi}{\alpha}}}{r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} + a^{\frac{\pi}{\alpha}}} \operatorname{ctg} \frac{\pi \varphi}{2\alpha} \right).$$

7.90. $Q = \frac{4kv_2}{\pi} \ln \frac{r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} - a^{\frac{\pi}{\alpha}}}{r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} + a^{\frac{\pi}{\alpha}}}$. Тепловой поток не зависит от v_0 потому, что суммарный поток (но не плотность потока) через дугу $r = r_0$ от двух участков одинаковой длины, температура которых v_0 и $-v_0$, равен нулю (см. следующую задачу).

$$7.91. q = -\frac{kp \operatorname{ctg} \psi}{\pi r_0 \sin^2 \psi} \left(\frac{v_2 + v_1}{a_1^2 + \operatorname{ctg}^2 \psi} + \frac{v_1 - v_2}{a_1^{-2} + \operatorname{ctg}^2 \psi} - \frac{2v_1}{1 + \operatorname{ctg}^2 \psi} \right), \psi = \frac{p\varphi}{2},$$

$$p = \frac{\pi}{\alpha}, a_1 = \frac{r_0^p - a^p}{r_0^p - a^p}; Q = \frac{2k(v_1 - v_2)}{\pi} \ln \frac{r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} - a^{\frac{\pi}{\alpha}}}{r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} - a^{\frac{\pi}{\alpha}}}.$$

$$7.92. 1) Q_1 = \frac{2(v_1 - v_2)}{\pi} \ln(\sqrt{2} + 1); 2) Q_1 = \frac{(v_1 - v_2)}{\pi} \ln 2.$$

$$7.93. 1) Q_1 = \frac{2(v_1 - v_2)}{\pi} \ln \frac{5}{3}; 2) Q_1 = \frac{(v_2 - v_1)}{\pi} \ln \frac{25\sqrt{3} - 16\sqrt{2}}{25\sqrt{3} + 16\sqrt{2}}.$$

$$7.94. 1) Q_1 = \frac{v_1 - v_2}{\pi} \ln \frac{11 + 4\sqrt{6}}{3}; 2) Q_1 = \frac{4(v_1 - v_2)}{\pi} \ln \frac{7 + 2\sqrt{6}}{5}.$$

$$7.95. r^{\frac{2}{3}} \sin \frac{2\varphi}{3} = C.$$

7.96. Семейство парабол $y^2 = 2xC + C^2$, $C > 0$.

$$7.97. V(x, 0) = \frac{4\pi^2 r_0^2 \sin^2 \alpha V_0 (x^2 - r_0^2 \sin^2 \alpha)^{\frac{\pi - \alpha}{\alpha}}}{\alpha^2 \left[(x + r_0 \sin \alpha)^{\frac{\pi}{\alpha}} - (x - r_0 \sin \alpha)^{\frac{\pi}{\alpha}} \right]^2},$$

$$V(r_0, \psi) = -ie^{i\psi} \frac{V_0 \pi^2 \sin^2 \alpha \left[\cos \left(\frac{\pi + \alpha}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \cos \left(\frac{\pi - \alpha}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right]^{\frac{\pi - \alpha}{\alpha}}}{\alpha^2 \left[\cos \frac{\pi}{\alpha} \left(\frac{\pi + \alpha}{2} - \frac{\pi}{4} \right) + \cos \frac{\pi}{\alpha} \left(\frac{\pi - \alpha}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right]^2}.$$

$$7.98. w(z) = V_0 \sqrt{H^2 + z^2} + C; V(0, y) = \frac{V_0 y}{\sqrt{y^2 - H^2}}, V_{1,2} = \pm \frac{V_0 y}{\sqrt{H^2 - y^2}} i.$$

$$7.99. w(z) = \frac{4V_0 r_0}{3} \frac{1}{1 - \left(\frac{z - r_0}{z + r_0} \right)^{\frac{2}{3}}} + C; V(r_0, \varphi) = \frac{4\sqrt[3]{2} V_0}{9\sqrt[3]{|\sin \varphi|}} \frac{ie^{i\varphi}}{\left(|\sin \frac{\varphi}{2}|^{\frac{2}{3}} + |\cos \frac{\varphi}{2}|^{\frac{2}{3}} \right)^2},$$

$$\pi < \varphi < 2\pi, V(x, \varphi)|_{\varphi=0} = \frac{16r_0^2 V_0}{9} \frac{1}{\left[(x + r_0)^{\frac{2}{3}} - (x - r_0)^{\frac{2}{3}} \right]^2 \sqrt[3]{x^2 - r_0^2}}, |x| > r_0.$$

$$7.100. w(z) = V_0 \sqrt{2pz - p^2} + C, \quad V|_L = \frac{V_0 p(y + pi)}{y^2 + p^2}.$$

У к а з а н и е. Однозначная аналитическая функция $z_1(z) = \sqrt{z - \frac{p}{2}}$, $0 < \arg(z - \frac{p}{2}) < 2\pi$, конформно отображает внешность параболы на полуплоскость $(\operatorname{Im} z_1 > \sqrt{\frac{p}{2}})$.

$$7.101. w(z) = \frac{2pV_0}{\pi i} \operatorname{ch} \frac{\pi}{\sqrt{2p}} \sqrt{z - \frac{p}{2}}, \quad V|_L = \frac{V_0 p(y + pi)}{y^2 + p^2} \operatorname{ch} \frac{\pi y}{2p}.$$

У к а з а н и е. Для отображения области Ω , ограниченной параболой, на полуплоскость функция $z_1(z) = \sqrt{z - \frac{p}{2}}$ непосредственно не применима (см. предыдущую задачу), так как имеет в Ω особую точку $z = p/2$. Если сделать разрез по вещественной оси, то в пересечении верхней полуплоскости и Ω функция $z_1(z)$ аналитична и конформно отображает эту вспомогательную область на полуполосу $(0 < \operatorname{Re} z_1 < \infty, 0 < \operatorname{Im} z_1 < \sqrt{\frac{p}{2}})$. Теперь нужно перейти к полуплоскости, применить принцип симметрии Римана–Шварца и отобразить полученную область на полуплоскость.

$$7.102. w(z) = -\frac{iV_0}{2}(z^2 - 2), \quad V|_L = V_0(y + i\sqrt{y^2 + 1}).$$

У к а з а н и е. Аналитическая функция $z_1 = \frac{z + \sqrt{z^2 - 2}}{\sqrt{2}}$ конформно отображает пересечение: 1) верхней полуплоскости и области, ограниченной гиперболой, на сектор $(1 < |z_1|, 0 < \arg z_1 < \pi/4)$; 2) внешности гиперболы и верхней полуплоскости на сектор $(1 < |z_1|, \pi/4 < \arg z_1 < \pi)$. Каждый сектор нужно отобразить на полуплоскость, затем применить принцип симметрии Римана–Шварца и полученную область трансформировать в полуплоскость.

$$7.103. w(z) = \frac{3V_0}{4} \left[\left(\frac{z + \sqrt{z^2 - 2}}{\sqrt{2}} e^{-\frac{\pi i}{4}} \right)^{\frac{2}{3}} - \left(\frac{z + \sqrt{z^2 - 2}}{\sqrt{2}} e^{-\frac{\pi i}{4}} \right)^{-\frac{2}{3}} \right] + C,$$

$$V|_L = V_0 \frac{y + i\sqrt{y^2 + 1}}{(\sqrt{y^2 + 1} + y)^{\frac{4}{3}} + (\sqrt{y^2 + 1} - y)^{\frac{4}{3}} - 1}.$$

У к а з а н и е. Функция $z_1(z) = \frac{z + \sqrt{z^2 - 2}}{\sqrt{2}}$ отображает пересечение внешности гиперболы и верхней полуплоскости на сектор $(1 < |z_1|, 0 < \arg z_1 < \pi/4)$; сектор нужно отобразить на полуплоскость, затем применить принцип симметрии Римана–Шварца и далее полученную область трансформировать в полуплоскость.

$$7.104. w(z) = \frac{2Q}{\pi} \ln(z + \sqrt{z^2 - 2}) + C; \quad V|_{y=0} = \frac{2Qi}{\pi \sqrt{2 - x^2}},$$

$V|_L = \frac{2Q \pm y + i\sqrt{y^2 + 1}}{\pi 2y^2 + 1}$, знак плюс соответствует правой ветви гиперболы, минус — левой. См. указание к задаче 7.57.

$$7.105. z = \frac{H}{\pi} \left(\frac{2\pi}{Q} w + e^{\frac{2\pi}{Q} w} + 1 \right), \quad -\frac{Q}{2} < \operatorname{Im} w < \frac{Q}{2},$$

$$\begin{cases} x(\tau) = \frac{H}{\pi} (\tau + e^\tau \cos C + 1), & -\infty < \tau < \infty, \\ y(\tau) = \frac{H}{\pi} (C + e^\tau \sin C), & -\pi < C < \pi; \\ z_0 = \frac{H}{\pi} \left[\frac{\ln 2}{2} - \left(1 + \frac{3\pi}{4} \right) i \right]. \end{cases}$$

У к а з а н и е. Для отображения плоскости (z) с разрезами по двум лучам на полосу ($-Q < \operatorname{Im} w < Q$) сначала преобразовать полуплоскость $\operatorname{Im} z > 0$ с разрезом по лучу (треугольник с вершинами $z_1 = \infty$, $z_2 = Hi$, $z_3 = \infty$) в полуплоскость без разреза с помощью интеграла Кристоффеля–Шварца, затем перейти к полосе ($0 < \operatorname{Im} w < Q$) и применить принцип симметрии Римана–Шварца.

$$7.106. V(z) = \frac{Q}{\pi \sqrt{H^2 + z^2}}; \quad V(0, y) = \frac{Q}{\pi \sqrt{H^2 - y^2}}, |y| < H, \quad V_{1,2} = \mp \frac{iQ}{\pi \sqrt{y^2 - H^2}}.$$

$$7.107. V_0 z = \sqrt{w(w-a)} - a \ln \frac{\sqrt{w} + \sqrt{w-a}}{\sqrt{a}} + hV_0 i, \quad a = \frac{2hV_0}{\pi};$$

$$z_0 = \frac{2h}{\pi} \left[-\frac{\ln 3}{4} + \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\sqrt{3}}{3} \right) i \right].$$

У к а з а н и е. Применить интеграл Кристоффеля–Шварца $z = C_1 \int_0^w \sqrt{\frac{w-a}{a}} dw + C_2$, который определяет конформное отображение $w = w(z)$ области Ω — треугольника с вершинами и точках $z_1 = \infty$, $z_2 = 0$, $z_3 = hi$ — на полуплоскость $\operatorname{Im} z > 0$.

$$7.108. w(z) = \frac{Q}{\pi} \ln \zeta,$$

$$z = \frac{H-h}{\pi} \left[\ln \frac{\sqrt{\zeta-1} + \sqrt{\zeta-a}}{\sqrt{\zeta-1} - \sqrt{\zeta-a}} - \sqrt{a} \ln \frac{\sqrt{a(\zeta-1)} + \sqrt{\zeta-a}}{\sqrt{a(\zeta-1)} - \sqrt{\zeta-a}} \right] + hi,$$

$$\sqrt{a} = \frac{H}{H-h}; \quad z_0 = \frac{H}{2} \left[-\frac{\ln 5}{\pi} + \frac{2\pi - 3 \operatorname{arctg} 2}{\pi} \right].$$

У к а з а н и е. Применить интеграл Кристоффеля–Шварца $z = C_1 \int_a^\zeta \sqrt{\frac{\zeta-a}{\zeta-1}} \frac{d\zeta}{\zeta} + C_2$, который отображает область Ω (четырёхугольник с вершинами $z_1 = \infty$, $z_2 = 0$, $z_3 = hi$, $z_4 = \infty$) на полуплоскость $\operatorname{Im} \zeta > 0$.

$$7.109. V(0, y) = \frac{Q}{2H} \frac{\cos \frac{\pi h}{2H} \cos \frac{\pi y}{2H}}{\sqrt{\cos \frac{\pi(h+y)}{2H} \cos \frac{\pi(h-y)}{2H}}}.$$

$$7.110. w(z) = -\frac{iQ}{\pi} \arcsin \left(1 + 2 \operatorname{ch} \frac{\pi z}{H} \right) + C_1 = \frac{2Q}{\pi} \ln \left(\sqrt{2} \operatorname{ch} \frac{\pi z}{2H} + \sqrt{\operatorname{ch} \frac{\pi z}{H}} \right) + C_2;$$

$$V(0, y) = \frac{Q\sqrt{2}}{H} \frac{\sin \frac{\pi y}{2H}}{\sqrt{|\cos \frac{\pi y}{H}|}}, \quad V_{1,2} = \pm i \frac{Q\sqrt{2}}{H} \frac{\sin \frac{\pi y_0}{H}}{\sqrt{\cos \frac{\pi y_0}{H}}}.$$

$$7.111. Q = \frac{kH(P_0^2 - P_L^2)}{4\mu RT x_0 y_0} x^2.$$

У к а з а н и е. Поле $A = \rho V$ удовлетворяет условиям $\operatorname{div} \rho V = 0$ (см. уравнение непрерывности в указании к задаче 1.345) и $\operatorname{rot} \rho V = 0$ (это следует

из $\operatorname{rot} V = 0$). Комплексный потенциал $w = u + iP$, $A = -\frac{ik}{2\mu RT}\overline{w}$, поток газа через дугу линии L , ограниченной точками z_1 и z_2 ,

$$Q = \int_L \rho V_N ds = \frac{k}{\mu} \int_L \rho \frac{\partial P}{\partial n} ds = -\frac{k}{2\mu RT} \int_L \frac{\partial P^2}{\partial n} ds = \int_L \frac{\partial u}{\partial s} ds = \frac{k(u_2 - u_1)}{2\mu RT}.$$

7.112. $Q = \frac{kH(P_0^2 - P_L^2)}{2\mu RT} \sqrt{\frac{x}{x_0}}$. См. указание к предыдущей задаче.

7.113. $Q = \frac{khH(P_0^2 - P_L^2)}{\mu RT \sqrt{2|x_0|y_0}} \sqrt{h^2 + x_0^2 - y_0^2 + \sqrt{(h^2 + x_0^2 - y_0^2)^2 + 4x_0^2 y_0^2}}$;

$$Q = \frac{khH(P_0^2 - P_L^2)}{\mu RT \sqrt{y_0^2 - h^2}}.$$

7.114. $Q = \frac{k(P_0^2 - P_L^2)}{2\mu RT \eta_0}$, (ξ_0, η_0) — решение системы

$$\begin{cases} x_0^2 - y_0^2 = \frac{h^2}{4} [9\xi + 6(\xi^2 - \eta^2) - 3\xi\eta^2 + \xi^3], \\ 2x_0 y_0 = \frac{h^2}{4} [9\eta + 3\xi\eta(\xi + 4\eta) - \eta^3]. \end{cases}$$

У к а з а н и е. Комплексный потенциал $w = u + iv$, где $v = P^2 - P_L^2$ (см. указание к задаче 7.111), конформно отображает область Ω на полуплоскость ($\operatorname{Re} w > 0$). Функция w определяется интегралом Кристоффеля–Шварца: $z = C \int_a^w \frac{\zeta + a}{\sqrt{\zeta}} d\zeta$.

7.115. $Q = \frac{kH(P_0^2 - P_L^2)}{\mu RT \gamma}$, где γ — корень уравнения

$$x_0 = \frac{2h}{\pi} \ln(\gamma + \sqrt{1 + \gamma^2}) + \frac{2h}{\pi} \gamma \sqrt{1 + \gamma^2}.$$

У к а з а н и е. Комплексный потенциал w конформно отображает внешность полуполосы на полуплоскость $\operatorname{Re} w > 0$ и определяется посредством интеграла Кристоффеля–Шварца $z = C_1 \int_a^w \sqrt{a^2 - \zeta^2} d\zeta + C_2$.

7.116. $Q = \frac{2kH\alpha(P_0^2 - P_L^2)}{\mu RT \beta}$, где (α, β) — решение системы

$$\begin{cases} \frac{x_0}{h} = 2 \frac{\sqrt{(1 + \beta^2)(\alpha^2 + \beta^2)} + (1 - \alpha^2) \ln \frac{\sqrt{1 + \beta^2} + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 - \alpha^2}}{\pi(1 - \alpha^2)}, \\ \frac{h}{l} = \frac{2\alpha + (1 - \alpha^2) \ln \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}}{\pi(1 - \alpha^2)}. \end{cases}$$

У к а з а н и е. Комплексный потенциал w отображает область (на плоскости (z)), занимаемую пластом, на полуплоскость ($\operatorname{Re} w < 0$) и определяется интегралом Кристоффеля–Шварца $z = C_1 \int_a^w \zeta \sqrt{\frac{b^2 - \zeta^2}{a^2 - \zeta^2}} d\zeta + C_2$; точки $-b, -a, 0, a, b$ плоскости (w) соответствуют точкам $\infty, -hi, 0 - i0, l, 0 + i0, hi$ плоскости (z).

$$7.117. E(z) = \begin{cases} \frac{2q}{\bar{z} - r_1}, & |z - 1| \geq r_1, \\ 0, & |z - r_1| < r_1. \end{cases}$$

$$7.118. E(0) = \frac{q(\sqrt{2} - 1)(1 - i)}{r_0\sqrt{2}}, E(r_0) = \frac{q(2\sqrt{2} - i\sqrt{\sqrt{2} - 1})}{r_0\sqrt{2}}.$$

$$7.119. E(z) = \frac{2\pi a \bar{z}_1^{\frac{2\alpha - \pi}{2(\pi - \alpha)}} i}{(\pi - \alpha)(\bar{z}_1^{\frac{\pi}{2(\pi - \alpha)}} + e^{-\frac{\pi i}{2(\pi - \alpha)}})(a - \bar{z})^2}, z_1 = \frac{a + z}{a - z}, E_{1,2} = \pm \frac{2\pi q i}{a(\pi - \alpha)}.$$

$$7.120. E(ir_0) = \frac{4q\sqrt{3}i}{3r_0}, E(0) = -\frac{8\sqrt{3}qi}{3r_0}.$$

$$7.121. E_1 = \frac{4\pi q \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} \cos^2 \frac{\beta}{2}}{(2\pi - \beta + \alpha)a} i, E_2 = -\frac{4\pi q \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{(2\pi - \beta + \alpha)a} i, \gamma = \frac{\pi(\pi - \beta)}{2\pi - \beta + \alpha}.$$

$$7.122. E(z) = \frac{2\pi r_0 q}{\bar{z}^2 \sin \frac{\pi r_0}{\bar{z}}}, E(2r_0 i) = \frac{\pi q i}{2r_0 \operatorname{sh} \frac{\pi}{2}}, E(3r_0) = \frac{4\sqrt{3}\pi q}{27r_0}.$$

$$7.123. E(q) = \frac{2q\bar{z}}{\sqrt{\bar{z}^4 - a^4}}; E(\pm 2a) = \pm \frac{2q}{a\sqrt{3}}, E(\pm ai) = \pm \frac{\sqrt{2}qi}{a}.$$

$$7.124. E(z) = \frac{2q\bar{z}}{\sqrt{\bar{z}^2 - c^2}}, c^2 = a^2 - b^2; \\ E(\pm 2a) = \pm \frac{2q}{\sqrt{3a^2 + b^2}}, E(\pm ai) = \pm \frac{2qi}{\sqrt{2a^2 - b^2}}.$$

$$7.125. E(z) = \frac{2q\bar{z}}{\sqrt{\bar{z}^4 - a^4}}, E_1 = \frac{4qi}{\sqrt{15}a}, E_2 = -\frac{8q}{\sqrt{15}a}.$$

У к а з а н и е. Применить принцип симметрии Римана-Шварца.

$$7.126. E(z) = \frac{2q\bar{z}}{\sqrt{(\bar{z}^2 - a^2)(\bar{z}^2 + b^2)}}; \\ E_1 = \frac{2qy}{\sqrt{(a^2 - y^2)(b^2 - y^2)}}, E_2 = -\frac{4aqi}{a\sqrt{3}\sqrt{b^2 + 4a^2}}.$$

У к а з а н и е. Применить принцип симметрии Римана-Шварца.

$$7.127. E_1 = \frac{q \cos \frac{\varphi}{2} e^{i(\pi + \varphi)}}{r_0(\sqrt{|\cos \varphi|} + 2\sqrt{2} \sin \frac{\varphi}{2}) \sqrt{(\sqrt{|\cos \varphi|} + \sin \frac{\varphi}{2})|\cos \varphi| \sin \frac{\varphi}{2}}}, \\ E_2 = \frac{q \cos \frac{\varphi}{2} e^{i\varphi}}{r_0(2\sqrt{2} \sin \frac{\varphi}{2} - \sqrt{|\cos \varphi|}) \sqrt{(\sin \frac{\varphi}{2} - \sqrt{|\cos \varphi|})|\cos \varphi| \sin \frac{\varphi}{2}}}, \\ E_{3,4} = \pm \frac{2qr_0(r_0 + x)i}{(\sqrt{r_0^2 + x^2} + 2(r_0 - x)) \sqrt{(\sqrt{2(r_0^2 + x^2} + r_0 - x)(r_0^2 + x^2)(r_0 - x)}}.$$

У к а з а н и е. Применить дробно-линейное преобразование и принцип симметрии Римана-Шварца.

$$7.128. E(z) = \frac{2q(d^2 - r_0^2)}{(\bar{z}d - r_0^2)(\bar{z} - d)}, E(r_0 e^{i\varphi}) = \frac{2q(r_0^2 - d^2)e^{i\varphi}}{r_0(r_0^2 + d^2 - 2dr_0 \cos \varphi)}, \\ E(r_0) = \frac{2q(r_0 + d)}{r_0(r_0 - d)}, E(-r_0) = \frac{2q(r_0 - d)}{r_0(r_0 + d)}.$$

$$7.129. E(r_0 e^{i\varphi}) = \frac{2q \sin 4\alpha \sin \varphi e^{i(\pi+\varphi)}}{r_0(1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \varphi)},$$

$$E(x) = -\frac{16q \sin 4\alpha (r_0^2 - x^2) r_0 i}{(r_0 + x)^4 - 2(r_0^2 - x^2) \cos 4\alpha + (r_0 - x)^4}, \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{h}{r_0}.$$

$$7.130. E_1 = -\frac{4\pi q \operatorname{ctg} \frac{\pi(\pi-2\alpha)}{2(\pi-\alpha)}}{(\pi-\alpha)a} i, \quad E_2 = \frac{4\pi q \operatorname{tg} \frac{\pi(\pi-2\alpha)}{2(\pi-\alpha)} \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{(\pi-\alpha)a} i.$$

$$7.131. E_{1,2} = \pm \frac{4q \cos^2 \frac{\alpha}{2}}{a} i.$$

$$7.132. E(z) = -\frac{2\pi q \sin \frac{\pi h}{H}}{H \left(\operatorname{ch} \frac{\pi \bar{z}}{H} - \cos \frac{\pi h}{H} \right)} i, \quad E(x) = -\frac{2\pi q \sin \frac{\pi h}{H}}{H \left(\operatorname{ch} \frac{\pi x}{H} - \cos \frac{\pi h}{H} \right)} i,$$

$$E(x + iH) = \frac{2\pi q \sin \frac{\pi h}{H}}{H \left(\operatorname{ch} \frac{\pi x}{H} + \cos \frac{\pi h}{H} \right)} i.$$

$$7.133. E(2r_1) = -\frac{\pi q r_2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{r_1(r_2 - r_1)}, \quad E(2r_2) = \frac{\pi q r_1 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{r_2(r_2 - r_1)}.$$

$$7.134. E(z) = -\frac{4qhi}{\bar{z}^2 + h^2}, \quad E\left(\frac{ih}{2}\right) = -\frac{16qi}{3h}, \quad E(2ih) = \frac{4qi}{3h}, \quad E(x + ih) = -\frac{4qhi}{x^2 + h^2}.$$

$$7.135. E = \frac{4qkr_0^k r^{k-1} \sin k(\varphi_0 - \alpha) e^{i(\frac{\pi}{2} - \alpha)}}{r^{2k} + 2r_0^k r^k \cos k(\varphi_0 - \alpha) + r_0^{2k}}.$$

$$7.136. E(z) = -\frac{8qr_0^2 \sin 2\varphi_0 \bar{z}i}{\bar{z}^4 - 2r_0^2 \bar{z}^2 \cos 2\varphi_0 + r_0^4}, \quad E(x) = -\frac{8qr_0^2 \sin 2\varphi_0}{x^4 - 2r_0^2 x^2 \cos 2\varphi_0 + r_0^4} i,$$

$$E(iy) = -\frac{8qr_0^2 y \sin 2\varphi_0}{y^4 + 2r_0^2 y^2 \cos 2\varphi_0 + r_0^4}.$$

$$7.137. E(h) = -\frac{4\sqrt{3}qi}{3h}, \quad E(-h) = -\frac{2\sqrt{3}qi}{3h}.$$

$$7.138. E(r_0 e^{i\varphi}) = \frac{2q \sin 4\alpha e^{(\pi+\varphi)i}}{r_0(1 - \sin^2 \varphi \cos^2 2\alpha)},$$

$$E(x) = -\frac{16qr_0(x^2 - r_0^2) \sin 4\alpha}{(r_0 + x)^4 + 2(x^2 - r_0^2) \cos 4\alpha + (r_0 - x)^4} i.$$

$$7.139. E(r_0 e^{i\varphi}) = \frac{2q\sqrt{3}e^{i\varphi}}{3r_0 \left(\operatorname{ctg}^{\frac{4}{3}} \frac{\varphi}{2} - \operatorname{ctg}^{\frac{2}{3}} \frac{\varphi}{2} + 1 \right) \left| \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \right|^{\frac{1}{3}} \sin^2 \frac{\varphi}{2}},$$

$$E(x) = -\frac{8\sqrt{3}qr_0 i}{3 \left(\left(\frac{r_0 + x}{r_0 - x} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{r_0 + x}{r_0 - x} \right)^{\frac{2}{3}} + 1 \right) \sqrt[3]{\left| \frac{r_0 + x}{r_0 - x} \right|} (r_0 - x)^2}.$$

$$7.140. E(-a) = 0, \quad E(bi) = -\frac{4(a^2 - b^2)qi}{a \left(ah - b\sqrt{h^2 + a^2 - b^2} \right)}.$$

7.141. См. рис. 7.36. $E(z) = \frac{2q(d^2 - r_0^2)}{(\bar{z}d - r_0^2)(\bar{z} - d)}$, $E(\varphi) = \frac{2q(d^2 - r_0^2)e^{i(\varphi+\pi)}}{r_0(r_0^2 + l^2 - 2r_0d \cos \varphi)}$,

$$E(x) = \begin{cases} 0, & |x| \leq r_0, \\ \frac{2q(d^2 - r_0^2)}{(xd - r_0^2)(x - d)}, & |x| \geq r_0. \end{cases}$$

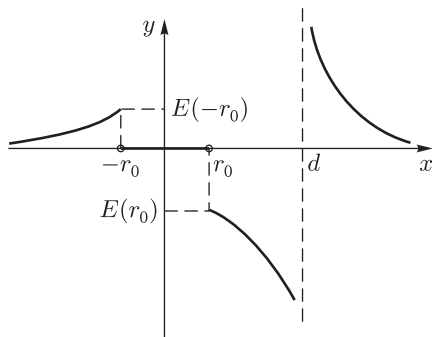


Рис. 7.36

7.142. $E(0) = \frac{8q\sqrt{3}i}{3r_0}$, $E(ir_0) = -\frac{4q\sqrt{3}i}{9r_0}$.

7.143. $E_1 = \frac{4\pi q \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{(\pi + \alpha)a}i$, $E_2 = -\frac{4\pi q \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2} \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{(\pi + \alpha)a}i$, $\beta = \frac{\pi^2}{\pi + \alpha}$.

7.144. $E_1 = \frac{2\pi q \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \cos^2 \frac{\alpha}{2}}{(\pi - \alpha)a}i$, $E_2 = -\frac{2\pi q \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} \cos^2 \frac{\alpha}{2}}{(\pi - \alpha)a}i$,
 $\gamma = \frac{\pi(2\beta - \alpha)}{2(\pi - \alpha)}$, $\beta = \operatorname{arctg} \frac{h}{a}$.

7.145. $E_1 = \frac{4\pi q \operatorname{tg} \frac{\delta}{2} \cos^2 \frac{\alpha}{2}}{(2\pi - \beta + \alpha)a}i$, $E_2 = -\frac{4\pi q \operatorname{ctg} \frac{\delta}{2} \cos^2 \frac{\beta}{2}}{(2\pi - \beta + \alpha)a}i$; $\gamma = \operatorname{arctg} \frac{h}{a}$,

где $\delta = \begin{cases} \frac{(2\pi + 2\gamma - \beta)\pi}{2\pi - \beta + \alpha}, & h > a \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}, \\ \frac{(2\gamma - \beta)\pi}{2\pi - \beta + \alpha}, & h < a \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}. \end{cases}$

7.146. $E_1 = \frac{8\chi q \sin \delta \cos^2 \frac{\alpha}{2}}{(d_1^\chi + d_1^{-\chi} + 2 \cos \delta)a}i$, $E_2 = -\frac{8\chi q \sin \delta \cos^2 \frac{\beta}{2}}{(d_1^\chi + d_1^{-\chi} - 2 \cos \delta)a}i$,

$$\chi = \frac{\pi}{2\pi - \beta + \alpha}, \quad \delta = \frac{(\pi - \beta)\pi}{2\pi - \beta + \alpha}, \quad d_1 = \begin{cases} \frac{a+d}{a-d}, & |d| < a, \\ \frac{d+a}{d-a}, & |d| > a. \end{cases}$$

7.147. $E_{1,2} = \mp \frac{2q\pi \sin \frac{\pi h}{H}}{H \left(\operatorname{sh} \frac{\pi x}{H} \mp \cos \frac{\pi h}{H} \right)}i$.

7.148. Если $z_0 = d$, то

$$E_1 = \frac{2q\alpha_2 \sin \beta}{r_1(\operatorname{ch} \alpha_2 - \cos \beta)} i, \quad E_2 = -\frac{2q\alpha_1 \sin \beta}{r_2(\operatorname{ch} \alpha_1 + \cos \beta)} i, \quad E_3 = \frac{q\alpha_2 \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}}{r_1};$$

если $z_0 = ih$, то

$$E_1 = -\frac{2q\alpha_2 \sin \alpha_2}{r_1[\operatorname{ch}(\alpha_2 + \gamma) + \cos \alpha_2]} i, \quad E_2 = \frac{2q\alpha_1 \sin \alpha_2}{r_2[\operatorname{ch}(\alpha_1 + \gamma) + \cos \alpha_2]} i,$$

$$E_3 = -\frac{q\alpha_1 \sin \alpha_2}{r_1(\operatorname{ch} \gamma + \cos \alpha_2)}, \quad \alpha_1 = \frac{r_1}{r_1 + r_2}, \quad \alpha_2 = \frac{r_1}{r_1 + r_2},$$

$$\beta = \frac{(d + 2r_1)r_2\pi}{(r_1 + r_2)d}, \quad \gamma = \frac{2r_1r_2\pi}{h(r_1 + r_2)}.$$

7.149. 1) $E_{1,2} = \pm \frac{2q\sqrt{d^2 - a^2}}{ad}$; 2) $E_1 = \pm \frac{2q(h \mp a + \sqrt{h^2 + a^2})}{a(b \pm a + \sqrt{h^2 + a^2})} i$,

для E_1 — верхние знаки.

7.150. $E_1 = \frac{2q \sin \varphi_0 (\sqrt{2 \sin \varphi_0} + 1)i}{a(1 + \sin \varphi_0(2 + \sqrt{2 \sin \varphi_0}))}$, $E_2 = -\frac{2q \sin \varphi_0 (\sqrt{2 \sin \varphi_0} + 1)i}{a(1 + \sqrt{2 \sin \varphi_0}(\sin \varphi_0 + 1))}$.

7.151. $E(z) = -\frac{q\sqrt{2h}i}{(\bar{z} - \sqrt{2h\bar{z}} + 1)\sqrt{\bar{z}}}$, $E(x \pm 0) = \mp \frac{q\sqrt{2h}i}{(x \mp \sqrt{2hx} + 1)\sqrt{x}}$.

7.152. $E(\varphi) = \frac{2q\left(\alpha + \frac{3\pi}{4}\right)e^{i\varphi}}{r_0\left(\sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}} + \sqrt{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} + 2\cos\left(\alpha + \frac{3\pi}{4}\right)\right)\sin \varphi}$.

7.153. $E_1(\varphi) = \frac{2q\left(\alpha - \frac{\pi}{4}\right)e^{i\varphi}}{r_0\left(\sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}} + \sqrt{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} + 2\cos\left(\alpha - \frac{\pi}{4}\right)\right)\sin \varphi}$,

$$E_2(\varphi) = \frac{2q\left(\alpha - \frac{\pi}{4}\right)e^{i(\pi+\varphi)}}{r_0\left(\sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}} + \sqrt{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} - 2\cos\left(\alpha - \frac{\pi}{4}\right)\right)\sin \varphi}.$$

7.154. Если $|d| > r_0$, то

$$E_1(\varphi) = \frac{q\sqrt{2d_1}e^{i\varphi}}{r_0\left(\sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}} + d_1\sqrt{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} + \sqrt{2d_1}\right)\sin \varphi},$$

$$E_2(\varphi) = \frac{q\sqrt{2d_1}e^{i(\pi+\varphi)}}{r_0\left(\sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}} + d_1\sqrt{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} - \sqrt{2d_1}\right)\sin \varphi}, \quad d_1 = \frac{d + r_0}{d - r_0};$$

если $|d| < r_0$, то

$$E_1(\varphi) = \frac{q\sqrt{2d_1}e^{i\varphi}}{r_0\left(\sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}} + d_1\sqrt{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} - \sqrt{2d_1}\right)\sin \varphi},$$

$$E_2(\varphi) = \frac{q\sqrt{2d_1}e^{i(\pi+\varphi)}}{r_0\left(\sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}} + d_1\sqrt{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} + \sqrt{2d_1}\right)\sin \varphi}, \quad d_1 = \frac{r_0 + d}{r_0 - d}.$$

$$7.155. E(-a) = \frac{2q(d + \sqrt{d^2 - a^2 + b^2} - a - b)}{b(d + \sqrt{d^2 - a^2 + b^2} + a + b)},$$

$$E(bi) = -\frac{2q(d^2 + d\sqrt{d^2 - a^2 + b^2} - a^2 - ab)}{a(d^2 + d\sqrt{d^2 - a^2 + b^2} + ab + b^2)}i.$$

$$7.156. E(a) = -\frac{2q(h^2 + h\sqrt{h^2 + a^2 - b^2} - ab - b^2)}{b(h^2 + h\sqrt{h^2 + a^2 - b^2} + a^2 + ab)},$$

$$E(-bi) = \frac{2q(h + \sqrt{h^2 + a^2 - b^2} - a - b)}{a(h + \sqrt{h^2 + a^2 - b^2} + a + b)}i.$$

$$7.157. E(z) = \frac{2q\sqrt{d^2 - a^2}(\sqrt{d^2 + a^2} + \sqrt{z^2 + a^2})\bar{z}}{(\bar{z}^2 - d^2)\sqrt{z^4 - a^4}},$$

$$E_1 = -\frac{2q\sqrt{d^2 - a^2}(\sqrt{d^2 + a^2} + \sqrt{x^2 + a^2})x}{(d^2 - x^2)\sqrt{a^4 - x^4}}i,$$

$$E_2 = -\frac{2q\sqrt{d^2 - a^2}(\sqrt{d^2 + a^2} - \sqrt{x^2 + a^2})|x|}{(d^2 - x^2)\sqrt{a^4 - x^4}}i,$$

$$E_{3,4} = \mp \frac{2q\sqrt{d^2 - a^2}(\sqrt{d^2 + a^2} \pm \sqrt{a^2 - y^2})y}{(d^2 + y^2)\sqrt{a^4 - y^4}},$$

для E_3 — верхние знаки.

$$7.158. \sigma(\varphi) = \frac{q}{\pi\sqrt{3}r_0 \sin \varphi (\operatorname{tg}^{\frac{2}{3}} \frac{\varphi}{2} + \operatorname{ctg}^{\frac{2}{3}} \frac{\varphi}{2} - 1)},$$

$$\sigma(x) = \frac{2qr_0}{\pi\sqrt{3}(r_0^2 - x^2) \left[\left(\frac{r_0 - x}{r_0 + x} \right)^{\frac{2}{3}} + \left(\frac{r_0 + x}{r_0 - x} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right]}.$$

7.159. В полярной системе координат с началом в точке O , полярная ось которой параллельна оси Ox ,

$$\sigma(\varphi) = \frac{q \sin^2 \alpha \sin \gamma}{2(\pi + \alpha)a \sin \psi_1 \sin \psi_2 \left[\left(\frac{\sin \psi_1}{\sin \psi_2} \right)^\beta + \left(\frac{\sin \psi_2}{\sin \psi_1} \right)^\beta - 2 \cos \gamma \right]},$$

$$\beta = \frac{\pi}{\pi + \alpha}, \gamma = \alpha\beta, \psi_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{3\pi}{2} - \alpha - \varphi \right), \psi_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \varphi \right).$$

7.160 В полярной системе координат с началом в центре окружности с дугой S_1 , полярная ось которой параллельна оси Ox ,

$$\sigma(\varphi) = \frac{q \sin^2 \alpha \sin \gamma (\sin \psi_1 \sin \psi_2)^{k-1}}{4(\pi - \alpha)a (\sin^{2k} \psi_1 + \sin^{2k} \psi_2)},$$

$$k = \frac{\pi}{2(\pi - \alpha)}, \psi_1 = \frac{1}{2} \left(\alpha - \varphi + \frac{\pi}{2} \right), \psi_2 = \frac{1}{2} \left(\alpha + \varphi - \frac{\pi}{2} \right).$$

7.161. В полярной системе координат с началом в центре окружности с дугой S_1 , полярная ось которой параллельна оси Ox ,

$$\sigma_1(\varphi) = \frac{qk \sin^2 \beta \sin(\pi - \beta)k}{2\pi a \sin \psi_1 \sin \psi_2 \left[\left(\frac{\sin \psi_1}{\sin \psi_2} \right)^k + \left(\frac{\sin \psi_2}{\sin \psi_1} \right)^k - 2 \cos(\pi - \beta)k \right]},$$

$$\psi_1 = \frac{1}{2} \left(\beta - \varphi + \frac{\pi}{2} \right), \psi_2 = \frac{1}{2} \left(\beta + \varphi - \frac{\pi}{2} \right);$$

в полярной системе координат с началом в центре окружности с дугой S_2 , полярная ось которой параллельна оси Ox ,

$$\sigma_2(\varphi) = \frac{qk \sin^2 \alpha \sin(\pi - \beta)k}{2\pi a \sin \psi_1 \sin \psi_2 \left[\left(\frac{\sin \psi_1}{\sin \psi_2} \right)^k + \left(\frac{\sin \psi_2}{\sin \psi_1} \right)^k - 2 \cos(\pi - \alpha)k \right]},$$

$$\psi_1 = \frac{1}{2} \left(\alpha - \varphi + \frac{\pi}{2} \right), \psi_2 = \frac{1}{2} \left(\alpha + \varphi - \frac{\pi}{2} \right),$$

в обоих случаях $k = \frac{\pi}{2\pi - \beta + \alpha}$.

$$7.162. \quad \sigma_1(\varphi) = \frac{q}{8r_0 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \operatorname{ch} \left(\frac{\pi}{2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \right)}, \quad \sigma_2(\psi) = \frac{q}{8r_0 \cos^2 \frac{\psi}{2} \operatorname{ch} \left(\frac{\pi}{2} \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \right)}.$$

$$7.163. \quad \sigma_1(\varphi) = \frac{q \sin \frac{\pi}{1 + \frac{r_1}{r_2}}}{4r_1 \left(1 + \frac{r_1}{r_2} \right) \sin^2 \frac{\varphi}{2} \left(\operatorname{ch} \frac{\pi \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}}{1 + \frac{r_1}{r_2}} - \cos \frac{\pi}{1 + \frac{r_1}{r_2}} \right)},$$

$$\sigma_2(\psi) = \frac{q \sin \frac{\pi}{1 + \frac{r_2}{r_1}}}{4r_2 \left(1 + \frac{r_2}{r_1} \right) \cos^2 \frac{\psi}{2} \left(\operatorname{ch} \frac{\pi \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}}{1 + \frac{r_2}{r_1}} - \cos \frac{\pi}{1 + \frac{r_2}{r_1}} \right)}.$$

$$7.164. \quad \sigma(\varphi) = \frac{q}{2\pi \sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}}.$$

$$7.165. \quad \sigma(x) = \frac{q}{2\pi \sqrt{a^2 - x^2}}.$$

$$7.166. \quad \sigma_{1,2}(\varphi) = -\frac{q}{4\pi r_0} \left(\frac{\sin \frac{\varphi}{2}}{\sqrt{\sin \frac{\varphi + \alpha}{2} \sin \frac{\varphi - \alpha}{2}}} \pm 1 \right).$$

$$7.167. \quad \sigma(x) = \frac{q}{2\pi} \frac{|x|}{\sqrt{a^4 - x^4}}, \quad \sigma(y) = \frac{q}{2\pi} \frac{|y|}{\sqrt{a^4 - y^4}}.$$

$$7.168. \quad \sigma(x) = \frac{q|x|}{2\pi \sqrt{a^2 - x^2} \sqrt{(a \mp \sqrt{a^2 - x^2})(\sqrt{2}a \pm \sqrt{a^2 - x^2})}},$$

верхний знак соответствует верхней ($x + i0$), нижний — нижней стороне ($x - i0$) проводника,

$$\sigma(y) = \frac{q|y|}{2\pi \sqrt{a^2 + y^2} \sqrt{(a + \sqrt{a^2 + y^2})(\sqrt{2}a - \sqrt{a^2 + y^2})}}.$$

$$7.169. \quad \sigma(x \pm i0) = \frac{q|x|}{\pi \sqrt{a^2 - x^2} \sqrt{5a^2 + 4x^2 \mp 4a\sqrt{a^2 - x^2}}},$$

$$\sigma(+0 \pm iy) = \frac{q|y|}{\pi \sqrt{a^2 + y^2} \sqrt{5a^2 + 4y^2 \mp 4a\sqrt{a^2 + y^2}}}.$$

$$7.170. \sigma(x) = -\frac{qh}{\pi(x^2 + h^2)}.$$

$$7.171. \sigma_{1,2}(x) = -\frac{q \sin \frac{\pi h}{H}}{2H \left(\operatorname{ch} \frac{\pi x}{H} \mp \cos \frac{\pi h}{H} \right)},$$

минус — для плоскости $y = 0$, плюс — для $y = H$.

$$7.172. \sigma_{1,2}(r) = -\frac{q}{\alpha r} \frac{\sin \frac{\pi \varphi_0}{\alpha}}{\left(\frac{r}{r_0}\right)^{\frac{\pi}{\alpha}} + \left(\frac{r_0}{r}\right)^{\frac{\pi}{\alpha}} \mp 2 \cos \frac{\pi \varphi_0}{\alpha}},$$

знак минус соответствует грани $\varphi = 0$, знак плюс — грани $\varphi = \alpha$.

$$7.173. \sigma(\varphi) = -\frac{q}{2\pi r_0} \frac{r_0^2 - d^2}{d^2 + r_0^2 - 2dr_0 \cos \varphi}.$$

$$7.174. \sigma(\varphi) = -\frac{2qh}{\pi} \frac{(r_0^2 - h^2) \sin \varphi}{(r_0^2 + h^2)^2 - 4r_0^2 h^2 \sin^2 \varphi}, \quad \sigma(x) = -\frac{qh}{\pi} \frac{(r_0^2 - h^2)(r_0^2 - x^2)}{(x^2 + h^2)(r_0^2 + x^2 h^2)}.$$

$$7.175. \sigma_{1,2}(x) = -\frac{q}{\pi} \frac{2\sqrt{2}(a^2 - d^2)(\sqrt{2a^2 - x^2} - a)}{\left[(a-d)^4(2a - \sqrt{2a^2 - x^2} + x)^2 + (a+d)^4(2a - \sqrt{2a^2 - x^2} - x)^2\right]};$$

плюс соответствует верхней части ($y > 0$) поверхности, минус — нижней.

$$7.176. \sigma_{1,2}(x) = -\frac{q}{\pi} \frac{2\sqrt{2}|y|(a - |y| - x)^2 \cos 4\alpha}{\left[(4y^4 + (a - |y| - x)^4 \mp 2y^2(a - |y| - x)^2 \sin 4\alpha)\right]},$$

знак плюс соответствует верхней ($y = \sqrt{2a^2 - x^2} - a > 0$), знак минус — нижней ($y = -\sqrt{2a^2 - x^2} + a < 0$) части поверхности.

$$7.177. \sigma(\varphi) = -\frac{2qh}{\pi} \frac{(h^2 - r_0^2) \sin \varphi}{(r_0^2 + h^2)^2 - 4r_0^2 h^2 \sin^2 \varphi}, \quad \sigma(x) = -\frac{qh}{\pi} \frac{(h^2 - r_0^2)(x^2 - r_0^2)}{(h^2 + x^2)(r_0^2 + x^2 h^2)}.$$

$$7.178. 1) \sigma(x) = -\frac{q}{2\pi} \frac{\sqrt{a^2 - d^2}}{|x - d|\sqrt{x^2 - a^2}}, \quad |x| > a;$$

$$2) \sigma(x) = -\frac{q}{2\pi} \frac{|x|\sqrt{h^2 + a^2} \pm h\sqrt{x^2 - a^2}}{(x^2 + h^2)\sqrt{x^2 - a^2}}, \quad |x| > a,$$

плюс соответствует верхней ($z = x + i0$), минус — нижней ($z = x - i0$) стороне.

$$7.179. 1) \sigma_{1,2}(x) = -\frac{q}{\pi} \frac{2\sqrt{2}|y|(a - |y| - x)^2 \cos 4\alpha}{\left[(4y^4 + (a - |y| - x)^4 \mp 2y^2(a - |y| - x)^2 \sin 4\alpha)\right]};$$

$$2) \sigma_{1,2}(x) = -\frac{q}{\pi} \frac{\sqrt[6]{32}(a - |y| + x)^{\frac{2}{3}} \sin \beta}{4\sqrt[3]{|y|} \left[(|y|\sqrt{2})^{\frac{4}{3}} + (a - |y| - x)^{\frac{4}{3}} \mp (|y|\sqrt{2})^{\frac{2}{3}}(a - |y| + x)^{\frac{2}{3}} \cos \beta \right]};$$

$\beta = \frac{4}{3} \operatorname{arctg} \frac{d}{a} - \frac{\pi}{6}$, знак плюс соответствует верхней ($y = \sqrt{2a^2 - x^2} - a > 0$), знак минус — нижней ($y = -\sqrt{2a^2 - x^2} + a < 0$) части поверхности.

$$7.180. \sigma(x) = -\frac{qh}{\pi} \frac{\sqrt{H^2 - h^2}}{(x^2 + h^2)\sqrt{x^2 + H^2}}, \quad \sigma(y) = -\frac{qh}{\pi} \frac{\sqrt{H^2 - h^2}}{(y^2 - h^2)\sqrt{y^2 - H^2}}, \quad H < y.$$

$$7.181. \sigma(x) = -\frac{q}{\pi} \frac{|x|}{x^2 + h^2} \sqrt{\frac{h^2 - H^2}{x^2 + H^2}}, \quad \sigma(y) = -\frac{q}{\pi} \frac{y}{h^2 - y^2} \sqrt{\frac{h^2 - H^2}{H^2 - y^2}}, \quad 0 \leq y < H.$$

$$7.182. \sigma(x) = -\frac{4qr_0 \sin \frac{2\alpha}{3}}{3\pi(x^2 - r_0^2) \left[\left(\frac{x+r_0}{x-r_0} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{x-r_0}{x+r_0} \right)^{\frac{4}{3}} - 2 \cos \frac{2\alpha}{3} \right]}, \quad \alpha = 2 \operatorname{arctg} \frac{h}{r_0}.$$

$$7.183. \sigma_{1,2}(y) = -\frac{2q \left(\sqrt{y^2 + 1} + y \right)^2}{\pi \sqrt{2y^2 + 1} \left[(\sqrt{y^2 + 1} + y)^4 + 1 \right]}. \quad \text{См. указание к задаче 7.57.}$$

$$7.184. \quad 1) \quad \sigma(x) = -\frac{4q}{3\pi \sqrt{x^2 + 1} \left[(\sqrt{x^2 + 1} + 1)^{\frac{2}{3}} + \sqrt{x^2 + 1} - 1 \right)^{\frac{2}{3}} \right]};$$

$$2) \quad \sigma(x) = -\frac{2q \sqrt{2x^2 - 1}}{\pi \left[(2x^2 - 1)^2 + d^2(d^2 - 2) \right]}. \quad \text{См. указание к задаче 7.102.}$$

$$7.185. \quad 1) \sigma(x) = -\frac{q}{2\pi} \frac{\sqrt{d + \frac{p}{2}} - \sqrt{\frac{p}{2}}}{\left(x + d + p - \sqrt{2d + p} \right) \sqrt{x + \frac{p}{2}}};$$

$$2) \sigma(x) = -\frac{q}{2\sqrt{2p}} \frac{1}{\sqrt{x + \frac{p}{2}} \operatorname{ch} \pi \sqrt{\frac{x}{2p}}}. \quad \text{См. указание к задаче 7.100.}$$

$$7.186. \sigma(\varphi) = -\frac{q}{2\pi r_0} \frac{d^2 - r_0^2}{d^2 + r_0^2 - 2dr_0 \cos \varphi}.$$

$$7.187. \sigma(\varphi) = -\frac{q}{\pi \sqrt{3} r_0 \sin \varphi \left[\left(\frac{1}{k} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right)^{\frac{2}{3}} + \left(k \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right]},$$

$$\sigma(x) = -\frac{2qr_0}{\pi \sqrt{3} (r_0^2 - x^2) \left[\left(\frac{1}{k} \frac{r_0 - x}{r_0 + x} \right)^{\frac{2}{3}} + \left(k \frac{r_0 + x}{r_0 - x} \right)^{\frac{2}{3}} + 1 \right]}, \quad k = \frac{d - r_0}{d + r_0}$$

$$7.188. \quad 1) \sigma(\varphi) = -\frac{2q \sin \frac{2\alpha}{3}}{3\pi r_0 \sin \varphi \left(\operatorname{tg}^{\frac{2}{3}} \frac{\varphi}{2} + \operatorname{ctg}^{\frac{2}{3}} \frac{\varphi}{2} + 2 \cos \frac{2\alpha}{3} \right)},$$

$$\sigma(x) = -\frac{4qr_0 \sin \frac{2\alpha}{3}}{3\pi(r_0^2 - x^2) \left[\left(\frac{r_0 - x}{r_0 + x} \right)^{\frac{2}{3}} + \left(\frac{r_0 + x}{r_0 - x} \right)^{\frac{2}{3}} - 2 \cos \frac{2\alpha}{3} \right]}, \quad \alpha = \pi + 2 \operatorname{arctg} \frac{r_0}{h};$$

$$2) \sigma(\varphi) = -\frac{2q \sin \frac{2(\pi - 2\alpha)}{3}}{3\pi r_0 \sin \varphi \left(\operatorname{tg}^{\frac{2}{3}} \frac{\varphi}{2} + \operatorname{ctg}^{\frac{2}{3}} \frac{\varphi}{2} - 2 \cos \frac{2(\pi - 2\alpha)}{3} \right)},$$

$$\sigma(x) = -\frac{4qr_0 \sin \frac{2(\pi - 2\alpha)}{3}}{3\pi \sqrt{r_0^2 - x^2} \left[\left(\frac{r_0 - x}{r_0 + x} \right)^{\frac{2}{3}} + \left(\frac{r_0 + x}{r_0 - x} \right)^{\frac{2}{3}} - 2 \cos \frac{\pi - 4\alpha}{3} \right]}, \quad \alpha = \pi + 2 \operatorname{arctg} \frac{r_0}{h}.$$

7.189. В точках $r_0 + r_0 e^{i\varphi}$ плотность заряда

$$\sigma(\varphi) = \frac{q}{8r_0 \cos^2 \frac{\varphi}{2} \operatorname{ch} \pi \left(\frac{r_0}{h} - \frac{1}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right)}.$$

7.190. В точках $\pm r_0 + r_0 e^{i\varphi}$ плотность заряда

$$\sigma(\varphi) = \frac{q \sin \pi \left(\frac{1}{2} - \frac{r_0}{d} \right)}{r_0 \cos^2 \frac{\varphi}{2} \left(\operatorname{ch} \left(\frac{\pi}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \mp \cos \pi \left(\frac{1}{2} - \frac{r_0}{d} \right) \right)}.$$

7.191. В точках $(x, y = x \pm \sqrt{a^2 - x^2})$ плотность заряда

$$\sigma_{1,2} = -2q \sin \beta / \left(3 \sqrt[6]{2} \pi \left[(2a + x - \sqrt{a^2 - x^2})^{\frac{2}{3}} \mp 2 \sqrt[3]{2} (\sqrt{a^2 - x^2} - a)^{\frac{4}{3}} + (2a - x - \sqrt{a^2 - x^2})^{\frac{2}{3}} \right] (\sqrt{a^2 - x^2} - a)^{\frac{1}{3}} \right).$$

7.192. 1) $\sigma(x) = -\frac{q}{2\pi} \frac{\sqrt{d^2 - a^2}}{(d-x)\sqrt{a^2 - x^2}}, \quad |x| < a;$

2) $\sigma(x) = -\frac{q}{2\pi} \frac{h(\sqrt{a^2 + h^2} \pm \sqrt{a^2 - x^2})}{(x^2 + h^2)\sqrt{a^2 - x^2}}, \quad |x| < a,$

плюс соответствует верхней ($z = x + i0$), а минус — нижней ($z = x - i0$) стороне.

7.193. $\sigma(\varphi) = -\frac{q}{2\pi} \times$

$$\times \frac{(d^2 - a^2)(ad + b\sqrt{d^2 - c^2})}{(bd + a\sqrt{d^2 - c^2}) \left[b^2 + d^2 - (ad + b\sqrt{d^2 - c^2}) \cos \varphi \right] \sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}}.$$

7.194. $\sigma(\varphi) = -\frac{q(h^2 + a^2)}{\left[h^2 + a^2 + (bh + a\sqrt{h^2 + c^2}) \sin \varphi \right] \sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}}.$

7.195. 1) $\sigma_{1,2}(\varphi) = -\frac{q}{2\sqrt{2} \pi r_0 \left(\sqrt{\frac{r_0 - d}{r_0 + d}} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \pm \sqrt{\frac{r_0 + d}{r_0 - d}} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \pm \sqrt{2} \right) \sin \varphi};$

2) $\sigma_{1,2}(\varphi) = -\frac{q}{2\sqrt{2} \pi r_0 \left(\sqrt{\frac{d - r_0}{d + r_0}} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} + \sqrt{\frac{d + r_0}{d - r_0}} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \mp \sqrt{2} \right) \sin \varphi}.$

7.196. $\sigma_{1,2}(\varphi) = -\frac{q \sin \beta}{2\pi r_0 \left(\sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}} + \sqrt{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} \mp 2 \cos \beta \right) \sin \varphi},$

где: 1) $\beta = \alpha + \frac{3\pi}{4}$; 2) $\beta = \alpha - \frac{\pi}{4}$.

7.197. 1) $\sigma_{1,2}(\varphi) = -\frac{q}{4\pi r_0} \left(\frac{\sin \frac{\varphi}{2}}{\sqrt{\sin \frac{\varphi + \alpha}{2} \sin \frac{\varphi - \alpha}{2}}} \mp 1 \right);$

2) $\sigma_{1,2}(\varphi) = -\frac{q}{4\pi r_0 \sin \frac{\varphi - \psi}{2}} \sqrt{\frac{\sin \frac{\alpha - \psi}{2} \sin \frac{\alpha + \psi}{2}}{\sin \frac{\varphi - \alpha}{2} \sin \frac{\varphi + \alpha}{2}}}.$

$$7.198. \sigma(x) = -\frac{q}{2\pi} \frac{|x|(\sqrt{d^2 + a^2} + \sqrt{x^2 + a^2} \operatorname{sign} x) \sqrt{d^2 - a^2}}{(d^2 - x^2) \sqrt{a^4 - x^4}},$$

$$\sigma(y) = -\frac{q}{2\pi} \frac{|y|(\sqrt{d^2 + a^2} \pm \sqrt{a^2 - y^2}) \sqrt{d^2 - a^2}}{(d^2 + y^2) \sqrt{a^4 - y^4}},$$

знак плюс соответствует правой $(+0 + iy)$ стороне, знак минус — левой $(-0 + iy)$. У к а з а н и е. Воспользоваться принципом симметрии Римана-Шварца.

$$7.199. q_1 = \frac{q}{3}.$$

$$7.200. q_1 = q \frac{\alpha}{\pi + \alpha}.$$

$$7.201. q_1 = q \frac{\pi + \alpha}{2\pi + \alpha - \beta}.$$

$$7.202. 1) d = (\sqrt{2} + 1)r_0;$$

$$2) d = r_0 \operatorname{tg} \left(\frac{3}{2} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{3}{2}} \right) = \frac{\sqrt{10} + 1}{2\sqrt{6} - \sqrt{15}} r_0.$$

$$7.203. d = \frac{1 + \operatorname{tg} \left(\frac{3}{2} \operatorname{arctg} \sqrt{6} \right)}{1 - \operatorname{tg} \left(\frac{3}{2} \operatorname{arctg} \sqrt{6} \right)} r_0 = \frac{2\sqrt{6} + \sqrt{42} - \sqrt{7} - 5}{2\sqrt{6} - \sqrt{42} - \sqrt{7} + 5} r_0.$$

$$7.204. q_1 = q \frac{r_1}{r_1 + r_2}.$$

$$7.205. q_1 = 0, q_2 = q.$$

$$7.206. q_1 = \frac{q}{3}.$$

$$7.207. q_1 = q \frac{2\pi - \alpha}{2\pi}.$$

$$7.208. q_1 = \frac{q}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{b^2}{ac}.$$

$$7.209. 1) d = \frac{5a + 4b}{3}; 2) d = \frac{4a + 5b}{3}.$$

$$7.210. q_1 = \frac{q}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{3}{5}}.$$

$$7.211. \frac{q}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2\sqrt{2} - 2}}{\sqrt{2} - 1}.$$

$$7.212. q_1 = \frac{q}{2\pi} \operatorname{arctg} 4, q_2 = \frac{q}{2\pi} \operatorname{arctg} 2\sqrt{6},$$

$$q_3 = \frac{q}{\pi} \operatorname{arctg} 2\sqrt{6}, q_4 = \frac{q}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{276 - 14\sqrt{6}}{375}.$$

$$7.213. c = \frac{4\sqrt{5} - 3}{9} a.$$

$$7.214. 1) d = \frac{h}{\sqrt{3}}; 2) d = h; 3) d = (2 + \sqrt{3})h.$$

$$7.215. q_1 = -q \left(1 - \frac{\varphi_0}{\alpha} \right).$$

$$7.216. 1) |d| < r_0, q_1 = -q \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{d}{r_0} \right);$$

$$2) d > r_0, q_1 = -q \left(\frac{3}{2} - \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{d}{r_0} \right); 3) d < -r_0, q_1 = q \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{d}{r_0} \right).$$

$$7.217. \quad 1) q_1 = -q \left(1 - \frac{4\alpha}{\pi} \right); \quad 2) q_1 = -\frac{q}{3} \left(\frac{4\alpha}{\pi} - 1 \right);$$

$$3) q_1 = -q \left(1 + \frac{4\alpha}{3\pi} \right); \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{h}{r_0}.$$

$$7.218. \quad q_1 = -\frac{4q}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{d}{r_0} \right)^{\frac{\pi}{\alpha}}.$$

$$7.219. \quad q_1 = -\frac{q}{3}.$$

$$7.220. \quad q_1 = -\frac{q}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{2 + 2d_1^{\frac{2}{3}} - d_1^{\frac{4}{3}}}{\sqrt{3} d_1^{\frac{2}{3}} (1 + d_1^{\frac{2}{3}})}, \quad d_1 = \frac{d - r_0}{d + r_0}.$$

$$7.221. \quad 1) q_1 = -q \left(1 - \frac{2\beta}{\pi - \alpha} \right); \quad 2) q_1 = -\frac{q(\alpha - \pi + 2\beta)}{\pi + \alpha};$$

$$3) q_1 = -q \left(1 + \frac{2\beta}{\pi + \alpha} \right); \quad \beta = \operatorname{arctg} \frac{h}{a}.$$

$$7.222. \quad q_1 = -\frac{q\alpha}{\pi - \alpha}.$$

$$7.223. \quad 1) q_1 = -q \frac{2\pi - \alpha - 2\beta}{2\alpha}; \quad 2) q_1 = -q \frac{\alpha - \pi + 2\beta}{2(\pi - \alpha)};$$

$$3) q_1 = -q \frac{2\beta - \alpha}{2(\pi - \alpha)}; \quad \beta = \operatorname{arctg} \frac{h}{a}.$$

$$7.224. \quad 1) q_1 = -q \frac{2\gamma - \alpha}{\beta - \alpha}; \quad 2) q_1 = -q \frac{2\pi - 2\gamma + \alpha}{2\pi - \beta + \alpha};$$

$$3) q_1 = -q \frac{\alpha - 2\gamma}{2\pi - \beta + \alpha}; \quad \gamma = \operatorname{arctg} \frac{h}{a}.$$

$$7.225. \quad 1) q_1 = -q \frac{\alpha}{2\pi - \beta + \alpha}; \quad 2) q_1 = -q \frac{\pi + \alpha}{2\pi - \beta + \alpha}.$$

$$7.226. \quad 1) q_1 = -q \frac{h}{H}.$$

$$7.227. \quad 1) q_1 = -q \frac{(d - 2r_1)r_2}{(r_2 - r_1)d}.$$

$$7.228. \quad 1) q_1 = -q \frac{r_1}{r_1 + r_2}; \quad 2) q_1 = -q \frac{(d + 2r_2)r_1}{(r_1 + r_2)d}; \quad 3) q_1 = -q \frac{(d - 2r_2)r_1}{(r_1 + r_2)d}.$$

$$7.229. \quad q_1 = -2q \left(1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{h}{r_0} \right).$$

$$7.230. \quad a = \frac{H}{\pi} \ln(\sqrt{2} + 1).$$

$$7.231. \quad q_1 = -\frac{2q}{3} \left(1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{h}{r_0} \right).$$

$$7.232. \quad q_1 = -2q \left(1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{h + \sqrt{h^2 + c^2}}{a + b} \right), \quad c^2 = a^2 - b^2.$$

$$7.233. \quad q_1 = -2q \left(1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{h + \sqrt{h^2 - c^2}}{a + b} \right), \quad c^2 = a^2 - b^2.$$

$$7.234. \quad q_1 = -q \left(1 - \frac{\varphi_0}{\pi} \right).$$

$$7.235. \quad q_1 = -\frac{q}{\pi} \arcsin \frac{d}{a}.$$

$$7.236. q_1 = -q \left(1 - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{d^2 - a^2}}{a} \right).$$

$$7.237. 1) q_1 = -q \left(\frac{3}{2} - \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{h + \sqrt{h^2 + a^2}}{a} \right); 2) q_1 = -\frac{3q}{4}.$$

$$7.238. 1) q_1 = -q \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{d + \sqrt{d^2 - c^2}}{a + b} \right);$$

$$2) q_1 = -q \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{h + \sqrt{h^2 + c^2}}{a + b} \right); c^2 = a^2 - b^2.$$

$$7.239. 1) q_1 = \left(\frac{5}{4} - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{h}{r_0} \right); 2) q_1 = \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{h}{r_0} \right);$$

$$3) q_1 = -\frac{q}{4}; 4) q_1 = -\frac{3q}{4}; 5) q_1 = -\frac{q}{2}.$$

$$7.240. 1) q_1 = -q \left(\frac{3}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{d}{a} \right); 2) q_1 = q \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{d}{a} \right);$$

$$3) q_1 = -q \left(1 - \frac{\alpha}{2\pi} \right); 4) q_1 = -q \frac{\pi - \alpha}{2\pi}; 5) q = -\frac{q}{2}.$$

$$7.241. Q = \frac{q_0(l_2 - l_1)}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{e^{\frac{\pi a}{H}} - \cos \frac{\pi h}{H}}{\sin \frac{\pi h}{H}}.$$

7.242. У к а з а н и е. Достаточно рассмотреть случай круглого цилиндра, радиус которого r_0 . При $z \rightarrow \infty$ комплексный потенциал ведет себя как $-2i(q + q_0) \ln z$, следовательно,

$$\lim_{z \rightarrow \infty} z w'(z) = -2i(q + q_0), \quad \operatorname{Im} w|_L = \text{const}. \quad (7.44)$$

Пусть функция $\zeta = \zeta(z)$ конформно отображает область Ω (внешность круга, радиус которого r_0), на единичный круг, а точку z_0 в его центр. Формула (7.25) не применима, так как не выполняется первое условие (7.44). Комплексный потенциал следует отыскивать в виде

$$w(z) = 2qi \ln \frac{1}{\zeta} + f(z),$$

где $f(z)$ — аналитическая в Ω функция, удовлетворяющая условиям (7.44).

$$7.243. w(z) = \begin{cases} 2iq \ln \frac{dz - r_0^2}{z - d} + C_1, & |z| < r_0, \\ 2i(q + q_0) \ln \frac{1}{z} + C_2, & |z| > r_0, \end{cases}$$

$$\operatorname{Im} C_1 = \operatorname{Im} C_2.$$

$$7.244. w(z) = \begin{cases} C_1, & |z| < r_0, \\ 2iq \ln \frac{dz - r_0^2}{z - d} + 2i(q + q_0) \ln \frac{1}{z} + C_2, & |z| > r_0, \end{cases}$$

$$\operatorname{Im} C_1 = \operatorname{Im} C_2.$$

$$7.245. w(z) = \begin{cases} 2iq_1 \ln \frac{d_1 z - r_0^2}{z - d_1} + C_1, & |z| < r_0, \\ 2iq_2 \ln \frac{d_2 z - r_0^2}{z - d_2} + 2i(q_1 + q_2 + q_0) \ln \frac{1}{z} + C_2, & |z| > r_0, \end{cases}$$

$$\operatorname{Im} C_1 = \operatorname{Im} C_2.$$

$$7.246. \sigma(\varphi) = \frac{q_0}{2\pi r_0} + \frac{qd(d - r_0 \cos \varphi)}{\pi r_0(d^2 + r_0^2 - 2dr_0 \cos \varphi)}.$$

У к а з а н и е. $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$, где σ_1 — плотность заряда, индуцированного на заземленном цилиндре нитью, заряд единицы длины которой q , σ_2 — плотность заряда на незаземленном цилиндре с зарядом $q + q_0$ на единицу длины при отсутствии нити (см. предыдущую задачу).

7.247. $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$, где плотность σ_1 дана в ответе к задаче 7.192, а σ_2 дана в ответе к задаче 7.165. У к а з а н и е. См. предыдущую задачу.

$$7.248. \text{Плотность } \sigma_- \text{ дана в ответе к задаче 7.173; } \sigma_+ = \frac{q + q_0}{2\pi r_0}.$$

У к а з а н и е. См. задачу 7.246.

$$7.249. q_{1,2} = \frac{q_0}{2} \mp \frac{q}{\pi} \operatorname{arccotg} \frac{ad - b\sqrt{d^2 + c^2}}{c^2}.$$

$$7.250. q(x) = -\frac{khq}{\pi(x^2 + h^2)}i.$$

$$7.251. q(\varphi) = \frac{kq(r_0^2 - d^2)}{2\pi r_0(r_0^2 + d^2 - 2r_0d \cos \varphi)}e^{i\varphi}.$$

7.252. У к а з а н и е. Применить теорему единственности аналитической функции.

$$7.253. V = \frac{qx}{\pi(x^2 + h^2)}.$$

$$7.254. u(r, \varphi) = \frac{q}{4\pi\rho_0} \ln \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^8 + 2 \left(\frac{r}{r_0} \right)^4 \cos 4\varphi \right] + C.$$

$$7.255. u(r, \varphi) = \frac{q}{4\pi\rho_0} \ln \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{8}{3}} + 2 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{4}{3}} \cos \frac{4\varphi}{3} \right] + C.$$

$$7.256. V(x, 0) = \frac{q(\sqrt{x} \mp \sqrt{r_0} \cos \frac{\varphi_0}{2})}{2\pi\sqrt{x}(x + r_0 \mp 2\sqrt{xr_0} \cos \frac{\varphi_0}{2})}, \text{ знак плюс соответствует верх-}$$

ней $(x + i0)$ стороне полуплоскости, знак минус — нижней $(x - i0)$.

$$7.257. V(r, 0) = \frac{2qr}{\pi} \frac{r^2 - r_0^2 \cos 2\varphi_0}{r^4 - 2r^2 r_0^2 \cos 2\varphi_0 + r_0^4},$$

$$V\left(r, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{2qr}{\pi} \frac{r^2 + r_0^2 \cos 2\varphi_0}{r^4 + 2r^2 r_0^2 \cos 2\varphi_0 + r_0^4}.$$

$$7.258. w(z) = \frac{q}{2\pi} \ln \left[z^{\frac{\pi}{\pi-\alpha}} + (de^{i\alpha})^{\frac{\pi}{\pi-\alpha}} \right] + C; \text{ на гранях угла, т. е. в точках}$$

$$z = re^{\pm i\alpha}, \text{ скорость } V = \frac{qe^{\pm i\alpha}}{2(\pi - \alpha) \left[1 + \left(\frac{d}{r} \right)^{\frac{\pi}{\pi-\alpha}} \right]}.$$

$$7.259. 1) w(z) = \frac{q}{2\pi\rho_0} \ln \frac{r_0^2 - z^2}{r_0^2 + z^2} + C; \quad 2) w(z) = \frac{q}{2\pi\rho_0} \ln \left(1 + \frac{r_0^4}{z^4} \right) + C.$$

7.260. Скорость равна нулю на прямых, параллельных ребру угла, следы которых $z = 0$, $z = r_0$, $z = r_0 e^{i\alpha}$.

$$7.261. w = \frac{q}{2\pi} \ln(z^8 + r_0^8) + C.$$

$$7.262. w(z) = \frac{q}{2\pi} \ln(z - z_1) \left(1 - \frac{r_0^2}{z\bar{z}_1} \right) + C.$$

$$7.263. 1) w(z) = \frac{q}{2\pi} \ln \frac{(z - z_1)(\bar{z}_1 z - r_0^2)}{(z - z_2)(\bar{z}_2 z - r_0^2)} + C;$$

$$2) w(z) = \frac{q}{2\pi} [\ln z - \ln(z - z_1)(\bar{z}_1 z - r_0^2)] + C.$$

$$7.264. V(r, \varphi) = \frac{qd \sin \varphi}{\pi(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)} i e^{i\varphi}.$$

$$7.265. V(x, 0) = \frac{q}{2\pi\rho_0} \frac{x(\sqrt{a^2 - x^2} \pm \sqrt{a^2 + d^2})}{(d^2 + x^2)\sqrt{d^2 - x^2}}, \quad \text{знак плюс соответствует} \\ \text{верхней } (x + i0), \text{ знак минус — нижней } (x - i0) \text{ сторонам полосы.}$$

$$7.266. V(0, y) = \frac{q}{2\pi\rho_0} \frac{-d\sqrt{H^2 + d^2} + iy\sqrt{H^2 - y^2}}{(y^2 + d^2)\sqrt{H^2 - y^2}}, \quad |y| < \frac{H}{2},$$

$$V(0, y) = \frac{iq}{2\pi\rho_0} \frac{|y|\sqrt{y^2 - H^2} \mp d\sqrt{H^2 + d^2}}{(y^2 + d^2)\sqrt{y^2 - H^2}}, \quad |y| > \frac{H}{2},$$

где знак минус соответствует правой стороне $(+0 + iy)$ плоскости, минус — левой $(-0 + iy)$.

7.267. $\frac{q}{2}$. У к а з а н и е. При конформном отображении $\zeta = \zeta(z)$ расход жидкости через контур L_z и через его образ L_ζ одинаков:

$$Q = \operatorname{Re} \int_{L_z} \bar{V}(z) i dz = \operatorname{Re} \int_{L_z} w'_z i dz = \operatorname{Re} \int_{L_\zeta} w'_\zeta \zeta' i \frac{d\zeta}{\zeta} = \operatorname{Re} \int_{L_\zeta} \bar{V}(\zeta) i d\zeta.$$

$$7.268. V(x, \pm H) = \frac{q}{4H\rho_0} \operatorname{th} \frac{\pi x}{2H}.$$

$$7.269. V(r_0, \varphi) = \mp \frac{q}{\pi\rho_0 r_0} \frac{\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{\cos \varphi \sqrt{\cos \frac{\varphi + \alpha}{2} \sin \frac{\varphi - \alpha}{2}}} i e^{i\varphi},$$

где верхний знак соответствует внешней (по отношению к источнику) стороне, а нижний — внутренней стороне.

$$7.270. V(r_0, \varphi) = \frac{q \left(\cos^{\frac{4}{3}} \frac{\varphi}{2} - \sin^{\frac{4}{3}} \frac{\varphi}{2} \right)}{3\pi r_0 \left(\cos^{\frac{8}{3}} \frac{\varphi}{2} + \cos^{\frac{4}{3}} \frac{\varphi}{2} \sin^{\frac{4}{3}} \frac{\varphi}{2} + \cos^{\frac{8}{3}} \frac{\varphi}{2} \right) \cos^{\frac{1}{3}} \frac{\varphi}{2} \sin^{\frac{4}{3}} \frac{\varphi}{2}},$$

$$V(x, 0) = \frac{4qr_0 \left[(r_0 + x)^{\frac{4}{3}} - (r_0 - x)^{\frac{4}{3}} \right]}{3\pi \left[(r_0 + x)^{\frac{8}{3}} + (r_0^2 - x^2)^{\frac{4}{3}} + (r_0 - x)^{\frac{8}{3}} \right] (r_0^2 - x^2)^{\frac{1}{3}}}.$$

$$7.271. w(z) = \frac{q}{2\pi\rho_0} \ln \frac{(z^2 + h^2)(z^2 h^2 + r_0^4)}{z^2}, \quad V(\varphi) = \frac{q}{\pi} \frac{h^2 r_0^2 \sin 2\varphi (-i) e^{2i\varphi}}{h^4 + r_0^4 + 2h^2 r_0^2 \cos 2\varphi}.$$

$$7.272. V(r_0, \varphi) =$$

$$= \frac{2\sqrt[3]{2} q e^{i(\varphi + \frac{\pi}{2})} \left(\sqrt[3]{\cos^2 \frac{\varphi}{2}} - \sqrt[3]{\sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right) \cos^2 \beta |\sin \varphi|^{-\frac{1}{3}}}{3\pi r_0 \left(\sqrt[3]{\cos^2 \frac{\varphi}{2}} + \sqrt[3]{\sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right) \left(\sqrt[3]{\cos^4 \frac{\varphi}{2}} + \sqrt[3]{\sin^4 \frac{\varphi}{2}} - \cos 2\beta \sqrt[3]{2 \sin^2 \varphi} \right)},$$

$$V(x, 0) = \frac{8qr_0 \left(\sqrt[3]{(x + r_0)^2} + \sqrt[3]{(x - r_0)^2} \right) \cos^2 \beta (x^2 - r_0^2)^{-\frac{1}{3}}}{3\pi \left(\sqrt[3]{(x + r_0)^4} + \sqrt[3]{(x - r_0)^4} + 2 \cos 2\beta \sqrt[3]{x^2 - r_0^2} \right)}, \quad \beta = \frac{\pi}{6} + \frac{2}{3} \operatorname{arctg} \frac{d}{a}.$$

7.273. На верхней части ($y > 0$) поверхности цилиндра

$$V = ie^{i(\frac{\pi}{2}-\psi)} \times \\ \times \frac{q \left[(d+a)^{\frac{4}{3}} - (d-a)^{\frac{4}{3}} \right] \sin^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2} \right) \sin^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2} \right)}{6\pi a \left[(d+a)^{\frac{4}{3}} \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2} \right) + (d-a)^{\frac{4}{3}} \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2} \right) \right] \left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2} \right) \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2} \right) \right]},$$

на нижней части ($y < 0$)

$$V = -ie^{i(\frac{\pi}{2}+\theta)} \times \\ \times \frac{q \left[(d+a)^{\frac{4}{3}} - (d-a)^{\frac{4}{3}} \right] \sin^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) \sin^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right)}{6\pi a \left[(d+a)^{\frac{4}{3}} \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right) + (d-a)^{\frac{4}{3}} \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) \right] \left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right) \right]}.$$

7.274. На верхней стороне ($y > 0$)

$$V = \frac{-ie^{i(\frac{\pi}{2}-\psi)} q \sin \frac{2(\pi-2\alpha)}{3}}{6\pi a \left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2} \right) + \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2} \right) \right]} \times \\ \times \frac{\left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2} \right) - \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2} \right) \right] \sin^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2} \right) \sin^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2} \right)}{\left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2} \right) - 2 \sin^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2} \right) \sin^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2} \right) \sin \frac{2(\pi-2\alpha)}{3} + \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2} \right) \right]},$$

на нижней стороне ($y < 0$)

$$V = \frac{ie^{i(\frac{\pi}{2}-\theta)} q \sin \frac{2(\pi-2\alpha)}{3}}{6\pi a \left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) + \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right) \right]} \times \\ \times \frac{\left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) - \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right) \right] \sin^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) \sin^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right)}{\left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) - 2 \sin^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) \sin^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right) \sin \frac{2(\pi-2\alpha)}{3} + \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right) \right]}.$$

$$\mathbf{7.275.} \quad V(\varphi) = \frac{qi}{2\pi\rho_0} \frac{(b \cos \varphi + ia \sin \varphi) \sin \varphi}{(d_1 - \cos \varphi)(a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi)}, \quad d_1 = \frac{d^2 + b^2}{ad + b\sqrt{d^2 - c^2}}.$$

$$\mathbf{7.276.} \quad V(\varphi) = -\frac{qi}{2\pi\rho_0} \frac{(b \cos \varphi + ia \sin \varphi) \cos \varphi}{(h_1 + \sin \varphi)(a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi)}, \quad h_1 = \frac{h^2 + a^2}{bh + a\sqrt{h^2 + c^2}}.$$

$$\mathbf{7.277.} \quad V(x, y) = -\frac{qpy(y+ip)}{\pi\rho_0(y^2+p^2)} \left[y^2 + 2p \left(\sqrt{d + \frac{p}{2}} - \sqrt{\frac{p}{2}} \right)^2 \right].$$

$$\mathbf{7.278.} \quad V(x, y) = \frac{qth\frac{\pi y}{2p}(y+ip)}{2\rho_0(y^2+p^2)}.$$

$$\mathbf{7.279.} \quad V(x, y) = \frac{2q \left[\left(\sqrt{y^2+1} + y \right)^{\frac{4}{3}} - \left(\sqrt{y^2+1} - y \right)^{\frac{4}{3}} \right] (y + i\sqrt{y^2+1})}{3\pi\rho_0 \left[\left(\sqrt{y^2+1} + y \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\sqrt{y^2+1} - y \right)^{\frac{4}{3}} + 1 \right] (2y^2+1)}.$$

$$7.280. V(x, y) = \frac{8qy\sqrt{y^2+1} \left(y + i\sqrt{y^2+1} \right)}{\pi\rho_0 \left[\left(\sqrt{y^2+1} + y \right)^4 + \left(\sqrt{y^2+1} - y \right)^4 + 1 \right]}.$$

$$7.281. V(x, y) = \frac{qy\sqrt{y^2+1} \left(y + i\sqrt{y^2+1} \right)}{\pi\rho_0(2y^2+1)^2}.$$

7.282. У к а з а н и е. Вывести уравнение для скалярного потенциала v поля $\mathbf{E}$ ($\mathbf{E} = -\nabla v$) и обратиться к примеру 7.8.

7.283. $w(z) = \frac{iJ}{\pi\sigma} \ln \frac{z+a}{z-a} + C$; линии тока — окружности, проходящие через точки $(a, 0)$ и $(-a, 0)$: $x^2 + (y - C_1)^2 = C_1^2 + a^2$.

$$7.284. w(z) = \frac{iJ}{\pi\sigma} \ln \frac{z^{\frac{\pi}{\alpha}} + a^{\frac{\pi}{\alpha}}}{z^{\frac{\pi}{\alpha}} - a^{\frac{\pi}{\alpha}}} + C;$$

$$j(r, \varphi) = \left\{ 2Jr^{\frac{\pi}{\alpha}} a^{\frac{\pi}{\alpha}} \left[\left(r^{\frac{2\pi}{\alpha}} \cos \frac{(\pi+\alpha)\varphi}{\alpha} - a^{\frac{2\pi}{\alpha}} \cos \frac{(\pi-\alpha)\varphi}{\alpha} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + i \left(r^{\frac{2\pi}{\alpha}} \cos \frac{(\pi+\alpha)\varphi}{\alpha} + a^{\frac{2\pi}{\alpha}} \cos \frac{(\pi-\alpha)\varphi}{\alpha} \right) \right] \right\} / \left[\alpha r \left(r^{\frac{4\pi}{\alpha}} + a^{\frac{4\pi}{\alpha}} - 2r^{\frac{2\pi}{\alpha}} a^{\frac{2\pi}{\alpha}} \cos \frac{2\pi\varphi}{\alpha} \right) \right].$$

$$7.285. w(z) = \frac{iJ}{\pi\sigma} \ln \frac{\left(z^{\frac{\pi}{2\alpha}} - ia^{\frac{\pi}{2\alpha}} \right) \left(z^{\frac{\pi}{2\alpha}} a^{\frac{\pi}{2\alpha}} - ir_0^{\frac{\pi}{2\alpha}} \right)}{\left(z^{\frac{\pi}{2\alpha}} + ia^{\frac{\pi}{2\alpha}} \right) \left(z^{\frac{\pi}{2\alpha}} a^{\frac{\pi}{2\alpha}} + ir_0^{\frac{\pi}{2\alpha}} \right)} + C;$$

$$7.286. v(x, y) = \frac{J}{4\pi\sigma} \ln \frac{1}{\left[\operatorname{ch} \frac{\pi x}{H} + \cos \frac{\pi(y-y_0)}{H} \right] \left[\operatorname{ch} \frac{\pi x}{H} + \cos \frac{\pi(y+y_0)}{H} \right]} + C,$$

$$j\left(x, \frac{H}{2}\right) = \frac{J}{2H} \frac{\operatorname{sh} \frac{2\pi x}{H} - i \sin \frac{2\pi y}{H}}{\operatorname{ch} \frac{2\pi x}{H} + \cos \frac{2\pi y}{H}}.$$

$$7.287. j(x, y) = \frac{J}{2dH} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{H} + i \sin \frac{\pi y}{H}}{\operatorname{ch} \frac{\pi x}{H} - \cos \frac{\pi y}{H}}.$$

$$7.288. j(x, y) = \frac{2J}{dH} \frac{\cos \frac{\pi x}{H} \operatorname{ch} \frac{\pi y}{H} - i \sin \frac{\pi x}{H} \operatorname{sh} \frac{\pi y}{H}}{\cos \frac{2\pi x}{H} + \operatorname{ch} \frac{2\pi y}{H}}.$$

$$7.289. w(z) = \frac{iJ}{\pi\sigma d} \ln \frac{z - ir_0}{z + ir_0} + C, \quad j(r, \varphi) = \frac{2r_0 J (r_0^2 - r^2 \cos 2\varphi - ir^2 \sin 2\varphi)}{\pi d (r_0^4 + r^4 - 2r_0^2 r^2 \cos 2\varphi)}.$$

У к а з а н и е. Отобразить круг на полуплоскость (см. задачу 7.283).

$$7.290. w(z) = \frac{iJ}{2\pi\sigma} \ln \frac{(z+a)(z+\frac{r_0^2}{a})}{(z-a)(z-\frac{r_0^2}{a})} + C; \quad 1) j(0, y) = -\frac{J}{\pi a} \frac{(r_0^2 + a^2)(y^2 + r_0^2)}{(y^2 + a^2)(y^2 + \frac{R_0^4}{a^2})};$$

$$2) j(x, 0) = \frac{J}{\pi a} \frac{(r_0^2 + a^2)(r_0^2 - x^2)}{(x^2 - a^2)(\frac{r_0^4}{a^2} - x^2)}.$$

$$7.291. j(r, \varphi) = \frac{iJ(r_0^4 - r^4 + 2r_0^2 r^2 \sin 2\varphi)}{\pi d (r_0^4 + r^4 + 2r_0^2 r^2 \cos 2\varphi)}.$$

У к а з а н и е. Отобразить полукруг на полуплоскость (см. задачу 7.283).

$$7.292. j(x, y) = \frac{J}{2dH} \frac{\operatorname{sh} \frac{2\pi x}{H} + i \sin \frac{2\pi y}{H}}{\operatorname{ch} \frac{2\pi x}{H} - \cos \frac{2\pi y}{H}}.$$

$$7.293. j(\varphi, z) = \frac{J}{4\pi r_0} \frac{\sin \varphi + i \operatorname{sh} \frac{z}{r_0}}{\operatorname{ch} \frac{z}{r_0} - \cos \varphi}.$$

У к а з а н и е. Задача для определения скалярного потенциала (см. задачу 1.451)

$$\frac{1}{r_0^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = -\frac{J}{\sigma r_0} \delta(\varphi) \cdot \delta(z), \quad -\pi \leq \varphi < \pi, \quad -\infty < z < \infty,$$

$$\left. \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pm\pi} = 0 \quad (\text{из четности по } \varphi),$$

в переменных $\xi = vr_0$, $\eta = z$ принимает форму

$$\frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} = -\frac{J}{\sigma} \delta(\xi) \cdot \delta(\eta), \quad -\pi r_0 \leq \varphi < \pi r_0, \quad -\infty < \eta < \infty,$$

$$\left. \frac{\partial v}{\partial \xi} \right|_{\varphi=\pm\pi r_0} = 0.$$

На комплексной плоскости ($\zeta = \xi + i\eta$) поле $E = -i\overline{w}'$, $j = -i\sigma\overline{w}'$, интенсивность точечного источника $N = \frac{J}{\sigma}$.

$$7.294. j(\varphi, z) = \frac{J}{2\pi r_0} \frac{\sin 2\varphi + i \operatorname{sh} \frac{2z}{r_0}}{\operatorname{ch} \frac{2z}{r_0} - \cos 2\varphi}. \quad \text{См. указание к предыдущей задаче.}$$

$$7.295. j(\varphi, z) = \frac{J}{\pi r_0} \frac{-\cos \varphi \operatorname{ch} \frac{z}{r_0} + i \sin \varphi \operatorname{sh} \frac{z}{r_0}}{\cos 2\varphi + \operatorname{ch} \frac{2z}{r_0}}. \quad \text{См. указание к задаче 7.293.}$$

$$7.296. F = -i \frac{q^2}{h}.$$

$$7.297. F = -\frac{q^2}{r_0} e^{\frac{3\pi}{4}i}.$$

$$7.298. F = \frac{q^2(2\sqrt{3} - 9i)}{9h}.$$

$$7.299. F = \frac{q^2}{2r_0} \left(1 - \cos \varphi_0 - i \sin \varphi_0 \frac{2 - \cos \varphi_0}{1 - \cos \varphi_0} \right).$$

$$7.300. F = -\frac{q^2}{r_0} \left(1 + \frac{i\pi}{\alpha} \operatorname{ctg} \frac{\pi\varphi_0}{\alpha} \right) e^{i\varphi_0}.$$

$$7.301. 1) F = -\frac{2q^2d}{d^2 - a^2}; \quad 2) F = -\frac{q^2}{h} \frac{a^2 + 2h^2}{a^2 + h^2} i.$$

$$7.302. 1) F = \frac{2q^2d}{a^2 - d^2}; \quad 2) F = \frac{q^2h}{a^2 + h^2} i.$$

$$7.303. F = -\frac{q^2}{h} \frac{(H^2 - 3h^2)}{H^2 - h^2} i.$$

$$7.304. F = -\frac{q^2}{h} \frac{h^2 + H^2}{h^2 - H^2} i.$$

$$7.305. F = \frac{2q^2 d}{d^2 - r_0^2}.$$

$$7.306. F = \frac{q^2(d^4 + 4d^2 r_0^2 - r_0^4)}{d(r_0^4 - d^4)}$$

$$7.307. F = \frac{2d(q_2^2 - q_1^2)}{r_0^2 - d^2}$$

$$7.308. F = -\frac{q^2}{d} \left(1 + \frac{2d^2 r_0^2 (d^2 + r_0^2)}{(d^2 - r_0^2)(d^4 + r_0^4)} - \frac{(d^2 - r_0^2)^2}{d^4 + r_0^4} i \right).$$

$$7.309. 1) F = -\frac{2q^2 d}{d^2 - r_0^2} \left(1 - \frac{2\sqrt{3} r_0}{9d} \right);$$

$$2) F = -\frac{2q^2 h}{h^2 + r_0^2} \left(1 + \frac{2r_0}{3h} \operatorname{ctg} \frac{2\alpha - \pi}{3} \right) i, \quad \alpha = 2 \operatorname{arctg} \frac{h}{r_0}; \quad 3) F = -\frac{q^2}{r_0} i.$$

$$7.310. 1), 2) F = -\frac{2q^2 d}{|d^2 - a^2|}.$$

$$7.311. 1) F = \frac{2q^2 d(7a^4 + 2a^2 d^2 + d^4)}{(a^2 + d^2)(a^4 - 6a^2 d^2 + d^4)} i;$$

$$2) F = -i \frac{2q^2 a}{a^2 + d^2} \left(\frac{|d|}{a} + \frac{2}{3} \operatorname{ctg} \left(\frac{4\alpha}{3} - \frac{\pi}{6} \right) \right) \frac{|d|}{d}, \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{|d|}{a}.$$

$$7.312. 1) F = -i \frac{2q^2}{h}; \quad 2) F = -\frac{2q^2}{d} \left(1 + \frac{\pi r_0}{2d} \operatorname{tg} \frac{\pi r_0}{d} \right).$$

$$7.313. F = -q^2 \frac{r_0^2 + x^2 + r_0 x}{(r_0 + x)(r_0^2 + x^2)}.$$

$$7.314. F = -\frac{2\pi q^2}{H \operatorname{sh} \frac{2\pi a}{H}}.$$

$$7.315. 1) F = -\frac{2q^2}{r_0} \sin^2 \frac{\alpha}{2}; \quad 2) F = -\frac{q^2}{2r_0} \frac{2 \sin \frac{\alpha - \psi}{2} \sin \frac{\alpha + \psi}{2} - i \sin \psi}{\sin \frac{\alpha - \psi}{2} \sin \frac{\alpha + \psi}{2}} e^{i\psi}.$$

$$7.316. F = -i \frac{q^2}{d} \frac{d^4 + 4r_0^2 d^2 - r_0^4}{d^4 - r_0^4}.$$

$$7.317. F = -\frac{\pi q^2}{H} \operatorname{ctg} \frac{\pi h}{H}.$$

$$7.318. F = -i \frac{\pi q^2}{H} \frac{\sin^2 \frac{\pi h}{2H} + \cos \frac{\pi d}{2H} \sin^2 \frac{\pi d}{2H}}{\sin \frac{\pi d}{H} \sin \frac{\pi(d-h)}{2H} \sin \frac{\pi(d+h)}{2H}}.$$

Сила обращается в нуль при условии $d = \frac{H}{\pi} \operatorname{arcsin} \left(\frac{1}{2} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 8 \sin^2 \frac{\pi h}{2H}}} \right)$.

$$7.319. F = \frac{q^2}{d} \frac{2d^4 + a^2 d^2 + a^4}{d^4 - a^4}.$$

$$7.320. F = -i \frac{q^2}{a\sqrt{3}} \left[\frac{3 + 2\sqrt{2}}{2(2 - \sqrt{2})(5 - \sqrt{2} - 2\sqrt{3(2 - \sqrt{2})})} - 1 \right].$$

$$7.321. F = i \frac{q^2}{a} \left[\frac{3 + 2\sqrt{2}}{2(2 - \sqrt{2})(2\sqrt{2(2 - \sqrt{2})} + 3\sqrt{2} - 1)} - 1 \right].$$

$$7.322. F = \frac{q^2}{\sqrt{d^2 - c^2}} \left[\frac{(d^2 + b^2)(bd + a\sqrt{d^2 - c^2})}{(d^2 - a^2)(ad + b\sqrt{d^2 - c^2})} + \frac{d}{\sqrt{d^2 - c^2}} \right].$$

$$7.323. F = -\frac{iq^2}{\sqrt{d^2 + c^2}} \left[\frac{(d^2 + a^2)(ad + b\sqrt{d^2 + c^2})}{(d^2 - b^2)(bd + a\sqrt{d^2 + c^2})} + \frac{d}{\sqrt{d^2 + c^2}} \right].$$

$$7.324. F = -i \frac{q^2}{\sqrt{h^2 + c^2}} \left[\frac{(b\sqrt{h^2 + c^2} + ah) + (a\sqrt{h^2 + c^2} + bh)}{(h^2 + a^2)(h^2 - b^2)} + \frac{h}{\sqrt{h^2 + c^2}} \right],$$

$$c^2 = a^2 - b^2.$$

$$7.325. F = -i \frac{q^2}{\sqrt{h^2 - c^2}} \left[\frac{(b\sqrt{h^2 - c^2} + ah) + (a\sqrt{h^2 - c^2} + bh)}{(h^2 - a^2)(h^2 + b^2)} + \frac{h}{\sqrt{h^2 - c^2}} \right],$$

$$c^2 = a^2 - b^2.$$

$$7.326. 1) F = \frac{q^2 d(5 - 3d^2)}{(1 - d^2)(2 - d^2)}; \quad 2) F = -\frac{q^2 h}{2 + h^2} i. \quad \text{См. указание к задаче 7.57.}$$

$$7.327. 1) F = \frac{q^2}{d} \frac{d^2 + 1}{d^2 - 1}; \quad 2) F = -\frac{17\sqrt{2}q^2}{54}. \quad \text{См. указание к задаче 7.102.}$$

$$7.328. 1) F = \frac{q^2}{p + 2d} \frac{2\sqrt{p + 2d} - \sqrt{p}}{\sqrt{p + 2d} - \sqrt{p}}; \quad 2) F = -\frac{\pi^2 q}{6p}. \quad \text{См указание к задаче 7.100.}$$

$$7.329. F = -\frac{2q^2 r_0^2}{d(d^2 - r_0^2)}.$$

$$7.330. F = \frac{2q}{d} \left[q_0 + \left(\frac{1}{2} - \frac{2r_0^4}{d^4 - r_0^4} \right) q \right].$$

$$7.331. 1), 2) F = -\frac{2dq(q + q_0)}{r_0^2}; \quad 3) F = -\frac{2dq(q - q_0)}{r_0^2}.$$

$$7.332. 1) F = -\frac{2q^2(d - \sqrt{d^2 - a^2})}{d^2 - a^2}; \quad 2) F = -\frac{q^2}{h} \left(\frac{a^2 + 2h^2}{a^2 + h^2} - \frac{2h}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right) i.$$

$$7.333. F = -\frac{q^2}{\sqrt{d^2 - c^2}} \left(\frac{3 - d_1^2}{d_1^2 - 1} + \frac{d}{\sqrt{d^2 - c^2}} \right), \quad d_1 = \frac{d + \sqrt{d^2 - c^2}}{a + b}.$$

$$7.335. v(x, y) = \frac{v_1 - v_2}{\ln 2 \sqrt{\frac{2}{5}}} \ln 2 \sqrt{\frac{(x + 2a)^2 + y^2}{(x + 5a)^2 + y^2}} + v_2.$$

$$7.336. v(x, y) = \frac{v_1 - v_2}{\ln \frac{5}{4}} \ln \frac{5}{2} \sqrt{\frac{(x - 7a)^2 + y^2}{(x - 28a)^2 + y^2}} + v_2.$$

$$7.337. q(\varphi) = \frac{3k(v_2 - v_1)}{5a \ln 2} \frac{e^{i\varphi}}{5 - 4 \cos \varphi}.$$

$$7.338. Q = \frac{2\pi k(v_1 - v_2)}{\ln \frac{2}{3}}.$$

У к а з а н и е. Комплексный потенциал $w = Bi \ln \frac{1}{\zeta} + C$, поток $Q = 2\pi k B$ (см. пример 7.7 и соотношение 7.18).

$$7.339. v_2 = v_1 + \frac{Q}{2\pi k \ln \frac{3}{4}}. \text{ См. указание к предыдущей задаче.}$$

$$7.340. q(\varphi) = \frac{3D(v_2 - v_1)}{32a \ln \frac{7}{2}} \frac{e^{i\varphi}}{5 - 4 \cos \varphi}, \quad q_0 = 2\pi D \frac{v_2 - v_1}{\ln \frac{7}{2}}.$$

$$7.341. v(x, y) = \frac{v_0}{\ln \frac{27}{35}} \ln \frac{9}{7} \sqrt{\frac{x - 49a}{(x - 81a)^2 + y^2}}.$$

$$7.342. 1) v(x, y) = \frac{v_0}{\ln 2} \ln 2 \sqrt{\frac{(x - 5a)^2 + y^2}{(4x - 5a)^2 + y^2}}; 2) f(\psi) = \frac{15v_0 T_0}{a \ln 2} \frac{1}{17 - 8 \cos \psi}.$$

$$7.343. j(\varphi) = \frac{58\sigma v_0 e^{i\varphi}}{11a \ln \frac{11}{45} (65 - 33 \cos \varphi)}, \quad j(\psi) = \frac{112\sigma v_0 e^{i\psi}}{15a \ln \frac{11}{45} (113 - 15 \cos \psi)}.$$

$$7.344. J = 4\pi\sigma q_2.$$

$$7.345. R = \frac{1}{2\pi\sigma} \ln \frac{27}{7}.$$

$$7.346. v(x, y) = \frac{v_1 - v_2}{\ln 7} \ln 7 \sqrt{\frac{x^2 + (y - 24a)^2}{x^2 + (y + 24a)^2}} + v_2.$$

$$7.347. v(x, y) = 2q \ln 5 \sqrt{\frac{(x - a)^2 + y^2}{(x - 25a)^2 + y^2}}, \quad v_2 - v_1 = 2q \ln 5.$$

$$7.348. q(x) = -\frac{24ka(v_2 - v_1)i}{(x^2 + 144a^2) \ln 5}.$$

$$7.349. C = \left(4 \ln \frac{d + \sqrt{d^2 - r_0^2}}{r_0} \right)^{-1} = \frac{1}{4 \operatorname{arccch} \frac{d}{r_0}}.$$

$$7.350. C = \frac{1}{2 \ln \frac{8}{3}}.$$

$$7.351. v(r, \varphi) = \begin{cases} C, & r^2 - 46ar \cos \varphi + 88a^2 \leq 0, \\ 2q_2 \ln \frac{3}{7} \sqrt{\frac{r^2 - 144ar \cos \varphi + 5184a^2}{r^2 - 64ar \cos \varphi + 1024a^2}} + C, & \begin{cases} r^2 - 46ar \cos \varphi + 88a^2 \geq 0, \\ r \leq 48a, \end{cases} \\ 2(q_1 + q_2) \ln \frac{48a}{r} + 2q_2 \ln \frac{9}{14} + C, & r \geq 48a. \end{cases}$$

$$7.352. E(z) = \frac{48av_0}{\ln 14} \frac{1}{(\bar{z} - a)(\bar{z} - 49a)}, \quad E(M_0) = \frac{3v_0 i}{160a \ln 14}.$$

$$7.353. E(z) = \frac{30qa}{(\bar{z} - 5a)(\bar{z} - 20a)}, \quad E(M_0) = \frac{15qi}{34a}.$$

$$7.354. j(\varphi) = \frac{56\sigma(v_1 - v_2)e^{i\varphi}}{33a \ln \frac{11}{3} (65 + 33 \sin \varphi)}.$$

$$7.355. j_1(\varphi) = -\frac{2\sigma v_0 e^{i\varphi}}{3a \ln 3(5 - 3 \cos \varphi)}, j_2(\psi) = \frac{2\sigma v_0 e^{i\psi}}{3a \ln 3(5 + 3 \cos \psi)}, -J_1 = J_2 = \frac{\pi \sigma v_0}{a \ln 3}.$$

У к а з а н и е. Для определения полного тока применить формулу 7.18, избавляющую от необходимости интегрировать плотность тока.

$$7.356. \sigma(\varphi) = -\frac{6v_0}{7a\pi \ln 35} \cdot \frac{1}{25 - 7 \cos \varphi}, \quad q_1 = -\frac{v_0}{2 \ln 35}.$$

У к а з а н и е. Показать, что плотность заряда на заземленном и заряженном (потенциал v_0 либо заряд q на единицу длины) проводниках, поперечные сечения которых ограничены, соответственно, окружностями Γ_1 и Γ_2 , вычисляется по формулам

$$\sigma_j = (-1)^j \frac{q_0}{2\pi R_j} |\zeta'|_{\Gamma_j}, \quad j = 1, 2,$$

где $q_0 = v_0/(2 \ln R_2)$ либо $q_0 = q$, $\zeta(z)$ — функция, конформно отображающая область Ω на концентрическое кольцо так, что Γ_1 и Γ_2 отображаются на окружности радиусов R_1 и $R_2 = 1$ соответственно.

$$7.357. \sigma_1(\varphi) = \frac{3v_0}{10a\pi \ln \frac{7}{5}} \cdot \frac{1}{13 - 5 \cos \varphi}, \quad \sigma_2(\psi) = -\frac{6v_0}{7a\pi \ln \frac{7}{5}} \cdot \frac{1}{25 - 7 \cos \psi}.$$

$$7.358. \sigma(\varphi) = \frac{v_0}{3a\pi \ln 3} \cdot \frac{1}{5 - 3 \cos \varphi}, \quad \sigma(x) = -\frac{2av_0}{\pi \ln 3} \cdot \frac{1}{x^2 + 16a^2}, \quad C = \frac{1}{2 \ln 3}.$$

$$7.359. \sigma(\psi) = \frac{4q}{5a\pi (17 + 15 \cos \psi)}.$$

$$7.360. \sigma(\varphi) = -\frac{3q}{32a\pi (5 - 4 \cos \varphi)}, \quad q_1 = -q.$$

$$7.361. \sigma(\psi) = \frac{q}{4a\pi (5 - \cos \psi)}.$$

$$7.362. \sigma(\varphi) = -\frac{4q}{15a\pi (17 - 15 \cos \varphi)}, \quad \sigma(\psi) = \frac{q}{3a\pi (5 - 3 \cos \psi)}.$$

$$7.363. \sigma_1(\varphi) = \frac{q_1 + q_2}{520\pi a} - \frac{9q_2}{520\pi a(41 - 40 \cos \varphi)}, \quad \sigma_2(\psi) = \frac{117q_2}{445\pi a(125 - 44 \cos \varphi)}.$$

$$7.364. F = \frac{v_0^2}{30a (\ln 6)^2}.$$

У к а з а н и е. $F = \frac{2q^2}{|z_1 - z_2|}$, где q — заряд единицы длины незаземленного цилиндра, z_1 и z_2 — точки, сопряженные относительно обеих окружностей.

$$7.365. F = \frac{4q^2}{9a}.$$

$$7.366. F = -\frac{q^2}{12a}.$$

$$7.367. F = \frac{2q_2^2}{51a}.$$

$$7.368. \sigma(x) = -\frac{15aq}{\pi(x^2 + 225a^2)}, \quad F = -\frac{q^2}{16a}i.$$

$$7.369. j(x, y) = \frac{40\sigma v_0[2xy - (x^2 - y^2 + 1600a^2)i]}{\ln 3[(x^2 - y^2 + 1600a^2)^2 + 4x^2y^2]},$$

$$j(\varphi) = \frac{20\sigma v_0 e^{i\varphi}}{9 \ln 3(41 + 9 \sin \varphi)a}, \quad J = \frac{\pi a \sigma v_0}{\ln 3}.$$

$$7.370. C = \frac{1}{2 \ln 2}.$$

$$7.371. Q = \frac{2\pi D(v_1 - v_2)}{\ln 2}, \quad q(\varphi) = \frac{(v_1 - v_2)D(4 \cos \varphi + 5i \sin \varphi)}{4a \ln 2(16 \cos^2 \varphi + 25 \sin^2 \varphi)}.$$

$$7.372. R = \frac{1}{4\pi\sigma} \ln \frac{5}{3}.$$

$$7.373. q(\varphi) = \frac{2kv_0}{\ln \frac{a-b}{a+b}} \frac{b \cos \varphi + ia \sin \varphi}{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}.$$

$$7.374. \sigma(\varphi) = \frac{v_0}{2\pi \ln \frac{a+b}{a-b}} \frac{1}{\sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}}, \quad \sigma(x) = -\frac{v_0}{2\pi \ln \frac{a+b}{a-b}} \frac{1}{\sqrt{c^2 - x^2}}.$$

$$7.375. C = \frac{1}{\ln \frac{a+b}{a-b}}.$$

$$7.376. j(\varphi) = \frac{2\sigma(v_1 - v_2)(b \cos \varphi + ia \sin \varphi)}{\ln \frac{a+b}{a-b} (b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi)}.$$

$$7.377. R = \frac{1}{4\pi\sigma} \ln \frac{a+b}{a-b}.$$

$$7.378. P(x, y) = P_2 + \frac{P_2 - P_1}{2 \ln \frac{71}{6}} \ln \frac{(x - 432a)^2 + y^2}{(12x - 5041a)^2 + 144y^2}.$$

У к а з а н и е. Поле $A = V$ удовлетворяет условиям $\operatorname{div} V = 0$, $\operatorname{rot} V = 0$; комплексный потенциал $w = u + iP$.

$$7.379. Q = \frac{2\pi kH(P_1 - P_2)}{\mu \ln \frac{127}{8}}. \quad \text{См. указания к задачам 7.378 и 7.338.}$$

$$7.380. P^2(x, y) = P_2^2 + \frac{P_2^2 - P_1^2}{2 \ln 19,9} \ln \frac{(x - 2000a)^2 + y^2}{(20x - 36901a)^2 + 400y^2}. \quad \text{См. указание к задаче 7.111.}$$

$$7.381. Q = \frac{\pi kH(P_1^2 - P_2^2)}{\mu RT \ln \frac{161}{9}}. \quad \text{См. указания к задачам 7.111 и 7.338.}$$

$$7.382. \zeta^2(x, y) = H_2^2 + \frac{H_2^2 - H_1^2}{2 \ln \frac{49}{5}} \ln \frac{(x - 250a)^2 + y^2}{(10x - 2401a)^2 + 100y^2}.$$

У к а з а н и е. Поле $A = \zeta V$ удовлетворяет условиям $\operatorname{div} A = 0$ (см. уравнение непрерывности в указании к задаче 1.350) и $\operatorname{rot} A = 0$ (это следует из $\operatorname{rot} V = 0$). Комплексный потенциал $w = u + i\zeta^2$, $A = -\frac{ik\rho g}{2\mu} \bar{w}$.

$$7.383. Q = \frac{\pi k\rho g(H_1^2 - H_2^2)}{\mu \ln \frac{97}{7}}. \quad \text{См. указания к предыдущей задаче, а также}$$

к задаче 7.338.

$$7.384. w(z) = 2i\left(\frac{p}{z} - \frac{\bar{p}z}{r_0^2}\right) + \lambda, \quad \operatorname{Im} \lambda = 0.$$

$$7.387. \quad 1) \sigma(x) = -\frac{2phx}{\pi(x^2 + h^2)^2}; \quad 2) \sigma(x) = -\frac{p(x^2 - h^2)}{\pi(x^2 + h^2)^2};$$

$$3) \sigma(x) = -\frac{p}{\pi\sqrt{2}} \frac{x^2 + 2xh - h^2}{(x^2 + h^2)^2}.$$

$$7.388. \sigma(r) = \frac{\pi |p| r_0^{\frac{\pi}{\alpha}-1} r^{\frac{\pi}{\alpha}-1}}{\alpha^2 \left(r_0^{2\frac{\pi}{\alpha}} + r_0^{2\frac{\pi}{\alpha}} \right)} \left[\left(r^{2\frac{\pi}{\alpha}} + r_0^{2\frac{\pi}{\alpha}} \right) \cos \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right) \pm 2 r^{\frac{\pi}{\alpha}} r_0^{2\frac{\pi}{\alpha}} \sin \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right) \right].$$

$$7.389. \sigma(\varphi) = -\frac{p}{\pi} \frac{(r_0^2 + d^2) \cos \varphi - 2r_0 d}{(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2}, \quad q_1 = 0, \quad p_1 = -p.$$

$$7.390. \sigma(\varphi) = -\frac{p}{\pi} \frac{(r_0^2 - d^2) \sin \varphi}{(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2}, \quad q_1 = 0, \quad p_1 = ip.$$

$$7.391. \sigma(\varphi) = -\frac{p}{\pi} \frac{2r_0 d - (r_0^2 + d^2) \cos \varphi}{(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2}, \quad q_1 = 0, \quad p_1 = \frac{r_0^2}{d^2} p.$$

$$7.392. \sigma(\varphi) = -\frac{p}{\pi} \frac{(d^2 - r_0^2) \sin \varphi}{(r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \varphi)^2}, \quad q_1 = 0, \quad p_1 = i \frac{r_0^2}{d^2} p.$$

$$7.393. 1) \sigma(x) = -\frac{\pi p \sin \frac{\pi h}{H} \operatorname{ch} \frac{\pi x}{H}}{2H^2 \left(\operatorname{ch} \frac{\pi x}{H} - \cos \frac{\pi h}{H} \right)^2}; \quad 2) \sigma(x) = -\frac{\pi p \left(\cos \frac{\pi h}{H} \operatorname{ch} \frac{\pi x}{H} - 1 \right)}{2H^2 \left(\operatorname{ch} \frac{\pi x}{H} - \cos \frac{\pi h}{H} \right)^2};$$

$$7.394. 1) \sigma(\varphi) = -\frac{p}{2\pi \sqrt{d^2 - c^2}} \frac{1 - k \cos \varphi}{(k - \cos \varphi)^2} \frac{1}{\sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}};$$

$$2) \sigma(\varphi) = -\frac{p}{2\pi \sqrt{d^2 - c^2}} \frac{(d^2 - a^2) \sin \varphi}{(bd + a \sqrt{d^2 - c^2})(k - \cos \varphi)^2} \frac{1}{\sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}},$$

$$k = \frac{ad - b \sqrt{d^2 - c^2}}{c^2}.$$

$$7.396. F = -\frac{|p|^2}{2h^3} i.$$

$$7.397. F = -\frac{\pi^3 |p|^2}{2H^3} \frac{\cos \frac{\pi h}{H}}{\sin^3 \frac{\pi h}{H}} i.$$

$$7.398. F = -\frac{e^{i\varphi_0}}{4r_0^3} \left[\frac{1}{3} \bar{p}^2 e^{2i\varphi_0} (1 - \beta^2) + |p|^2 \beta^2 \frac{\sin \beta \varphi_0 + i \beta \cos \varphi_0}{\sin^3 \beta \varphi_0} \right].$$

$$7.399. F = -\frac{4dr_0^2 |p|^2}{(d^2 - r_0^2)^3}.$$

$$7.400. F = -\frac{4dr_0^2 |p|^2}{(r_0^2 - d^2)^3}.$$

$$7.401. x = h + \sqrt{2h^2 - y^2}, \quad y > 0, \quad z_1 = (\sqrt{2} + 1)h.$$

$$7.402. 2r^2 \cos \left(2\varphi + \frac{\pi}{3} \right) = a^2. \quad \text{Линия выходит под углом } \frac{\pi}{6} \text{ и монотонно}$$

стремится к прямой $\left(\varphi = \frac{\pi}{12} \right).$

$$7.403. \beta = \pi - 2\alpha, \quad \alpha_0 = \frac{\pi}{2}.$$

$$7.404. \text{Рис. 7.37.}$$

$$7.405. \left(x - \frac{3r_0}{2\sqrt{2}} \right)^2 + y^2 = \frac{r_0^2}{8}, \quad y \geq 0, \quad z_1 = \frac{2\sqrt{1} + i}{3} r_0.$$

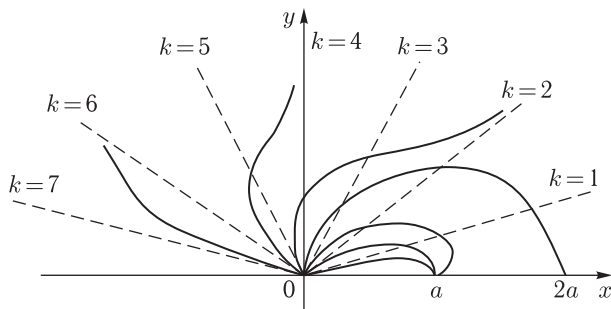


Рис. 7.37

7.406. $(x - r_0\sqrt{2})^2 + (y + r_0)^2 = 2r_0^2$, $y \leq 0$, $\alpha = \frac{\pi}{4}$.

7.407. Существует, если: 1) $a = (\sqrt{3} - \sqrt{2})r_0$; 2) $a = (\sqrt{3} + \sqrt{2})r_0$.

7.408. $(x - 4C)^2 + y^2 = 16(1 + C^2)$, $(x - 3)^2 + y^2 = 25$, $z_1 = 8$.

7.409. $(x - 13a)^2 + (y - 9a)^2 = 15^2 a^2$, $z_1 = \frac{-7 + 24i}{5}a$.

7.410. $(x - 26a)^2 + (y - 7a)^2 = 25^2 a^2$, $z_0 = \frac{34 + 288i}{29}a$.

7.411. $r - \sqrt{dr} \cos \frac{\varphi}{2} - d = 0$, $z_1 = \frac{3 + \sqrt{5}}{2}d + 0i$.

7.412. $\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2H} + \sqrt{3} \sin \frac{\pi y}{2H} = 0$, $z_1 = \frac{2H}{\pi} \ln(2 + \sqrt{3}) - iH$.

7.413. $r^4 - r_0^4 = Cr_0^2 r^2 \cos 2\varphi$, $r \geq r_0$; либо при $r \leq r_0$ $r^4 - 2\sqrt{3}r_0^2 r^2 \cos 2\varphi - r_0^4 = 0$, $z_1 = i\frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{2}}r_0$.

7.414. $(x - C)^2 + y^2 = C^2$, $x \geq 0$ либо $x \leq 0$. У к а з а н и е. См. пример 7.19.

7.415. $G(z, z_0) = \frac{1}{2\pi} \ln \left| \frac{z \frac{\pi}{\alpha} - \bar{z}_0 \frac{\pi}{\alpha}}{z \frac{\pi}{\alpha} - z_0 \frac{\pi}{\alpha}} \right|$.

7.416. $v(x, y) = v_0 \left(e^{-y} \sin x - e^{-x} \sin y + e^{-\frac{x+y}{\sqrt{2}}} \sin \frac{x-y}{\sqrt{2}} - e^{-\frac{x-y}{\sqrt{2}}} \sin \frac{x+y}{\sqrt{2}} \right)$.

7.417. $v(x, y) = v_0 \left(e^{-y} \sin x - e^{-x} \sin y - e^{-\frac{x+y}{\sqrt{2}}} \sin \frac{x-y}{\sqrt{2}} + e^{-\frac{x-y}{\sqrt{2}}} \sin \frac{x+y}{\sqrt{2}} \right)$.

7.418. $v(r, \varphi) = v_0 \sum_{k=0}^{n-1} e^{-r \sin \left(\varphi + \frac{\pi k}{n} \right)} \sin \left(r \cos \left(\varphi + \frac{\pi k}{n} \right) \right)$.

7.419. $v(x, y) = \frac{q_0}{\alpha k} e^{-\alpha x} \sin \alpha y$. У к а з а н и е. Поставить задачу в форме

$$\Delta v(x, y) = -\frac{2q_0}{k} \delta(x) \cdot \sin \alpha y, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < y,$$

$$v(x, 0) = 0.$$

7.420. $q(r) = \frac{q_0 r}{\pi a} \ln \left(1 + \frac{a^4}{r^4} \right)$.

$$7.421. \quad 1) G(z, z_0) = \frac{1}{2\pi} \ln \left| \frac{z_0}{r_0} \left| \frac{z - z_1}{z - z_0} \right| \right|; \quad 2) G(z, z_0) = \frac{1}{2\pi} \ln \left| \frac{(z - \bar{z}_0)(z - z_1)}{(z - z_0)(z - \bar{z}_1)} \right|;$$

$$3) G(z, z_0) = \frac{1}{2\pi} \ln \left| \frac{\left(z^{\frac{\pi}{\alpha}} - \bar{z}_0^{\frac{\pi}{\alpha}} \right) \left(z^{\frac{\pi}{\alpha}} - z_1^{\frac{\pi}{\alpha}} \right)}{\left(z^{\frac{\pi}{\alpha}} - z_0^{\frac{\pi}{\alpha}} \right) \left(z^{\frac{\pi}{\alpha}} - \bar{z}_1^{\frac{\pi}{\alpha}} \right)} \right|, \quad z_1 = \frac{r_0^2}{\bar{z}_0}.$$

$$7.422. \quad v(x, y) = \frac{q}{2\pi k} \ln \left| \frac{z^2 h^2 + r_0^4}{r_0^2(z^2 + h^2)} \right| + v_0.$$

$$7.423. \quad 1) G(x, y, \xi, \eta) = \frac{1}{4\pi} \ln \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi(x - \xi)}{H} - \cos \frac{\pi(y + \eta)}{H}}{\operatorname{ch} \frac{\pi(x - \xi)}{H} - \cos \frac{\pi(y - \eta)}{H}};$$

2) $G_1(M, P) = G(M, P) - G(M, P')$, $M = (x, y) \in \bar{\Omega}$, $P(\xi, \eta) \in \bar{\Omega}$, P' — точка, симметричная точке P относительно оси Oy , $G(M, P)$ — функция Грина задачи Дирихле для полосы.

$$7.424. \quad 1) v(x, y) = v_0 \frac{\sin x \operatorname{sh}(H - y)}{\operatorname{sh} H}; \quad 2) v(x, y) = v_0 \frac{\cos x \operatorname{sh} y}{\operatorname{sh} H};$$

$$3) v(x, y) = v_0 \frac{(H - y) \operatorname{sh} \frac{2\pi x}{H} - x \sin \frac{2\pi y}{H} - H \operatorname{sh} \frac{\pi x}{H} \sin \frac{\pi y}{H}}{H \left(\operatorname{ch} \frac{2\pi x}{H} + \cos \frac{2\pi y}{H} \right)}.$$

$$7.425. \quad q = \frac{kv_0}{\alpha H}.$$

$$7.426. \quad 1) v(x, y) = \frac{v_0 \operatorname{sh} \frac{\pi x}{H}}{\operatorname{ch} \frac{\pi x}{H} + \sin \frac{\pi y}{H}}; \quad 2) v(x, y) = v_0 e^{-\frac{\pi x}{H}} \sin \frac{\pi y}{H}.$$

$$7.427. \quad v(x, y) = \frac{v_0}{\pi} \left(\operatorname{sh} x \sin y \ln \frac{\operatorname{ch} x - \cos y}{\operatorname{ch} x + \cos y} + 2 \operatorname{ch} x \cos y \operatorname{arctg} \frac{\sin y}{\operatorname{sh} x} \right).$$

7.428. $q(x, 0) = -q(x, H) = -\frac{2q_0 i}{H} \ln \operatorname{ctg} \frac{\pi x}{2H}$. У к а з а н и е. Посредством четного продолжения решения перейти к задаче Дирихле в полосе

$$\Delta v = -\frac{2q}{k} \delta(x), \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < y < H,$$

$$v(x, 0) = v(x, H) = 0.$$

7.429. $q(x) = -\frac{2q_0 r_0}{\pi x} \ln \frac{r_0 + x}{r_0 - x}$, $-r_0 < x < r_0$. Р е ш е н и е. Требуется решить следующую краевую задачу в полукруге Ω_z

$$\Delta v(r, \varphi) = 0,$$

$$\frac{\partial v}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \frac{q_0}{k}, \quad v(r, 0) = v(r, \pi) = 0.$$

При конформном отображении $\zeta(z) = \xi(x, y) + i\eta(x, y)$ граничное условие 2-го рода

$$\frac{\partial v(x, y)}{\partial n_z} = f(x, y), \quad (x, y) \in \Gamma_z,$$

где $\Gamma_z = \partial\Omega_z$, преобразуется к виду

$$\frac{\partial V(\xi, \eta)}{\partial n_\zeta} = \frac{F(\xi, \eta)}{|\zeta'(z)|}, \quad (\xi, \eta) \in \Gamma_\zeta, \quad (7.45)$$

где $V(\xi, \eta) = v(x, y)$, $F(\xi, \eta) = f(x, y)$, n_z — нормаль к контуру Γ_z , n_ζ и Γ_ζ — соответствующие образы. Для доказательства следует записать нормальную производную в форме (7.9)

$$\frac{\partial v}{\partial n_z} = \operatorname{Re} (\nabla v \bar{n}_z)$$

и применить соотношения $\nabla v = \bar{\zeta}' \nabla V$ и (7.11).

Дробно-линейное отображение $\zeta = \frac{r_0 + z}{r_0 - z}$ преобразует область Ω_z в первый квадрант $\Omega_\zeta = \{\xi, \eta: \xi > 0, \eta > 0\}$. Функция $\zeta = \zeta(z)$ определяет замену переменных

$$\xi + i\eta = \frac{r_0 + re^{i\varphi}}{r_0 - re^{i\varphi}},$$

т. е.

$$\xi = \frac{r_0^2 - r^2}{r_0^2 + r^2 - 2r_0r \cos \varphi}, \quad \eta = \frac{2r_0r \sin \varphi}{r_0^2 + r^2 - 2r_0r \cos \varphi}.$$

Функция $V(\xi, \eta)$ является решением задачи

$$\begin{aligned} \Delta V(\xi, \eta) &= 0, \quad (\xi, \eta) \in \Omega_\zeta, \\ V_\xi(0, \eta) &= \frac{2q_0r_0}{k(1 + \eta^2)}, \quad V(\xi, 0) = 0. \end{aligned}$$

Для доказательства достаточно сослаться на инвариантность уравнения Лапласа при замене переменных, определяемую аналитической функцией $\zeta(z)$ (пример 7.11), и воспользоваться формулой (7.45), в которую входит модуль производной

$$|\zeta'(r_0e^{i\varphi})| = \frac{2r_0}{|r_0 - r_0e^{i\varphi}|^2} = \frac{1}{2r_0 \sin^2 \frac{\varphi}{2}}.$$

Так как

$$\zeta(r_0e^{i\varphi}) = \frac{r_0(1 + e^{i\varphi})}{r_0(1 - r_0e^{i\varphi})} = i \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2},$$

то $\xi = 0$, $\eta = \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}$, следовательно, $|\zeta'(r_0e^{i\varphi})| = (1 + \eta^2)/(2r_0)$. Задача для $V(\xi, \eta)$ эквивалентна следующей краевой задаче:

$$\begin{aligned} \Delta V(\xi, \eta) &= -\frac{2q_0r_0}{k} \frac{\delta(\xi)}{1 + \eta^2}, \quad 0 < \xi, \quad 0 < \eta, \\ V_\xi(0, \eta) &= 0, \quad V(\xi, 0) = 0. \end{aligned}$$

Четное продолжение решения приводит к задаче Дирихле в полуплоскости

$$\begin{aligned} \Delta V(\xi, \eta) &= -\frac{2q_0r_0}{k} \frac{\delta(\xi)}{1 + \eta^2}, \quad -\infty < \xi < \infty, \quad 0 < \eta, \\ V(\xi, 0) &= 0, \end{aligned}$$

решение которой определяется формулой (6.22)

$$V(\xi, \eta) = \frac{4q_0r_0}{k} \int_0^\infty d\eta' \int_{-\infty}^\infty d\xi' G(\xi, \eta, \xi', \eta') \frac{\delta(\xi')}{1 + \eta'^2} = \frac{q_0r_0}{\pi k} \int_0^\infty \ln \frac{\xi^2 + (\eta - \eta')^2}{\xi^2 + (\eta + \eta')^2} \frac{d\eta'}{1 + \eta'^2}.$$

Плотность потока через диаметральную плоскость

$$\begin{aligned} q(x) &= -\frac{k}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0; \pi} = -\frac{k}{r} \left(\frac{\partial V}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial \varphi} + \frac{\partial V}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} \right) \Big|_{\varphi=0; \pi} = \\ &= -\frac{8q_0r_0^2}{\pi k(r_0 - x)^2} \int_0^\infty \frac{\eta d\eta}{(1 + \eta^2)(\xi_0^2 + \eta^2)}, \quad \xi_0 = (r_0 + x)/(r_0 - x). \end{aligned}$$

$$7.430. \quad v(0, y) = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{a^2 - y^2}}{y}, \quad 0 < y < a.$$

У к а з а н и е. С помощью конформного отображения перейти к задаче для уравнения Лапласа в области $(0 < \xi, 0 < \eta)$, граница $\xi = 0$ которой теплоизолирована.

$$7.431. \quad v(r, \varphi) = \frac{q}{2\pi k} \ln \frac{r^2 + r_0^2 + 2rr_0 \sin \varphi}{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \sin \varphi}.$$

$$7.432. \quad v(x, y) = \frac{q}{2\pi k} \ln \left| \frac{(z + hi)(r_0^2 - zhi)}{(z - hi)(r_0^2 + zhi)} \right|.$$

$$7.433. \quad v(r, \varphi) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arccg} \frac{r(r_0^2 + a^2) \cos \varphi - a(r_0^2 + r^2)}{r(r_0^2 - a^2) \sin \varphi}.$$

$$7.434. \quad q(\varphi) = \frac{2q_0}{\pi} \left(\cos \varphi \ln \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{2} \sin \varphi - 1 \right).$$

$$7.435. \quad v(r, 0) = \frac{v_0}{\pi} \operatorname{arccg} \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{\pi i}{\alpha}} - 1}{\sqrt{\left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{\pi i}{\alpha}} - 1}}, \quad r > r_0.$$

$$7.436. \quad 1) v(r, 0) = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{rr_0}}{r_0 - r}; \quad 2) v(r, 0) = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2rr_0}}{r_0 - r}.$$

$$7.437. \quad v(x, y) = v_0.$$

$$7.438. \quad w(z) = -\frac{V_0 r_0}{z} i + C;$$

$$V(x, 0) = -\frac{V_0 r_0^2}{x^2} i, \quad |x| \geq r_0, \quad V(r_0, \varphi) = V_0 (\sin 2\varphi - i \cos 2\varphi), \quad 0 \leq \varphi \leq \pi.$$

$$7.440. \quad w(z) = -iV_0(z - \sqrt{z^2 - a^2});$$

$$V(x, 0) = \begin{cases} V_0 \left(1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 - a^2}} \right) i, & |x| > a, \\ V_0 \left(\frac{x}{\sqrt{a^2 - x^2}} + i \right), & |x| < a. \end{cases}$$

$$7.441. \quad \mu = \frac{\pi \rho a^2}{2}.$$

$$7.442 \quad w(z) = -i \frac{V_0}{a-b} (z - \sqrt{z^2 - c^2});$$

$$V(x, 0) = \frac{V_0 a}{a-b} \left(1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 - c^2}} \right) i, \quad |x| > a,$$

$$V(r, \varphi) = \frac{V_0 a}{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi} \left[\frac{a+b}{2} \sin 2\varphi + (a \sin^2 \varphi - b \cos^2 \varphi) i \right].$$

$$7.443. \quad \mu = \frac{\rho a^3}{c} \left(\frac{bc}{a^2} + \arcsin \frac{c}{a} \right), \quad c = \sqrt{a^2 - b^2}.$$

$$7.444. \quad 1) v(x, y) = \frac{x}{x^2 + (y+1)^2}; \quad 2) v(x, y) = \frac{x^2 + y(y+1)}{x^2 + (y+1)^2};$$

$$3) v(x, y) = \frac{x(y+1)}{[x^2 + (y+1)^2]^2}; \quad 4) v(x, y) = \frac{x^2 - (y+1)^2}{[x^2 + (y+1)^2]^2};$$

$$5) v(x, y) = \frac{x^2 y + (y+2)(y+1)^2}{2[x^2 + (y+1)^2]^2}; \quad 6) v(x, y) = e^{-x} \cos x.$$

$$7.445. \quad v(x, y) = \frac{v_0}{2\pi a} \left[y \ln \frac{(x-a)^2 + y^2}{x^2 + y^2} + 2x \operatorname{arctg} \frac{x^2 + y^2 - ax}{xy} \right].$$

$$7.446. \quad 1) v(x, y) = \frac{2}{\pi} \frac{(1 + x^2 - y^2) \operatorname{arctg} \frac{x}{y} + xy \ln(x^2 + y^2)}{(1 + x^2 - y^2)^2 + 4x^2 y^2};$$

$$2) v(x, y) = \frac{2}{\pi} \frac{[(x^2 + y^2)^2 + x^2 - y^2] \operatorname{arctg} \frac{x}{y} - xy \ln(x^2 + y^2)}{(1 + x^2 - y^2)^2 + 4x^2 y^2}.$$

$$7.447. \quad v(r, \varphi) = 2v_0 \frac{(r_0^2 - r^2)(r_0^2 + r^2 - 2r_0 r \cos \varphi)}{(r_0^2 - r^2)^2 + (r_0^2 + r^2 - 2\sqrt{2} r_0 r \cos(\varphi + \frac{\pi}{4}))^2}.$$

$$7.448. \quad v(r_0, \varphi) = 2v_0 \operatorname{tg} \varphi \ln \left(\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \right).$$

$$7.450. \quad v(r, \varphi) = \frac{v_0 k (r^2 - r_0^2 + \sqrt{3} r r_0 \cos \varphi)}{\sqrt{3} (r^2 + k^2 r_0^2 + 2k r r_0 \cos \varphi)}, \quad k = 2 + \sqrt{3}.$$

$$7.451. \quad v(r, \varphi) = \frac{v_0 (r^2 - k^2 r_0^2)}{\sqrt{7} (r^2 + k^2 r_0^2 + 2k r r_0 \sin \varphi)}, \quad k = \frac{4 + \sqrt{7}}{3}.$$

$$7.453. \quad V(r, \varphi) = \frac{i\Gamma}{2\pi r} e^{i\varphi}.$$

$$7.454. \quad V_1(\varphi) = \frac{3\Gamma}{32\pi a} \frac{ie^{i\varphi}}{5 - 4 \cos \varphi}, \quad V_2(\psi) = \frac{2\Gamma}{9\pi a} \frac{ie^{i\psi}}{5 - 3 \cos \psi}.$$

$$7.455. \quad V_1(\varphi) = \frac{2\Gamma}{9\pi a} \frac{ie^{i\varphi}}{5 - 3 \cos \varphi}, \quad V_2(\psi) = -\frac{6\Gamma}{5\pi a} \frac{ie^{i\psi}}{13 + 5 \cos \psi}.$$

$$7.456. \quad w(z) = \frac{2J}{c} \ln \frac{1}{z} + C.$$

У к а з а н и е. В силу теоремы Стокса, из уравнения $\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$ следует, что циркуляция магнитного поля $\Gamma = \frac{4\pi J}{c}$.

$$7.457. \quad 1) \text{ Окружности: } (x-a)^2 + y^2 = C^2 - a^2;$$

$$2) \text{ лемнискаты: } r^4 - 2r^2 a^2 \cos \varphi = C.$$

7.458. У к а з а н и е. Поставить задачу для векторного потенциала (пример 1.24) и обратиться к примеру 7.11.

$$7.459. \quad \mathbf{H}(x, y) = \mathbf{e}_z \begin{cases} \frac{4\pi NJ}{c}, & (x, y) \in \Omega, \\ 0, & (x, y) \notin \Omega. \end{cases}$$

У к а з а н и е. Показать, что при конформном отображении граничное условие $H_{2\tau} - H_{1\tau} = \frac{4\pi i}{c}$ (см. задачу 1.410) не изменяется.

$$7.460. H_x - iH_y = -\frac{4\pi J}{\alpha c} \frac{iz^{\frac{2\pi}{\alpha}-1}}{z^{\frac{2\pi}{\alpha}} + r_0^{\frac{2\pi}{\alpha}}}.$$

У к а з а н и е. Так как индукция $B = \mu H$ ограничена, то при $\mu = \infty$ магнитное поле в магнетике равно нулю. Из непрерывности тангенциальной составляющей на границе $\varphi = 0$, $\varphi = \alpha$ следует, что вектор H перпендикулярен границе. Чтобы найти комплексный потенциал, надо построить аналитическую функцию $\zeta = \zeta(z)$, конформно отображающую область $\Omega = \{r, \varphi: 0 < r, 0 < \varphi < \alpha\}$ на плоскость (ζ) так, чтобы $\partial\Omega$ отобразилась в разрез, принадлежащий некоторой прямой, на которую отображается также и точка z_0 ; при этом $\zeta(\infty) = \infty$. См. также пример 7.15 и задачу 7.252.

$$7.461. w(z) = \frac{2J}{c} \ln \frac{z^2}{(z^2 + h^2)(h^2 z^2 + r_0^4)}.$$

$$7.462. H = \frac{\pi J}{\text{ch}} \frac{-\sin \frac{\pi y}{h} + i \text{sh} \frac{\pi x}{h}}{\text{ch} \frac{\pi x}{h} - \cos \frac{\pi y}{h}}.$$

$$7.463. H_x = -\frac{2J}{\text{ch}} \frac{\left(\text{ch} \frac{\pi a}{h} \text{ch} \frac{\pi x}{h} - \cos \frac{\pi y}{h}\right) \sin \frac{\pi y}{h}}{\left(\text{ch} \frac{\pi a}{h} - \text{ch} \frac{\pi x}{h} \cos \frac{\pi y}{h}\right)^2 - \text{sh}^2 \frac{\pi x}{h} \sin^2 \frac{\pi y}{h}},$$

$$H_y = -\frac{2J}{\text{ch}} \frac{\left(\text{ch} \frac{\pi a}{h} \cos \frac{\pi y}{h} - \text{ch} \frac{\pi x}{h}\right) \text{sh} \frac{\pi x}{h}}{\left(\text{ch} \frac{\pi a}{h} - \text{ch} \frac{\pi x}{h} \cos \frac{\pi y}{h}\right)^2 - \text{sh}^2 \frac{\pi x}{h} \sin^2 \frac{\pi y}{h}}.$$

$$7.464. w(z) = \frac{2J}{c} \ln \frac{(z - d_1)(d_1 z - r_0^2)}{(z - d_2)(d_2 z - r_0^2)} + C.$$

7.465. $F = -\frac{J^2}{hc^2} i$. У к а з а н и е. Линейная плотность силы, действующей на проводник с током, рассчитывается по формуле

$$F = \frac{J}{c} \left[\overline{w'(z_0)} - \overline{w'_J(z_0)} \right]$$

где $w(z)$ и $w'(z)$ — комплексные потенциалы результирующего магнитного поля и поля тока J соответственно. Эта формула является следствием записи векторного произведения в выражении для силы $\mathbf{F} = \frac{1}{c} [\mathbf{J} \mathbf{H}]$, куда входят трехмерные векторы $\{0, 0, J\}$ и $\{H_x, H_y, 0\}$, в комплексной форме $[\mathbf{J} \mathbf{H}] = -JH_y + iJH_x = iJ(H_x + iH_y) = iJH$, и соотношения (7.4), в котором $A = H$.

$$7.466. F = \frac{J^2}{3c^2 d} \left(1 + \frac{2i}{\sqrt{3}} \right).$$

$$7.467. F = \frac{J^2}{r_0 c^2} \left(\frac{2\pi}{\alpha} - 1 + i \frac{\pi}{\alpha} \text{ctg} \frac{\pi \varphi_0}{\alpha} \right) e^{i\varphi_0}.$$

$$7.468. F = i \frac{\pi h^2}{2c^2 H} \text{tg} \frac{\pi h}{2H}.$$

$$7.469. F = -i \frac{\pi J^2}{c^2 H} \text{cth} \frac{\pi a}{H}.$$

$$7.470. F = -\frac{J^2}{c^2 d} \frac{2r_0^2}{d^2 - r_0^2}.$$

$$7.471. F = -\frac{J^2}{c^2} \frac{b(a\sqrt{d^2+b^2-a^2}+bd)}{(d^2-a^2)(d^2+b^2-a^2)}.$$

$$7.472. F = -\frac{J^2}{c^2} \frac{a(b\sqrt{d^2+b^2-a^2}+ad)}{(d^2-b^2)(d^2+b^2-a^2)}.$$

$$7.473. F = -\frac{4J^2 r_0 i}{3c^2(d^2+r_0^2)} \left(\operatorname{ctg} \frac{\pi-2\alpha}{3} + \frac{\sin \frac{\pi-2\alpha}{3}}{\sin \frac{4\alpha-\pi}{3} \sin \frac{2\alpha}{3}} - \frac{3}{2} \operatorname{tg} \alpha \right).$$

$$7.474. 1) F = -i \frac{J^2}{c^2 r_0} \frac{4\sqrt{3}-3\sqrt{2}-1}{3(2+\sqrt{2})}; \quad 2) F = i \frac{J^2}{c^2 r_0} \frac{8+3\sqrt{3}}{3\sqrt{3}}.$$

$$7.475. F = -\frac{2J^2}{3(d-a)c^2} \left[\frac{a}{3(d+a)} \frac{7(d+a)^{\frac{4}{3}}+(d-a)^{\frac{4}{3}}}{(d+a)^{\frac{4}{3}}-(d-a)^{\frac{4}{3}}} - 1 \right].$$

$$7.476. F = -\frac{2J^2 i}{d^2+a^2)c^2} \left[\frac{4\left(1+\sin^2 \frac{2\beta}{3}\right)}{\sin \frac{4\beta}{3}} - d \right], \quad \beta = 2 \operatorname{arctg} \frac{d}{a} - \frac{\pi}{4}.$$

$$7.477. F = -\frac{J^2}{c^2} \frac{r_0^4+4r_0^2 d^2-d^4}{d(r_0^4-d^4)}.$$

$$7.478. 1) F = -\frac{J^2}{c^2} \frac{r_0^2+d^2}{dr_0^2};$$

$$2) F = -\frac{J^2}{c^2 d(k^2-1)} \left[\frac{(k^2+1)^3}{2(k^4+1)} - 1 - i \frac{(k^2+1)^2(k^2-1)}{2(k^4+1)} \right], \quad k = \frac{r_0}{d}.$$

$$7.479. w = \frac{\Gamma+iq}{2\pi i} \ln(z-i) + \frac{p}{2\pi(z+i)} + V e^{-i\alpha}.$$

$$7.480. w = \frac{p_{2k}}{2\pi(z-z_0)^k}.$$

$$7.481. y(x^2+y^2-1) = Cx(x^2+y^2+1).$$

$$7.482. V_1 = \frac{3q}{2\pi r_0} e^{\frac{i\pi}{3}}, \quad V_2 = -\frac{3q}{7\pi r_0}.$$

$$7.483. \text{Логарифмические спирали } \ln r = \frac{q\varphi}{\Gamma} + C.$$

$$7.484. \text{Линии тока } r^4 + Ca^2 \sin 2\varphi - a^4 = 0, \text{ эквипотенциальные линии } r^4 + Ca^2 \cos 2\varphi + a^4 = 0, |C| > 2.$$

$$7.485. w = 2i \ln(z^2 - a^2).$$

$$7.486. V = \frac{2e^{3i\varphi}}{r^3}.$$

$$7.487. V = 1 + i$$

$$7.488. \left(e^{\frac{2\pi k i}{3}}; q = 2\pi \right), \quad k = 0, 1, 2, \quad (0; q = 4\pi).$$

$$7.489. \text{Источники } \left(r_0 e^{\frac{2\pi i}{3}}; 2\pi \right), \left(r_0 e^{\frac{4\pi i}{3}}; 2\pi \right).$$

$$7.490. w = \frac{\Gamma+iq}{2\pi i} \ln(z^n - 1).$$

$$7.491. \Gamma = -8\pi.$$

$$7.492. q = 4\pi, \Gamma = 16\pi.$$

7.493. $q = 6\pi$, $\Gamma = 0$.

7.494. $q = 0$, $\Gamma = 4\pi$.

7.495. $w(z) = \frac{q}{2\pi} \ln \operatorname{sh} \frac{\pi z}{a}$. У к а з а н и е. Комплексно сопряженная величина скорости в точке z

$$\bar{V} = \frac{q}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{z - k ai}.$$

Суммирование ряда основано на разложении

$$\operatorname{ctg} z = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{z - k\pi}, \quad (7.46)$$

которое получается применением теоремы о вычетах к интегралу

$$\frac{1}{2\pi} \int_{L_n} \frac{\left(\operatorname{ctg} \zeta - \frac{1}{\zeta}\right) d\zeta}{\zeta(\zeta - z)}.$$

Здесь L_n — окружность $|z| = r_n$, $n = 1, 2, 3, \dots$, $\lim_{n \rightarrow \infty} r_n = \infty$.

При любом n окружность L_n не проходит ни через одну из особых точек функции $\operatorname{ctg} z$; учесть также, что при $n \rightarrow \infty$ предел последовательности интегралов равен нулю.

7.496. $w(z) = \frac{p}{2a} \operatorname{cth} \frac{\pi z}{a}$. У к а з а н и е. Применить разложение 7.46.

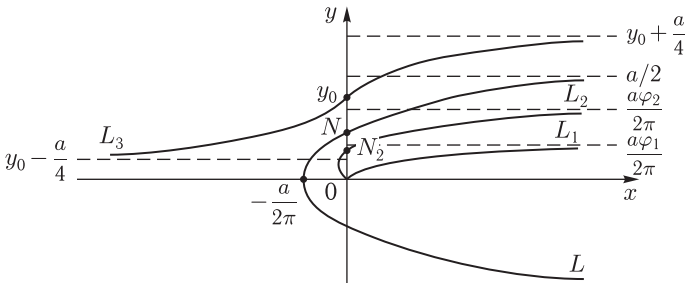


Рис. 7.38

7.497. Течение симметрично относительно оси Ox (рис. 7.38). 1) Уравнение линии тока выходящей из источника под углом $\varphi_0 \in [0; \pi]$: $x + \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi y}{a} - \varphi_0 \right) = 0$, $0 < y < \frac{a\varphi}{2\pi}$, $a = \frac{q}{V}$; линия L_1 выходит под углом $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$; линия L_2 выходит под углом $\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$; выделена точка $N_2 \left(0; \frac{a}{2\pi} \left(\varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right)$; 2) уравнение линии L_3 , не проходящей через источник: $x + y \operatorname{tg} \frac{2\pi(y - y_0)}{a}$, $y_0 > \frac{a}{4}$, $y_0 - \frac{a}{4} < y < y_0 + \frac{a}{4}$; 3) область ограничена линией L : $x + y \operatorname{ctg} \frac{2\pi y}{a} = 0$, $0 \leq |y| < \frac{a}{2}$; выделена точка $N \left(0; \frac{a}{4} \right)$.

7.498. $V(\varphi) = \frac{\Gamma}{2\pi r_0} \frac{r_0^2 - r_1^2}{r_0^2 + r_1^2 - 2r_0 r_1 \cos \varphi}$.

7.499. $w(z) = \frac{\Gamma}{2\pi i} \frac{z - ih}{z + ih} + C$. Изображением источника $(ih; \Gamma)$ является источник $(-ih; -\Gamma)$. $V(x) = \frac{h\Gamma}{x^2 + h^2}$.

7.500. $w(z) = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln \frac{z - z_1}{z - \frac{r_0^2}{\bar{z}_1}} + C$. Поле скоростей вне круга эквивалентно полю двух источников: данного и его изображения (относительно окружности) $(\frac{r_0^2}{\bar{z}_1}; -\Gamma)$. **З а м е ч а н и е.** Задача, по существу, решена в примере 7.25: в поле скоростей двух источников, симметричных относительно окружности, эта окружность — линия тока.

7.501. $w(z) = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln \frac{(z - ih)(hz + ir_0^2)}{(z + ih)(hz - ir_0^2)} + C$.

7.502. $V(x) = \pm \frac{\Gamma\sqrt{d}}{2\pi\sqrt{x}(x+d)}$.

7.503. $w(z) = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln \frac{\left(\frac{z}{r_1}\right)^{\frac{\pi}{\alpha}} - i}{\left(\frac{z}{r_1}\right)^{\frac{\pi}{\alpha}} + i} + C$.

7.504. $w(z) = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi(z - ih)}{2H}}{\operatorname{sh} \frac{\pi(z + ih)}{2H}} + C$.

7.506. $w(z) = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi(z - z_0)}{2H} \operatorname{sh} \frac{\pi(z + z_0)}{2H}}{\operatorname{sh} \frac{\pi(z - \bar{z}_0)}{2H} \operatorname{sh} \frac{\pi(z + \bar{z}_0)}{2H}} + C$.

7.507. 1) $w(z) = \frac{\Gamma + iq}{2\pi i} \ln(z - z_1) + \frac{-\Gamma + iq}{2\pi i} \ln(z - \bar{z}_1) + C$;

2) $w(z) = \frac{\Gamma + iq}{2\pi i} \ln(z - z_1) + \frac{-\Gamma + iq}{2\pi i} \ln(\bar{z}_1 z - r_0^2) + C$;

3) $w(z) = \frac{\Gamma + iq}{2\pi i} \ln(z - z_1) + \frac{-\Gamma + iq}{2\pi i} \ln(\bar{z}_1 z - r_0^2) - \frac{q}{2\pi} \ln z + C$;

4) $w(z) = \frac{\Gamma + iq}{2\pi i} \ln \operatorname{sh} \frac{\pi(z - z_1)}{2H} + \frac{-\Gamma + iq}{2\pi i} \ln \operatorname{sh} \frac{\pi(z - \bar{z}_1)}{2H}$.

7.508. 1) $w(z) = \frac{\Gamma + iq}{2\pi i} \ln \frac{(z - z_1)(\bar{z}_1 z - r_0^2)}{(z - z_2)(\bar{z}_2 z - r_0^2)} + C$; 2) $w(z) = \frac{\Gamma + iq}{2\pi} [\ln z - \ln(z - z_1)(\bar{z}_1 z - r_0^2)] + C$.

7.509. 1) $w(z) = \frac{p}{2\pi} \frac{1}{z - z_1} + \frac{\bar{p}}{2\pi} \frac{1}{z - \bar{z}_1} + C$; 2) 3a) $z_1 = 0$, $w(z) = \frac{p}{2\pi z} + \frac{\bar{p}z}{2\pi r_0^2} + C$, 3b) $z_1 \neq 0$, $w(z) = \frac{p}{2\pi} \frac{1}{z - z_1} + \frac{(\bar{p}r_0^2 \bar{z}_1 z - r_0^2)}{2\pi \bar{z}_1} C$; 4) ответ 3b);

5) $w(z) = \frac{p}{4H} \operatorname{cth} \frac{\pi(z - z_1)}{2H} + \frac{\bar{p}}{4H} \operatorname{cth} \frac{\pi(z - \bar{z}_1)}{2H} + C$.

7.511. $w(z) = \bar{V}_\infty z + \frac{V_\infty r_0^2}{z} + \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln z + C$.

7.512. $z_{1,2} = \frac{1}{4\pi \bar{V}_\infty} \left(\Gamma i \mp \sqrt{16\pi^2 r_0^2 V_0^2 - \Gamma^2} \right)$. Если $|\Gamma| < 4\pi r_0 V_0$, то точка ветвления $z_1 = r_0 e^{i\varphi_1}$, точка схода $z_2 = r_0 e^{i\varphi_2}$, $\varphi_1 = \pi - \varphi_2 + 2\alpha$,

$\varphi_2 = \alpha + \arcsin \frac{\Gamma}{4\pi r_0 V_0}$; если $|\Gamma| = 4\pi r_0 V_0$, то $z_1 = z_2 = r_0 i e^{i\alpha}$; если $|\Gamma| > 4\pi r_0 V_0$, то единственная критическая точка лежит вне $\overline{B}$.

$$7.514. 1) V(\varphi) = -ie^{i\varphi} \frac{4\sqrt[3]{2} V_0 \left(4 \sin^{\frac{2}{3}} \frac{\varphi}{2} \cos^{\frac{2}{3}} \frac{\varphi}{2} - \sin^{\frac{4}{3}} \frac{\varphi}{2} - \cos^{\frac{4}{3}} \frac{\varphi}{2} \right)}{9 \left(\sin^{\frac{4}{3}} \frac{\varphi}{2} + \cos^{\frac{4}{3}} \frac{\varphi}{2} - \sin^{\frac{2}{3}} \frac{\varphi}{2} \cos^{\frac{2}{3}} \frac{\varphi}{2} \right)^2 \sqrt[3]{\sin \varphi}},$$

$$V(x) = \frac{16r_0^2 V_0 \left[(r_0 + x)^{\frac{4}{3}} + 4(r_0^2 + x^2)^{\frac{2}{3}} + (r_0 - x)^{\frac{4}{3}} \right]}{9 \left[(r_0 + x)^{\frac{4}{3}} + (r_0^2 - x^2)^{\frac{2}{3}} (r_0 - x)^{\frac{4}{3}} \right]^2 \sqrt[3]{r_0^2 - x^2}};$$

$$2) V(\varphi) = -ie^{i\varphi} \frac{4\sqrt[3]{2} V_0 \left(\cos^{\frac{4}{3}} \frac{\varphi}{2} \right)}{3\sqrt[3]{3} \left(\cos^{\frac{4}{3}} \frac{\varphi}{2} + \sin^{\frac{4}{3}} \frac{\varphi}{2} - \cos^{\frac{2}{3}} \frac{\varphi}{2} \sin^{\frac{2}{3}} \frac{\varphi}{2} \right)^2 \sqrt[3]{\sin \varphi}},$$

$$V(x) = \frac{16r_0^2 V_0 \left[(r_0 + x)^{\frac{4}{3}} - (r_0 - x)^{\frac{4}{3}} \right]}{3\sqrt[3]{3} \left[(r_0 + x)^{\frac{4}{3}} + (r_0^2 - x^2)^{\frac{2}{3}} (r_0 - x)^{\frac{4}{3}} \right]^2 \sqrt[3]{r_0^2 - x^2}}.$$

$$7.515. 1) V|_{S_1} = -ie^{i(\frac{\pi}{2}-\psi)} \frac{8V_0 \sqrt[3]{\sin\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2}\right)}}{9 \left[\sqrt[3]{\sin^4\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2}\right)} + \sqrt[3]{\sin^4\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2}\right)} \right]^2},$$

$$V|_{S_2} = ie^{i(\frac{3\pi}{2}+\theta)} \frac{8V_0 \sqrt[3]{\sin\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2}\right)}}{9 \left[\sqrt[3]{\sin^4\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2}\right)} + \sqrt[3]{\sin^4\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2}\right)} \right]^2};$$

$$2) V|_{S_1} = ie^{i(\frac{\pi}{2}-\psi)} \frac{4V_0 \left[\sqrt[3]{\sin\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2}\right)} - \sqrt[3]{\sin\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2}\right)} \right]}{9 \left[\sqrt[3]{\sin^4\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2}\right)} + \sqrt[3]{\sin^4\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2}\right)} \right]^2 \sqrt[3]{\sin\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2}\right)}},$$

$$V|_{S_2} = ie^{i(\frac{3\pi}{2}+\theta)} \frac{4V_0 \left[\sqrt[3]{\sin\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2}\right)} - \sqrt[3]{\sin\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2}\right)} \right]}{9 \left[\sqrt[3]{\sin^4\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2}\right)} + \sqrt[3]{\sin^4\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2}\right)} \right]^2 \sqrt[3]{\sin\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2}\right)}}.$$

$$7.516. w(z) = V_0(z \cos \alpha - i\sqrt{z^2 - a^2} \sin \alpha) + C; \quad V_{1,2} = v_0 \left(\cos \alpha \mp \frac{x \sin \alpha}{\sqrt{a^2 - x^2}} \right).$$

$$7.517. 1) V(\psi) = -ie^{i(\frac{\pi}{2}-\psi)} \frac{V_0 \sin \beta \sin \frac{\beta}{2} \left(\sqrt{\sin \frac{\beta+\psi}{2} \sin \frac{\beta-\psi}{2}} \mp \sin^2 \frac{\beta}{2} \cos \psi \right)}{\left(\cos \frac{\psi}{2} - \sqrt{\sin \frac{\beta+\psi}{2} \sin \frac{\beta-\psi}{2}} \right)^2 \sqrt{\sin \frac{\beta+\psi}{2} \sin \frac{\beta-\psi}{2}}};$$

$$2) V(\psi) = \pm ie^{i(\frac{\pi}{2}-\psi)} \frac{V_0 \sin \beta \cos^3 \frac{\beta}{2} \sin \frac{\psi}{2}}{\left(\cos \frac{\psi}{2} \mp \sqrt{\sin \frac{\beta+\psi}{2} \sin \frac{\beta-\psi}{2}} \right)^2 \sqrt{\sin \frac{\beta+\psi}{2} \sin \frac{\beta-\psi}{2}}}.$$

Верхний знак соответствует выпуклой стороне, нижний — вогнутой.

$$7.518. w(z) = \frac{V_0}{a-b} [(az - b\sqrt{z^2 - c^2}) \cos \alpha + i(bz - a\sqrt{z^2 - c^2}) \sin \alpha] + C;$$

$$P(\varphi) = P_0 - \frac{\rho V_0^2}{2} \left(1 - \frac{(a+b)^2 \sin^2(\varphi - \alpha)}{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi} \right).$$

$$7.520. 1) P = -\frac{\rho N^2}{4\pi a}; \quad 2) P = -\frac{\rho \Gamma^2}{4\pi a}.$$

$$7.521. P = \frac{d\rho \Gamma^2}{2\pi \sqrt{(r_1 + r_2 + d)(r_1 + r_2 - d)(r_1 - r_2 + d)(r_1 - r_2 - d)}}.$$

$$7.523. P = i2\pi a \rho V_0^2 \sin \alpha e^{i\alpha}.$$

$$7.524. V(z) = V_0 \left(\cos \alpha + \sin \alpha \sqrt{\frac{z-a}{z+a}} \right); \quad V(x) = V_0 \left(\cos \alpha \mp \sin \alpha \sqrt{\frac{a-x}{a+x}} \right),$$

минус соответствует верхней ($x, y = 0 + i0$), плюс — нижней стороне ($x, y = 0 - i0$) полосы.

$$7.525. P = -i2\pi(\sqrt{a^2 + d^2} + d)\rho V_0^2 \sin \left(\alpha + \frac{\beta}{2} \right) e^{i\alpha}, \quad \beta = \operatorname{arctg} \frac{h}{a}.$$

$$7.526. P = i4\pi r_0 \rho V_0^2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left(\alpha + \frac{\beta}{2} \right) e^{i\alpha}.$$

$$7.527. P = i \frac{16\pi r_0 \rho V_0^2}{3\sqrt{3}} \sin \left(\alpha + \frac{\pi}{6} \right) e^{i\alpha}.$$

$$7.528. P = i \frac{4\sqrt{2} \pi r_0 \rho V_0^2 \sin \alpha e^{i\alpha}}{3}.$$

$$7.529. w(z) = V_0 \left(z - p - i\sqrt{2pz - z^2} \right); \quad V|_L = \frac{V_0 y(y + pi)}{y^2 + p^2}.$$

7.530. $w(z) = -iE_0 \left(z - \frac{r_0^2}{z} \right) + C$, $\sigma(\varphi) = \frac{E_0 \cos \varphi}{2\pi}$. У к а з а н и е. Функция $w(z)$ конформно отображает внешность круга на внешность отрезка, параллельного вещественной оси, при условиях $w(\infty) = \infty$, $w'(\infty) = -iE_0$ (см. пример 7.26).

$$7.533. w(z) = -i \frac{aE_0}{2} \left(\zeta - \frac{1}{\zeta} \right) + C, \quad \zeta = \frac{z + \sqrt{z^2 - c^2}}{a} e^{-i\alpha},$$

$$\sigma(x) = \frac{E_0}{4\pi} \frac{x \cos \alpha \pm \sqrt{a^2 - x^2} \sin \alpha}{\sqrt{a^2 - x^2}}, \quad -a < x < a,$$

знак плюс соответствует верхней стороне ($z = x + i0$) полосы, знак минус — нижней ($z = x - i0$).

$$7.534. 1) \sigma_{1,2}(\varphi) = \frac{E_0(\cos \frac{\varphi}{2} - \sin \frac{\varphi}{2})}{8\pi r_0(\cos \frac{\varphi}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \pm \sqrt{\sin \varphi})^2 \sqrt{\sin \varphi}},$$

$$q_{1,2} = 0, \quad \operatorname{sign} \sigma_{1,2} = \operatorname{sign} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right);$$

$$2) \sigma_{1,2}(\varphi) = \frac{E_0(\cos \frac{\varphi}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \pm 2\sqrt{\sin \varphi})}{8\pi r_0(\cos \frac{\varphi}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \pm \sqrt{\sin \varphi})^2 \sqrt{\sin \varphi}}, \quad q_{1,2} = \mp \frac{E_0}{2\pi};$$

на участке $\arcsin \frac{1}{3} < \varphi < \pi - \arcsin \frac{1}{3}$ выпуклой стороны заряд положителен, на остальной части поверхности — отрицателен.

$$7.535. w(z) = -iE_0 \frac{a+b}{2} \left(\zeta - \frac{1}{\zeta} \right) + C, \quad \zeta = \frac{z + \sqrt{z^2 - c^2}}{a+b} e^{-i\alpha};$$

$$\sigma(\varphi) = \frac{(a+b)E_0}{4\pi} \frac{\cos(\varphi - \alpha)}{\sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}}.$$

$$7.536 \text{ 1) } \sigma(\varphi) = \frac{\sqrt[3]{2} E_0 \left(\cos \frac{\varphi}{2} - 2 \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \right)}{9\pi \left(\cos \frac{\varphi}{2} - \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2 \sqrt[3]{\sin \varphi}},$$

$$\sigma(x) = \frac{4E_0 r_0^2 \left[(r_0 + x)^{\frac{4}{3}} + 2(r_0^2 - x^2)^{\frac{2}{3}} - (r_0 - x)^{\frac{4}{3}} \right]}{3\sqrt{3} \pi \left[(r_0 + x)^{\frac{4}{3}} + (r_0^2 - x^2)^{\frac{2}{3}} + (r_0 - x)^{\frac{4}{3}} \right]^2 \sqrt[3]{r_0^2 - x^2}};$$

$$2) \sigma(\varphi) = -\frac{\sqrt[3]{2} E_0 \left(\cos \frac{\varphi}{2} + 2 \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \right)}{9\pi \left(\cos \frac{\varphi}{2} - \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} - \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2 \sqrt[3]{\sin \varphi}},$$

$$\sigma(x) = -\frac{4E_0 r_0^2 \left[(r_0 + x)^{\frac{4}{3}} - 2(r_0^2 - x^2)^{\frac{2}{3}} + (r_0 - x)^{\frac{4}{3}} \right]}{3\sqrt{3} \pi \left[(r_0 + x)^{\frac{4}{3}} + (r_0^2 - x^2)^{\frac{2}{3}} + (r_0 - x)^{\frac{4}{3}} \right]^2 \sqrt[3]{r_0^2 - x^2}}.$$

$$7.537. \text{ 1) } \sigma(\psi) = \frac{E_0 \left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2} \right) - \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2} \right) \right]}{9\pi \left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2} \right) + \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2} \right) \right]^2 \sqrt[3]{\sin \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2} \right) \sin \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2} \right)}},$$

$$\sigma(\theta) = \frac{E_0 \left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) + \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right) \right]}{9\pi \left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) + \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right) \right]^2 \sqrt[3]{\sin \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) \sin \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right)}};$$

$$2) \sigma(\psi) = \frac{2E_0 \sqrt[3]{\sin \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2} \right) \sin \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2} \right)}}{9\pi \left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\psi}{2} \right) + \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\psi}{2} \right) \right]^2},$$

$$\sigma(\theta) = -\frac{2E_0 \sqrt[3]{\sin \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) \sin \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right)}}{9 \left[\sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) + \sin^{\frac{4}{3}} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right) \right]^2 \sqrt[3]{\sin \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\theta}{2} \right) \sin \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\theta}{2} \right)}}.$$

$$7.538. H_x = H_0 \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \cos 2\varphi \right), \quad H_y = H_0 \frac{r_0^2}{r^2} \sin 2\varphi, \quad \text{ось } Ox \text{ направлена по } H_0.$$

См. указание к задаче 7.460.

$$7.539. H(\varphi) = (a+b) \cos(\varphi - \alpha) \frac{b \cos \varphi + ia \sin \varphi}{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}.$$

Глава 8

МЕТОД ХАРАКТЕРИСТИК

В данной главе содержатся задачи для уравнений с частными производными в двумерном пространстве (неизвестная функция зависит от двух переменных), построение и исследование свойств решений которых осуществляется методом характеристик. С помощью этого метода проводится классификация линейных дифференциальных уравнений второго порядка, множество которых разбивается на три основные группы однотипных уравнений. Отыскание характеристик (в двумерном случае — это линии на плоскости) состоит в решении обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Посредством характеристик вводятся новые независимые переменные, переход к которым преобразует уравнение к наиболее простой (канонической) форме. В результате этой процедуры удастся найти общее решение (т. е. содержащее любое частное решение в заданном классе функций) некоторых уравнений гиперболического типа (в частности, волнового уравнения) и получить аналитическое решение различных задач (задачи Коши, задачи Гурса, смешанных задач). Применение метода характеристик к линейным и квазилинейным уравнениям с частными производными первого порядка сводит их к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Метод характеристик применим также к решению различных задач для гиперболических систем линейных и квазилинейных уравнений относительно двух неизвестных функций в двумерном пространстве. Решение таких систем основано на преобразовании их сначала к характеристической форме, затем к инвариантам Римана. В некоторых случаях (гиперболическая система двух линейных уравнений с постоянными коэффициентами) система в инвариантах распадается на два независимых уравнения. Гиперболические системы имеют многочисленные приложения в физике.

Литература к главе 8

1. *Карташев А.П., Рождественский Б.Л.* Обыкновенные дифференциальные уравнения и основы вариационного исчисления. — М.: Наука, 1986.
2. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. — М.: МГУ, Наука, 2004.
3. *Владимиров В.С., Жаринов В.В.* Уравнения математической физики. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
4. *Будак Б.Н., Самарский А.А., Тихонов А.Н.* Сборник задач по математической физике. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
5. Сборник задач по уравнениям математической физики / под ред. В.С. Владимирова — 4-е изд., стереотип. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

8.1. Линейные гиперболические уравнения с частными производными второго порядка

Пример 8.1. Приведение дифференциальных уравнений с частными производными второго порядка, линейных относительно старших производных, к каноническому виду. Если в области $\Omega(x, y)$ уравнение (1.1), т. 1,

$$au_{xx} + 2bu_{xy} + cu_{yy} + \Phi(x, y, u, u_x, u_y) = 0 \quad (8.1)$$

принадлежит определенному типу, то существует такое взаимно однозначное соответствие

$$T: \Omega(x, y) \Leftrightarrow \Omega(\xi, \eta), \quad T \in C^2(\Omega),$$

что в области $\Omega(\xi, \eta)$ уравнение (8.1) имеет следующий вид, называемый каноническим:

$$u_{\xi\eta} + \Phi_1(\xi, \eta, u, u_\xi, u_\eta) = 0 \text{ — гиперболический тип,}$$

$$u_{\eta\eta} + \Phi_2(\xi, \eta, u, u_\xi, u_\eta) = 0 \text{ — параболический тип,}$$

$$\Delta u + \Phi_1(\xi, \eta, u, u_\xi, u_\eta) = 0 \text{ — эллиптический тип.}$$

Для построения отображения T применяется метод характеристик. Характеристиками называются интегральные кривые характеристического уравнения

$$a dy^2 - 2b dx dy + c dx^2 = 0, \quad (8.2)$$

или

$$\frac{dy}{dx} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - ac}}{a}, \quad a \neq 0. \quad (8.3)$$

При $b^2 - ac > 0$ общие интегралы $\varphi_1(x, y) = C_1$, $\varphi_2(x, y) = C_2$ уравнений (8.3) определяют два различных семейства вещественных характеристик. Отображение T будет иметь форму $\xi = \varphi_1(x, y)$, $\eta = \varphi_2(x, y)$. Если $b^2 - ac = 0$, то имеется только одно семейство характеристик $\varphi_1(x, y) = C$. Отображение T определяется формулами $\xi = \varphi_1(x, y)$, $\eta = \varphi_2(x, y)$, где $\varphi_2(x, y)$ — произвольная функция класса $C^2(\Omega(x, y))$, такая что якобиан $J(\varphi_1, \varphi_2) \neq 0$ в Ω . Если $b^2 - ac < 0$, то имеются два семейства мнимых характеристик $\varphi_1(x, y) \pm i\varphi_2(x, y) = C_{1,2}$. Формулы $\xi = \varphi_1(x, y)$, $\eta = \varphi_2(x, y)$ задают отображение T . При $a = 0$ из (8.2) следуют уравнения

$$dx = 0, \quad dy = \frac{c}{2b}dx,$$

общие интегралы которых определяют два различных семейства вещественных характеристик $x = C_1$, $\varphi_2(x, y) = C_2$.

Уравнение

$$u_{xx} + 2 \operatorname{ch} x u_{xy} + \operatorname{sh}^2 x u_{yy} + \operatorname{sh} x u_y = 0, \quad (8.4)$$

для которого $b^2 - ac = \operatorname{ch}^2 x - \operatorname{sh}^2 x = 1$, принадлежит гиперболическому типу во всей плоскости. Характеристические уравнения

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{ch} x \pm 1$$

обладают общими интегралами $\operatorname{sh} x \pm x - y = C_{1,2}$. Следовательно, отображение T будет иметь форму $\xi = \operatorname{sh} x + x - y$, $\eta = \operatorname{sh} x - x - y$. Производные преобразуются по следующим правилам:

$$\begin{aligned} u_x &= u_\xi \xi_x + u_\eta \eta_x = (\operatorname{ch} x + 1)u_\xi + (\operatorname{ch} x - 1)u_\eta, \\ u_y &= u_\xi \xi_y + u_\eta \eta_y = -u_\xi - u_\eta, \\ u_{xx} &= u_{\xi\xi} \xi_x^2 + 2u_{\xi\eta} \xi_x \eta_x + u_{\eta\eta} \eta_x^2 + u_\xi \xi_{xx} + u_\eta \eta_{xx} = \\ &= (\operatorname{ch} x + 1)^2 u_{\xi\xi} + 2(\operatorname{ch}^2 x - 1)u_{\xi\eta} + (\operatorname{ch} x - 1)^2 u_{\eta\eta} + \\ &\quad + \operatorname{sh} x u_\xi + \operatorname{sh} x u_\eta, \\ u_{xy} &= u_{\xi\xi} \xi_x \xi_y + u_{\xi\eta} (\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x) + u_{\eta\eta} \eta_x \eta_y + u_\xi \xi_{xy} + u_\eta \eta_{xy} = \\ &= -(\operatorname{ch} x + 1)u_{\xi\xi} - 2 \operatorname{ch} x u_{\xi\eta} - (\operatorname{ch} x - 1)u_{\eta\eta}, \\ u_{yy} &= u_{\xi\xi} \xi_y^2 + 2u_{\xi\eta} \xi_y \eta_y + u_{\eta\eta} \eta_y^2 + u_\xi \xi_{yy} + u_\eta \eta_{yy} = \\ &= u_{\xi\xi} + 2u_{\xi\eta} + u_{\eta\eta}. \end{aligned}$$

В новых переменных ξ и η уравнение (8.4) примет вид $u_{\xi\eta} = 0$.

Привести к каноническому виду уравнения 8.1–8.33.

$$8.1. \quad u_{xx} - 8u_{xy} + 16u_{yy} + 4u_x + 16u_y = 0.$$

$$8.2. \quad x^2u_{xx} + 2xyu_{xy} + y^2u_{yy} + yu_x = 0.$$

$$8.3. \quad y^3u_{xx} - 2xy^2u_{xy} + x^2yu_{yy} - x^2u_y = 0.$$

$$8.4. \quad e^{2y}u_{xx} + 2e^yu_{xy} + u_{yy} + u_x + u_y = 0.$$

$$8.5. \quad x^2u_{xx} + 2x\sin 2yu_{xy} + \sin^2 2yu_{yy} - \sin 4yu_y = 0.$$

$$8.6. \quad u_{xx} + 4u_{xy} - 5u_{yy} - 6u_x + 42u_y = 0.$$

$$8.7. \quad y^2u_{xx} - 2xyu_{xy} + x^2u_{yy} - xu_x + yu_y = 0.$$

$$8.8. \quad y^2u_{xx} - x^2u_{yy} + yu_x + xu_y = 0.$$

$$8.9. \quad \sin^2 yu_{xx} - x^2u_{yy} + x\sin^2 yu_x + x^2\operatorname{ctg} yu_y = 0.$$

$$8.10. \quad 2\operatorname{sh} yu_{xy} - \sqrt{\operatorname{ch} y}u_{yy} - \operatorname{sh} y\operatorname{th} yu_x + \sqrt{\operatorname{ch} y}\operatorname{cth} yu_y = 0.$$

$$8.11. \quad (1+x^2)u_{xx} + yu_{xy} + u_y = 0.$$

$$8.12. \quad (1+y^2)u_{xx} + xu_{xy} + x^2u_x + u_y = 0.$$

$$8.13. \quad (1+y)u_{xx} + xu_{xy} + u_y = 0.$$

$$8.14. \quad (1+\cos 2x)u_{xx} - u_{xy} + \sin 2xu_x - yu_y + u = 0.$$

$$8.15. \quad xu_{xx} + 2yu_{xy} + xu_{yy} + (1-\alpha+\beta+\frac{(\alpha+\beta)y}{\sqrt{y^2-x^2}})u_x + \\ + \frac{(\alpha+\beta)y}{\sqrt{y^2-x^2}}u_y = 0.$$

$$8.16. \quad xu_{xx} - xu_{yy} + (\beta-\alpha)u_x + (\beta+\alpha)u_y = 0.$$

$$8.17. \quad 5u_{xx} + 6u_{xy} + 18u_{yy} + 45u_x - 54u_y = 0.$$

$$8.18. \quad u_{xx} + 2u_{xy} + 2u_{yy} + xu_x + yu_y + u = 0.$$

$$8.19. \quad xy^3u_{xx} + 2x^3y^2u_{xy} + 2x^5yu_{yy} - 2y^3u_x + 2x^5u_y = 0.$$

$$8.20. \quad u_{xx} + 2\cos yu_{xy} + u_{yy} - \operatorname{cosec} yu_x - \operatorname{ctg} yu_y = 0.$$

$$8.21. \quad u_{xx} + 4y^2u_{yy} + 2u_x + 8yu_y = 0.$$

$$8.22. \quad x^2u_{xx} + 2xyu_{xy} + 2y^2u_{yy} + 2xu_x + yu_y = 0.$$

$$8.23. \quad (1+x^2)u_{xx} + 2u_{xy} + u_{yy} + 2xu_x + u_y = 0.$$

$$8.24. \quad u_{xx} + 2u_{xy} + (1+y^2)u_{yy} + 2yu_y = 0.$$

$$8.25. \quad u_{xx} + 2\cos xu_{xy} + u_{yy} - yu_y = 0.$$

$$8.26. \quad \operatorname{ch}^2 yu_{xx} + 2u_{xy} + u_{yy} + \operatorname{ch} yu_x = 0.$$

$$8.27. \quad x u_{xx} + 2y u_{xy} + x u_{yy} + u_x = 0.$$

$$8.28. \quad x u_{xx} + 2y u_{xy} + x u_{yy} + (1 - y) u_x = 0.$$

$$8.29. \quad y u_{xx} + 2x u_{xy} + y u_{yy} + a u_y = 0.$$

$$8.30. \quad y u_{xx} - (x + y) u_{xy} + x u_{yy} + u_x + u_y = 0.$$

$$8.31. \quad \pi u_{xx} - 4ye^{-2x^2} u_{yy} + 2\pi x u_x = 0.$$

$$8.32. \quad x u_{xx} + u_{yy} + u_x + 2u = 0.$$

$$8.33. \quad 4y^2 u_{xx} - 9y^4 u_{yy} - 6x^2 u_x + 2xy u_y = 0.$$

$$8.34. \quad x u_{xx} - y u_{yy} + \left(\sqrt{x} + \frac{1}{2}\right) u_x + \left(\sqrt{y} + \frac{1}{2}\right) u_y = 0.$$

Пример 8.2. Приведение уравнений с постоянными коэффициентами к каноническому виду. Так как тип уравнения и точка $x_0 \in \mathbb{R}^n$ определяется значениями коэффициентов a_{ij} в этой точке, то уравнение

$$\sum_{i,j=1}^n a_{ij} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j} + \sum_{i=1}^n b_i \frac{\partial u}{\partial x_i} + cu = f \quad (8.5)$$

с постоянными коэффициентами принадлежит определенному типу во всем пространстве $\mathbb{R}^n$. Вид уравнения (8.5) называется каноническим, если группа старших производных имеет форму

$$\sum_{i=1}^r \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} - \sum_{i=r+1}^{r+s} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}, \quad r + s \leq n,$$

т.е. матрица $A = (a_{ij})$ является диагональной с элементами a_{ij} , равными 0, -1, +1.

Приведение уравнения (8.5) к каноническому виду осуществляется посредством линейной замены переменных

$$\xi = \sum_{i=1}^n b_{ij} x_j, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad b_{ij} = \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j},$$

или в матричной форме

$$\xi = Bx, \quad (8.6)$$

где $B = (b_{ij})$ — невырожденная матрица, ξ и x — векторы-столбцы

$$\xi = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_n \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

Производные функции $u(x)$ преобразуются по формулам

$$\frac{\partial u}{\partial x_i} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial u}{\partial \xi_k} \frac{\partial \xi_k}{\partial x_i} = \sum_{k=1}^n b_{ik} \frac{\partial u}{\partial \xi_k}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n,$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j} = \sum_{k,l=1}^n \frac{\partial^2 u}{\partial \xi_k \partial \xi_l} \frac{\partial \xi_k}{\partial x_i} \frac{\partial \xi_l}{\partial x_j} = \sum_{k,l=1}^n b_{ki} b_{lj} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi_k \partial \xi_l}, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Группа старших производных в новых переменных приобретает следующую форму:

$$\sum_{i,j=1}^n a_{ij} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j} = \sum_{k,l=1}^n b_{ki} b_{lj} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi_k \partial \xi_l} \sum_{i,j=1}^n b_{ki} a_{ij} b_{jk}^* = \sum_{i,j=1}^n \tilde{a}_{kl} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi_k \partial \xi_l},$$

где символ $*$ означает транспонирование матрицы. Элементы матриц $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})$ и $A = (a_{ij})$ связаны соотношениями

$$\tilde{a}_{kl} = \sum_{i,j=1}^n a_{ij} b_{ki} b_{lj} = \sum_{i,j=1}^n b_{ki} a_{ij} b_{jl}^*,$$

т. е.

$$\tilde{A} = BAB^*. \quad (8.7)$$

Поиск замены переменных (8.6), преобразующей уравнение (8.5) к каноническому виду, проводится методом, отличным от метода характеристик (см. пример 8.4). Группе старших производных уравнения (8.5) ставится в соответствие характеристическая квадратичная форма

$$q = \sum_{i=1}^n a_{ij} \lambda_i \lambda_j = \lambda^* A \lambda, \quad (8.8)$$

где λ — вектор-столбец. Каноническому виду уравнения (8.5) соответствует форма

$$q = \sum_{i=1}^r \lambda_i^2 - \sum_{i=r+1}^{r+s} \lambda_i^2, \quad r + s \leq n, \quad (8.9)$$

вид которой называется нормальным (т. е. такой канонический вид $q = \sum_{i=1}^n \alpha_i \lambda_i^2$, в котором $\alpha_i \in \{-1, 0, 1\}$). Линейная замена

$$\lambda = C\mu, \quad \det C \neq 0, \quad (8.10)$$

преобразует характеристическую квадратичную форму (8.8) к виду $q = (C\mu)^*AC\mu = \mu^*C^*AC\mu = \mu^*\bar{A}\mu$, где

$$\bar{A} = C^*AC. \quad (8.11)$$

Теперь можно сделать следующее заключение. В результате преобразований (8.10) с матрицей C и (8.6) с матрицей $B = C^*$ новые коэффициенты при старших производных в уравнении (8.5) и коэффициенты преобразованной квадратичной формы q одинаковы. Действительно, если $B = C^*$, то из сравнения матриц (8.7) и (8.11) следует, что $\bar{A} = BAB^* = C^*AC = \bar{A}$. Таким образом, если замена (8.10) преобразует квадратичную форму (8.8) к нормальному виду (8.9), то замена (8.6), в которой $B = C^*$, преобразует уравнение (8.5) к каноническому виду.

Один из методов приведения квадратичной формы (8.8) к нормальному виду (8.9) (метод Лагранжа) состоит в выделении полных квадратов слагаемых, содержащих λ_1 , затем λ_2 и т. д., или в любом другом порядке. Если пара переменных λ_i и λ_j входит только в виде произведения $\lambda_i\lambda_j$, то нужно сделать замену $\lambda_i = \mu_i - \mu_j$, $\lambda_j = \mu_i + \mu_j$, после чего $\lambda_i\lambda_j = \mu_i^2 - \mu_j^2$.

Уравнению

$$u_{xx} - 3u_{yy} + 3u_{zz} - 2u_{xy} + 4u_{xz} + u_{zt} + u_x + 3u_y + u = 0 \quad (8.12)$$

соответствует квадратичная форма

$$q = \lambda_1^2 - 3\lambda_2^2 + 3\lambda_3^2 - 2\lambda_1\lambda_2 + 4\lambda_1\lambda_3 + \lambda_3\lambda_4.$$

Последовательное выделение полных квадратов слагаемых, содержащих λ_1 , затем λ_2 , приводит квадратичную форму к виду

$$\begin{aligned} q &= \lambda_1^2 - 2\lambda_1\lambda_2 + 4\lambda_1\lambda_3 - 3\lambda_2^2 + 3u_{zz} + \lambda_3\lambda_4 = \\ &= (\lambda_1 - \lambda_2 + 2\lambda_3)^2 - 4\lambda_2^2 + 4\lambda_2\lambda_3 - \lambda_3^2 + \lambda_3\lambda_4 = \\ &= (\lambda_1 - \lambda_2 + 2\lambda_3)^2 - (2\lambda_2 - \lambda_3)^2 + \lambda_3\lambda_4. \end{aligned}$$

Последнее слагаемое $\lambda_3\lambda_4$ преобразуется в разность квадратов посредством замены $\lambda_3 = \mu_3 - \mu_4$, $\lambda_4 = \mu_3 + \mu_4$. Итак,

$$q = (\lambda_1 - \lambda_2 + 2\lambda_3)^2 - (2\lambda_2 - \lambda_3)^2 + \left(\frac{\lambda_3 + \lambda_4}{2}\right)^2 - \left(\frac{\lambda_3 - \lambda_4}{2}\right)^2.$$

В новых переменных

$$\begin{cases} \mu_1 = \lambda_1 - \lambda_2 + 2\lambda_3, \\ \mu_2 = 2\lambda_2 - \lambda_3, \\ \mu_3 = \frac{1}{2}\lambda_3 + \frac{1}{2}\lambda_4, \\ \mu_4 = \frac{1}{2}\lambda_3 - \frac{1}{2}\lambda_4 \end{cases} \quad (8.13)$$

квадратичная форма принимает нормальный вид

$$q = \mu_1^2 - \mu_2^2 + \mu_3^2 - \mu_4^2. \quad (8.14)$$

Решением системы (8.13) относительно $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ будет

$$\begin{cases} \lambda_1 = \mu_1 + \frac{1}{2}\mu_2 - \frac{3}{2}\mu_3 + \frac{3}{2}\mu_4, \\ \lambda_2 = \frac{1}{2}\mu_2 + \frac{1}{2}\mu_3 - \frac{1}{2}\mu_4, \\ \lambda_3 = \mu_3 - \mu_4, \\ \lambda_4 = \mu_3 + \mu_4, \end{cases}$$

что в соответствии с заменой (8.10) определяет матрицы C и C^* :

$$C = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{3}{2} & \frac{3}{2} \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad C^* = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{3}{2} & \frac{1}{2} & 1 & 1 \\ \frac{3}{2} & -\frac{1}{2} & -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Построение матрицы C завершает решение задачи по введению новых переменных. Согласно соотношению (8.6), в котором $B = C^*$, старые переменные $x = x_1, y = x_2, z = x_3, t = x_4$ и новые переменные $\xi = \xi_1, \eta = \xi_2, \zeta = \xi_3, \tau = \xi_4$ связаны зависимостью

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \\ \tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{3}{2} & \frac{1}{2} & 1 & 1 \\ \frac{3}{2} & -\frac{1}{2} & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix}.$$

т. е. $\xi = x, \eta = \frac{1}{2}x + \frac{1}{2}y, \zeta = -\frac{3}{2}x + \frac{1}{2}y + z + t, \tau = \frac{3}{2}x - \frac{3}{2}y - z + t$. В соответствии с конструкцией (8.14) квадратичной формы q старшие производные в уравнении (8.12) в новых переменных будут представлены суммой $u_\xi \xi - u_\eta \eta + u_\zeta \zeta - u_\tau \tau$. Преобразование первых производных

$$\begin{aligned} u_x &= u_\xi \xi_x + u_\eta \eta_x + u_\zeta \zeta_x + u_\tau \tau_x = u_\xi + \frac{1}{2}u_\eta - \frac{3}{2}u_\zeta + \frac{3}{2}u_\tau, \\ u_y &= u_\xi \xi_y + u_\eta \eta_y + u_\zeta \zeta_y + u_\tau \tau_y = \frac{1}{2}u_\eta + \frac{1}{2}u_\zeta - \frac{3}{2}u_\tau \end{aligned}$$

есть последний элемент приведения уравнения (8.12) к каноническому виду. В итоге

$$u_{\xi\xi} - u_{\eta\eta} + u_{\zeta\zeta} - u_{\tau\tau} + u_{\xi} + 2u_{\eta} + u = 0. \quad (8.15)$$

Дальнейшее упрощение состоит в переходе к уравнению, в котором нет первых производных. Это достигается заменой функции $u = ve^{\alpha\xi + \beta\eta}$ с неизвестными величинами α и β . После подстановки u в (8.15) слагаемые, содержащие первые производные $(2\alpha_1)v_{\xi} + (2 - 2\beta)v_{\eta}$, будут равны нулю при $\alpha = -\frac{1}{2}$, $\beta = 1$; функция $v(\xi, \eta, \zeta, \tau)$ — решение уравнения

$$v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} + v_{\zeta\zeta} - v_{\tau\tau} + \frac{7}{4}u = 0.$$

Если бы в уравнении (8.15) отсутствовала производная $u_{\xi\xi}$ (или $u_{\eta\eta}$), то освободиться от u_{ξ} (или от u_{η}) не удалось бы.

З а м е ч а н и е 1. Процедура приведения квадратичной формы к нормальному виду является неоднозначной (произвольными оказываются последовательность выделения полных квадратов, выбор знака у переменных μ_k и т. п.). Поэтому существует множество различных матриц C^* , определяющих замену переменных (8.10), т. е. сама замена переменных также неоднозначна. Однако эта неоднозначность не влияет на тип (r, s) уравнения, который остается постоянным.

З а м е ч а н и е 2. Уравнение (8.1) с постоянными коэффициентами имеет две канонические формы. Первая каноническая форма $u_{\xi\xi} - u_{\eta\eta} = \Phi_1(\xi, \eta, u, u_{\xi}, u_{\eta})$ получается методом, изложенном в данном примере, вторая форма $u_{\xi\eta} = \Phi_2(\xi, \eta, u, u_{\xi}, u_{\eta})$ получается методом характеристик (см. пример 8.1).

Привести к каноническому виду уравнения второго порядка 8.35–8.75 с постоянными коэффициентами. Ввиду неоднозначности замены переменных в ответах к большинству задач дана квадратичная форма на некотором этапе ее преобразования к нормальному виду.

8.35. $7u_{xx} + 2\sqrt{7}u_{xy} + u_{yy} + \sqrt{7}u_x + u_y + u = 0.$

8.36. $2u_{xx} + 5u_{xy} + 3u_{yy} + 4\sqrt{2}u_x + 5\sqrt{2}u_y + 4u = 0.$

8.37. $3u_{xx} + 2u_{xy} + 11u_{yy} + 3\sqrt{3}u_x + \sqrt{3}u_y - \frac{1}{4}u = 0.$

8.38. $u_{xx} + 2u_{xy} - 2u_{xz} - 2u_x - 2u_y + u = 0.$

8.39. $u_{xy} + u_{yz} + u_{xz} + u_x - u_y + u_z + 3u = 0.$

- 8.40. $u_{xx} + u_{xy} + u_{xz} + u_{yz} + u_z + u = 0.$
- 8.41. $u_{xx} + 2u_{yy} + 3u_{zz} + 2u_{xy} - 2u_{xz} = 0.$
- 8.42. $u_{xx} + u_{yy} + u_{zz} - u_{xy} - u_{xz} - u_{yz} = 0.$
- 8.43. $u_{xx} - 5u_{yy} - 4u_{xy} + 2u_{xz} + 2u_{yz} + 3u_x - 3u_y - u_z = 0.$
- 8.44. $u_{xx} + 9u_{yy} + 3u_{zz} + 4u_{xy} - 2u_{xz} - 2u_{yz} = 0.$
- 8.45. $u_{xx} + 8u_{yy} - 9u_{zz} - 6u_{xy} + 4u_{xz} - 16u_{yz} = 0.$
- 8.46. $u_{xx} + 7u_{zz} + 2u_{xy} + 4u_{xz} + 6u_{yz} = 0.$
- 8.47. $4u_{xx} + 13u_{yy} + 17u_{zz} - 12u_{xy} + 16u_{xz} - 28u_{yz} = 0.$
- 8.48. $u_{xx} + 13u_{yy} + 3u_{zz} - 6u_{xy} - 2u_{xz} + 10u_{yz} = 0.$
- 8.49. $9u_{xx} + 12u_{yy} - 17u_{zz} + 24u_{xy} - 6u_{xz} - 20u_{yz} = 0.$
- 8.50. $9u_{xx} + 16u_{yy} + u_{zz} - 24u_{xy} + 6u_{xz} - 8u_{yz} = 0.$
- 8.51. $u_{xx} - 4u_{xy} + u_{zt} + u_x - 2u_y + u_z + u_t + u = 0.$
- 8.52. $u_{xy} + u_{yz} + u_{zt} + u_{xt} + u_x + u_y + u_z + u_t + u = 0.$
- 8.53. $u_{xy} + u_{yz} + u_{zt} - u_{xt} + u_x + u_y - 2u_z - 2u_t + 2u = 0.$
- 8.54. $u_{xx} + 3u_{yy} - 4u_{xy} + u_{zt} + u_x - 2u_y + u_z - u_t - u = 0.$
- 8.55. $u_{xx} + 5u_{yy} - u_{zz} - 3u_{xy} - u_{zt} + 2u_x - 3u_y + 2u_z + u_t - u = 0.$
- 8.56. $u_{xx} + u_{tt} - 2u_{xz} + 2u_{yz} - 2u_{zt} + 2u_x + u_y - u_z + 2u_t + 3u = 0.$
- 8.57. $u_{xx} + u_{xy} + u_{yz} - u_{xt} + 2u_x - 3u_y + u_z - u_t + 7u = 0.$
- 8.58. $2u_{xy} + 2u_{zt} + u_{xz} + u_{xt} + u_{yz} + u_{yt} + u_x + u_t + \frac{1}{9}u = 0.$
- 8.59. $u_{xy} + u_{yz} + u_{xz} - u_{xt} + u_x + u_y + 4u_z - u_t = 0.$
- 8.60. $u_{xy} + u_{yz} - u_{xz} - u_{xt} + u_x + u_y + u_z + u_t + 2u = 0.$
- 8.61. $u_{xy} + u_{yz} - u_{xt} - u_{zt} + 3u_x + u_y + 3u_z - 2u_t + 4u = 0.$
- 8.62. $u_{xy} + u_{xz} + u_{xt} + u_{yz} + u_{yt} + u_{zt} + 2u_x + u_y + u_z + 2u_t = 0.$
- 8.63. $u_{xx} + u_{yy} + u_{zz} + u_{tt} + u_{xy} + u_{yz} - u_{xt} + u_{zt} = 0.$
- 8.64. $u_{xx} + 13u_{yy} + 10u_{tt} + 6u_{xy} - 2u_{xt} + 6u_{yt} - u_{zt} = 0.$
- 8.65. $u_{xx} + u_{yy} + u_{zz} + u_{tt} + u_{xy} + u_{yz} + u_{xt} + u_{zt} = 0.$
- 8.66. $u_{xx} - 3u_{yy} + 3u_{zz} - 2u_{xy} + 4u_{xz} + u_{zt} + u_x + 3u_y - 2u_z = 0.$
- 8.67. $u_{xx} + 3u_{yy} - u_{zz} - 3u_{xy} - u_{zt} + u_x + 3u_y + u_z - u_t + 8u = 0.$

$$8.68. \quad u_{xx} + 2u_{yy} + u_{tt} + 4u_{xy} + 4u_{xz} + 2u_{xt} + 2u_{yz} + 2u_{yt} + 2u_{zt} = 0.$$

$$8.69. \quad 4u_{xx} + 2u_{yy} + 3u_{zz} - u_{tt} - 4u_{xy} + 4u_{xz} + 4u_{xt} - 4u_{yz} - 2u_{yt} = 0.$$

$$8.70. \quad u_{xx} - 4u_{yy} + 6u_{xy} - 4u_{xz} - 2u_{xt} + 2u_{yz} + 2u_{yt} = 0.$$

$$8.71. \quad u_{xx} + u_{tt} - 2u_{xt} + 2u_{yz} - 2u_{zt} + u_y - u_z - u_t = 0.$$

$$8.72. \quad u_{xx} + u_{yy} + u_{zz} + u_{tt} + u_{xy} + u_{yz} - u_{xt} - u_{zt} = 0.$$

$$8.73. \quad u_{xx} + 2u_{yy} + u_{zz} + 4u_{xy} + u_{xz} + u_x + 2u_y - u_z - 4u_t + 5u = 0.$$

$$8.74. \quad 9u_{xx} + u_{yy} + 16u_{zz} + 4u_{tt} - 6u_{xy} - 24u_{xz} - 12u_{xt} + 8u_{yz} + 4u_{yt} + 16u_{zt} = 0.$$

$$8.75. \quad \sum_{i,j=1}^n a_i a_j u_{x_i x_j} = 0.$$

Пример 8.3. В конструкцию многих моделей математической физики входит уравнение (8.1). Функция $u(x, y)$ называется решением уравнения (8.1) в области Ω , если $u(x, y) \in C^2(\Omega)$ и удовлетворяет уравнению, т.е. при подстановке в него функции $u(x, y)$ оно становится тождеством. Общим решением уравнения называется множество всех его решений. Изучение ряда физических процессов, в описании которых участвует уравнение (8.1), заключается в отыскании частного решения, т.е. такого, которое удовлетворяет заданным дополнительным условиям. Один из методов получения результата основан на построении общего решения уравнения (8.1), откуда затем выделяется необходимое частное решение. Построить общее решение удастся лишь в частных случаях, и здесь его канонический вид играет основную роль.

1. Найти общее решение уравнения (8.4). В новых переменных $\xi = \operatorname{sh} x + x - y$, $\eta = \operatorname{sh} x - x - y$ уравнение принимает канонический вид $u_{\xi\eta} = 0$ (пример 8.1). Последовательное интегрирование по η

$$u_{\xi} = C(\xi),$$

затем по ξ определяют функцию

$$u = \int C(\xi) d\xi + g(\eta) = f(\xi) + g(\eta).$$

Таким образом, любое решение уравнения $u_{\xi\eta} = 0$ представляет собой сумму двух произвольных дважды дифференцируемых

функций. Следовательно, в старых переменных общее решение уравнения имеет вид

$$u(x, y) = f(\operatorname{sh} x + x - y) + g(\operatorname{sh} x - x - y), \quad (f, g) \in C^2. \quad (8.16)$$

2. Уравнение

$$u_{xx} + u_{xy} + (2x - y)u_x + yu_y - 2y(y - x)u = 0, \quad (8.17)$$

коэффициенты которого $a = 1$, $b = \frac{1}{2}$, $c = 0$, а $\Delta = b^2 - ac = \frac{1}{4} > 0$, принадлежит гиперболическому типу в $\mathbb{R}^2$. Характеристические уравнения (8.2) $\frac{dy}{dx} = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$, общие интегралы которых $y - x = C_1$, $y = C_2$, определяют замену переменных $\xi = x - y$, $\eta = y$. В новых переменных производные (см. формулы дифференцирования в конце примера 8.1) равны

$$u_x = u_\xi, \quad u_y = -u_\xi + u_\eta, \quad u_{xx} = u_{\xi\xi}, \quad u_{xy} = -u_{\xi\xi} + u_{\xi\eta};$$

их подстановка в уравнение (8.17) преобразует его к каноническому виду

$$u_{\xi\eta} + 2\xi u_\eta + \eta u_\eta + 2\xi \eta u = 0.$$

Это уравнение, представленное в форме

$$u + (u_\xi - \eta u)_\eta - 2\xi(u_\xi - \eta u) = 0,$$

эквивалентно системе

$$\begin{cases} v = u_\xi - \eta u, \\ u = 2\xi v - v_\eta. \end{cases} \quad (8.18)$$

Отсюда следует, что

$$v + \eta v_\eta - v_{\xi\eta} - 2\xi(\eta v - v_\xi) = 0,$$

или

$$(\eta v - v_\xi)_\eta - 2\xi(\eta v - v_\xi) = 0.$$

Функция $w = v_\xi - \eta v$ удовлетворяет уравнению с разделяющимися переменными:

$$w_\eta - 2\xi w = 0 \implies w = f(\xi)e^{2\xi\eta}.$$

Таким образом, функция v — решение линейного уравнения

$$v_\xi - \eta v = f(\xi)e^{2\xi\eta},$$

к которому применим метод вариации постоянной:

$$v_\xi - \eta v = 0 \implies v = C(\xi)e^{\xi\eta} \implies C'(\xi) = f(\xi)e^{\xi\eta}.$$

Далее

$$C(\xi) = \int_0^{\xi} f(s)e^{\eta s} ds + g(\eta) \implies v = e^{\xi\eta} \left[\int_0^{\xi} f(s)e^{\eta s} ds + g(\eta) \right].$$

Подстановка функции v во второе уравнение системы (8.18) определяет общее решение

$$u = e^{\xi\eta} \left[\int_0^{\xi} (\xi - s)f(s)e^{\eta s} ds + \xi g(\eta) - g'(\eta) \right].$$

В старых переменных

$$u(x, y) = e^{(x-y)y} \left[\int_0^{x-y} (x - y - s)f(s)e^{ys} ds + (x - y)g(y) - g'(y) \right].$$

8.76. Оператор Эйлера–Дарбу имеет вид

$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} - \frac{1}{x - y} \left(\alpha \frac{\partial}{\partial x} - \beta \frac{\partial}{\partial y} \right).$$

Пусть функция $u(x, y)$ удовлетворяет уравнению $\mathcal{E}(\alpha, \beta) u(x, y) = 0$. Доказать, что:

- 1) $v = (x - y)^{\alpha+\beta-1}u$ — решение уравнения $\mathcal{E}(1-\beta, 1-\alpha) v = 0$;
- 2) $v = \frac{\partial^{m+n} u}{\partial x^m \partial y^n}$ удовлетворяет уравнению $\mathcal{E}(\alpha + n, \beta + m) v = 0$.

8.77. Найти общее решение уравнения Эйлера–Дарбу

$$u_{xy} - \frac{\alpha u_x - \beta u_y}{x - y} = 0,$$

если: 1) $\alpha = m, \beta = n, m, n \in \mathbb{N}$; 2) $\alpha = -m, \beta = -n, m, n \in \mathbb{N}_0$.

8.78. Показать, что уравнение

$$u_{xy} - \frac{a u_x - b u_y}{x - y} - \frac{cu}{(x - y)^2} = 0$$

с постоянными коэффициентами a, b, c преобразуется посредством замены $u(x, y) = (x - y)^\gamma v(x, y)$ (при некотором γ) в уравнение Эйлера–Дарбу.

Найти общие решения уравнений 8.79–8.103 в $\mathbb{R}^2$ или в области $\Omega \in \mathbb{R}^2$.

$$8.79. \quad u_{xx} + 8u_{xy} + 16u_{yy} + 32u_x + 128u_y + 192u = 0.$$

$$8.80. \quad 3u_{xx} - 2\sqrt{6}u_{xy} + 2u_{yy} + 5u_x - 5\sqrt{\frac{2}{3}}u_y - 2u = 0.$$

$$8.81. \quad u_{xx} - 2\cos xu_{xy} - \sin^2 xu_{yy} + \sin xu_y = 0.$$

$$8.82. \quad e^{2x}u_{xx} + 2e^xu_{xy} - 8u_{yy} + e^{2x}u_x = 0.$$

$$8.83. \quad (1+x^2)u_{xx} + yu_{xy} + 2xu_x = 0.$$

$$8.84. \quad \sin^2 y u_{xx} + 2u_{xy} + u_{yy} + \operatorname{tg} y(u_x + u_y) = 0.$$

$$8.85. \quad \sin x u_{xx} + 2\sin x u_{xy} + \sin x \cos 2x u_{yy} - \cos x(u_x + u_y) = 0.$$

$$8.86. \quad 2x u_{xx} + y\sqrt{x}u_{xy} + u_x = 0.$$

$$8.87. \quad e^{2x}u_{xx} + 2e^xu_{xy} - 8u_{yy} + e^{2x}u_x + 32u_y - 32u = 0.$$

$$8.88. \quad u_{xx} + \left(\frac{x}{y} - \frac{y}{x}\right)u_{xy} - u_{yy} + \frac{y^2 - 3x^2}{x(x^2 + y^2)}u_x + \frac{3y^2 - x^2}{y(x^2 + y^2)}u_y = 0.$$

$$8.89. \quad \frac{2e^{-y^2}}{\sqrt{\pi}}u_{xy} + u_{yy} + 2yu_y = 0.$$

$$8.90. \quad 2u_{xx} - 14u_{xy} - 16u_{yy} + 17u_x - 136u_y = 0.$$

$$8.91. \quad (1+2y)u_{xx} - 2xu_{xy} - 2xyu_x = 0.$$

$$8.92. \quad 2u_{xx} - 3u_{xy} + u_{yy} + 5u_x - 2u_y - 3u = 0.$$

$$8.93. \quad (1+x)u_{xx} + yu_{xy} - xu_x - yu_y - u = 0.$$

$$8.94. \quad u_{xx} + u_{xy} - y(u_x + u_y) + u = 0.$$

$$8.95. \quad \operatorname{sh} y u_{xx} + 2\operatorname{ch} y u_{xy} + \operatorname{ch} y u_x = 0.$$

$$8.96. \quad u_{xx} + yu_{yy} - 2u_x + \frac{1}{2}u_y + u = 0, \quad \Omega = \{x, y: x \in \mathbb{R}, y < 0\}.$$

$$8.97. \quad u_{xx} - (1 + \operatorname{ch} 2y)u_{yy} + u_x - \operatorname{sh} 2y u_y + \frac{1}{4}u = 0.$$

$$8.98. \quad u_{xx} - \operatorname{cosecans}^2 y u_{yy} - u_x + \cos y \operatorname{cosecans}^3 y u_y + \frac{1}{4}u = 0.$$

$$8.99. \quad u_{xx} - u_{xy} + y(x+y)(u_y - u_x) - (x+y)u = 0.$$

$$8.100. \quad u_{xx} + u_{xy} - a(2x-y)u_x - ayu_y - 2a^2y(y-x)u = 0.$$

$$\mathbf{8.101.} \quad yu_{xx} + 2xu_{xy} + yu_{yy} - (2m - 1)u_y = 0, \quad m \in \mathbb{N}_0, \quad \Omega = \{x, y: x^2 > y^2\}.$$

$$\mathbf{8.102.} \quad xu_{xx} + 2yu_{xy} + xu_{yy} + (2m + 1)u_x = 0, \quad m \in \mathbb{N}_0, \quad \Omega = \{x, y: y^2 > x^2\}.$$

$$\mathbf{8.103.} \quad xu_{xx} + u_{yy} + \frac{1}{2}(a - 1)u_x = 0, \quad a \in \mathbb{Z}, \quad \Omega = \{x, y: x < 0, y \in \mathbb{R}\}.$$

$$\mathbf{8.104.} \quad 4xu_{xx} - u_{yy} - \frac{5u}{4x} = 0, \quad x > 0.$$

Пример 8.4. Решение уравнения Эйлера–Дарбу для нецелых значений α и β (целые α и β — в задаче 8.77). Уравнение имеет частное решение в виде $X(x)Y(y)$. Действительно, подстановка произведения в уравнение преобразует его в тождество

$$x + \beta \frac{X}{X'} = y + \beta \frac{Y}{Y'} = \lambda,$$

в котором λ — постоянная величина. Отсюда

$$X = C_1(\lambda)(x - \lambda)^{-\beta}, \quad Y = C_2(\lambda)(\lambda - y)^{-\alpha},$$

где $y < \lambda < x$, и в силу линейности уравнения суперпозиция

$$u_1(x, y) = \int_y^x f(\lambda)(x - \lambda)^{-\beta}(\lambda - y)^{-\alpha} d\lambda, \quad \alpha < 1, \quad \beta < 1,$$

— также решение этого уравнения. Второе частное решение (согласно свойству 1) из задачи 8.76) имеет форму

$$u_2(x, y) = (x - y)^{1-\alpha-\beta} \int_y^x g(\lambda)(x - \lambda)^{\alpha-1}(\lambda - y)^{\beta-1} d\lambda, \quad 0 < \alpha, \quad 0 < \beta.$$

Суперпозиция $u(x, y) = u_1(x, y) + u_2(x, y)$ представляет собой решение уравнения Эйлера–Дарбу, содержащее две произвольные непрерывные функции. После линейной замены $\lambda = x\tau + y(1 - \tau)$, переводящей $y \rightarrow 0$, $x \rightarrow 1$, решение приобретает форму

$$u(x, y) = (x - y)^{\alpha-\beta} \int_0^1 f(y - (x - y)\tau)\tau^{-\alpha}(1 - \tau)^{-\beta} d\tau + \\ + \int_0^1 g(y - (x - y)\tau)\tau^{\beta-1}(1 - \tau)^{\alpha-1} d\tau,$$

где $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 1$, $\alpha + \beta \neq 1$. Множество значений α и β можно расширить с помощью свойств из задачи 8.76 (см. задачи к этому примеру).

Получить решения уравнений 8.105–8.118, содержащие две произвольные непрерывные функции; решить задачи 8.119–8.121.

$$8.105. \quad u_{xy} - \frac{a u_x - \beta u_y}{x - y} = 0, \quad 0 < \alpha < 1, \quad \alpha + \beta = 1.$$

$$8.106. \quad u_{xy} - \frac{3}{2} \frac{u_x}{x - y} + \frac{1}{2} \frac{u_y}{x - y} = 0.$$

$$8.107. \quad u_{xy} - \frac{7}{8} \frac{u_x}{x - y} + \frac{5}{4} \frac{u_y}{x - y} = 0.$$

$$8.108. \quad u_{xy} + \frac{1}{4} \frac{u_x}{x - y} + \frac{1}{3} \frac{u_y}{x - y} = 0.$$

$$8.109. \quad u_{xy} - \frac{7}{6} \frac{u_x}{x - y} - \frac{2}{5} \frac{u_y}{x - y} = 0.$$

$$8.110. \quad u_{xy} + \frac{8}{3} \frac{u_x}{x - y} - \frac{7}{4} \frac{u_y}{x - y} = 0.$$

$$8.111. \quad xu_{xx} + 2yu_{xy} + xu_{yy} + \left(2 - \frac{1}{3} \frac{y}{\sqrt{y^2 - x^2}}\right) u_x - \frac{1}{3} \frac{x}{\sqrt{y^2 - x^2}} u_y = 0.$$

$$8.112. \quad x\sqrt{x} u_{xx} - \sqrt{x} u_{yy} + \frac{7}{8} \sqrt{x} u_x + \frac{1}{8} u_y = 0.$$

$$8.113. \quad yu_{xx} + 2xu_{xy} + yu_{yy} - \frac{yu_x}{\sqrt{x^2 - y^2}} - \frac{xu_y}{\sqrt{x^2 - y^2}} + \frac{yu}{x^2 - y^2} = 0.$$

$$8.114. \quad x^2 \ln xu_{xx} - \ln xu_{yy} - x \left(\frac{7}{6} + \ln x \right) + \frac{1}{2} u_y = 0, \quad x > 0.$$

$$8.115. \quad u_{xx} - e^{2x} u_{yy} - 2u_x + \frac{1}{3} e^x u_y - u = 0.$$

$$8.116. \quad x^2 u_{xx} - y^2 u_{yy} + xu_x - yu_y + \frac{24x^2 u}{25(1 - x^2)} = 0.$$

$$8.117. \quad (x^2 - y^4) u_{xx} + 2xy u_{xy} + y^2 u_{yy} + \frac{1}{3} (xu_x + yu_y) = 0.$$

$$8.118. \quad 4ye^{2x^2} u_{xx} - \pi u_{yy} + 2\pi x u_x = 0.$$

$$8.119. \quad xu_{xx} + u_{yy} + \frac{5}{4} u_x = 0, \quad \lim_{x \rightarrow 0} (-x)^{\frac{1}{4}} u = 0, \quad u|_{y=2\sqrt{-2x}}.$$

$$8.120. \quad xu_{xx} - xu_{yy} + \frac{9}{8}u_x - \frac{1}{8}u_y = 0, \quad \lim_{x \rightarrow 0} x^{\frac{1}{8}}u = 0, \quad u|_{y=x} = x^2.$$

$$8.121. \quad xu_{xx} - x^3u_{yy} + \frac{1}{2}u_x + \frac{1}{2}xu_y = 0, \quad u|_{x=0} = 0, \quad u|_{2y=x^2} = x^{\frac{5}{2}}.$$

Пример 8.5. Решение задачи Коши для уравнения гиперболического типа. Пусть уравнение

$$au_{xx} + 2bu_{xy} + cu_{yy} + \Phi(x, y, u, u_x, u_y) = 0 \quad (8.19)$$

принадлежит гиперболическому типу в области Ω . На линии $L \subset \overline{\Omega}$, касательное направление в каждой точке которой не совпадает с характеристическим направлением в этой точке, определены функции $u_0(x, y)$, $u_1(x, y)$ и вектор $\mathbf{l}(x, y)$, не касательный к L . Задача Коши ставится следующим образом: найти решение уравнения (8.19) в классе достаточно гладких функций при условиях

$$u|_L = u_0, \quad \frac{\partial u}{\partial l} \Big|_L = u_1.$$

Решение задачи Коши для гиперболического уравнения (8.4) в полуплоскости $\Omega = \{x, y: -\infty < x < \infty, 0 < y\}$ при условиях на границе $u(x, 0) = \operatorname{sh} x$, $u_y(x, 0) = -1$ (здесь L — ось Ox) состоит из двух этапов: 1) построение общего решения уравнения методом характеристик; 2) выделение частного решения, удовлетворяющего условиям на L .

1. Общее решение уравнения получено в примере 8.1 и определяется формулой (8.16), т. е.

$$u(x, y) = f(\operatorname{sh} x + x - y) + g(\operatorname{sh} x - x - y), \quad (f, g) \in C^2.$$

2. Из условий на L следует, что функции f и g удовлетворяют системе тождеств

$$\begin{aligned} f(\operatorname{sh} x + x) + g(\operatorname{sh} x - x) &= \operatorname{sh} x, \\ f'(\operatorname{sh} x + x) + g'(\operatorname{sh} x - x) &= 1. \end{aligned}$$

Сумма двух тождеств (продифференцированного по x первого и умноженного на $1 - \operatorname{ch} x$ второго) равна $2f'(\operatorname{sh} x + x) = 1$, следовательно, $f(z) = z/2 + C$. Тогда

$$g(\operatorname{sh} x - x) = \operatorname{sh} x - \frac{\operatorname{sh} x + x}{2} - C = \frac{\operatorname{sh} x - x}{2} - C,$$

т. е. $g(z) = z/2 - C$. Решение задачи Коши получается подстановкой в (8.16) найденных выражений для функций f и g , тогда:

$$u(x, y) = \frac{\operatorname{sh} x + x - y}{2} + C + \frac{\operatorname{sh} x - x - y}{2} - C = \operatorname{sh} x - y.$$

Полученное решение задачи Коши единственно. Действительно, если существуют два различных решения $v_1(x, y)$ и $v_2(x, y)$, то функция $v = v_1 - v_2$ удовлетворяет уравнению (8.4), имеет форму (8.16) и выполняются начальные условия

$$\begin{aligned} f(\operatorname{sh} x + x) + g(\operatorname{sh} x - x) &= 0, \\ f'(\operatorname{sh} x + x) + g'(\operatorname{sh} x - x) &= 0. \end{aligned}$$

Продифференцированное первое уравнение вместе со вторым составляет новую систему

$$\begin{aligned} f'(\operatorname{sh} x + x)(\operatorname{ch} x + 1) + g'(\operatorname{sh} x - x)(\operatorname{ch} x - 1) &= 0, \\ f'(\operatorname{sh} x + x) + g'(\operatorname{sh} x - x) &= 0, \end{aligned}$$

которая есть следствие предыдущей и представляет собой (при любом фиксированном x) линейную систему алгебраических уравнений с неизвестными $f'(\operatorname{sh} x + x)$ и $g'(\operatorname{sh} x - x)$. Так как определитель системы отличен от нуля, то она имеет единственное решение $f'(\operatorname{sh} x + x) = g'(\operatorname{sh} x - x) = 0$. Отсюда следует, что предыдущая система имеет (при любом фиксированном значении константы C) единственное решение $f(\operatorname{sh} x + x) = C$, $g(\operatorname{sh} x - x) = -C$. Таким образом, при любых значениях x и C решение $v = f + g = C - C = 0$, т. е. $v_1 = v_2$.

8.122. Показать, что характеристика уравнения (8.19) — это линия, на которой могут иметь разрыв вторые производные решения $u(x, t)$ задачи Коши, т. е. решение $u(x, t)$ нельзя продолжить с характеристики на область Ω единственным образом.

8.123. Доказать, что решение задачи Коши для волнового уравнения

$$\begin{aligned} u_{tt} &= a^2 u_{xx}, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) &= u_0(x), \quad u_t(x, 0) = u_1 \end{aligned}$$

выражается формулой Даламбера

$$u(x, t) = \frac{u_0(x + at) + u_0(x - at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} u_1(\xi) d\xi.$$

8.124. При изучении свойств решений гиперболических уравнений вводится ряд понятий, которые в случае задачи Коши для волнового уравнения (см. задачу (8.123)) определяются следующим образом:

1) областью зависимости решения $u(x, t)$ в точке $M(x, t)$ называется множество точек оси Ox , такое что значения начальных условий в этих и только в этих точках определяют решение $u(x, t)$ в точке $M(x, t)$;

2) областью влияния отрезка $[A; B]$ оси Ox называется часть полуплоскости $t \geq 0$, вне которой решение $u(x, t)$ не изменится при изменении начальных данных на $[A; B]$;

3) областью определенности отрезка $[A; B]$ оси Ox называется часть полуплоскости $t \geq 0$, содержащая точки, области зависимости решения в которых принадлежат отрезку $[A; B]$.

Найти область зависимости решения в точке M , а также области влияния и определенности отрезка $[A; B]$ оси Ox , если:

$$1) u_0(x) = 0, u_1(x) \neq 0; \quad 2) u_0(x) \neq 0, u_1(x) = 0.$$

Решить задачи Коши 8.125–8.163.

8.125. $u_{tt} = a^2 u_{xx}, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t,$

$$u(x, 0) = u_0 \begin{cases} \cos \frac{\pi x}{2l}, & |x| < l, \\ 0, & |x| \geq l, \end{cases}$$

$$u_t(x, 0) = 0.$$

8.126. $u_{tt} = a^2 u_{xx}, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t,$

$$u(x, 0) = 0, \quad u_t(x, 0) = u_1 e^{-x^2}.$$

8.127. $u_{tt} = a^2 u_{xx} - 2\gamma u_t - \gamma^2 u, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t,$

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad u_t(x, 0) = u_1(x).$$

8.128. $7u_{xx} - 2u_{xy} - 5u_{yy} - 12u_x + 12u_y = 0;$

1) $L = \{x, y: y = x, x \in \mathbb{R}\},$

l — нормаль к L , $(l, \mathbf{e}_y) > 0$, $u|_L = 0$, $\frac{\partial u}{\partial l}|_L = -\sqrt{2} e^{2x};$

2) $L = \{x, y: y = -2x, x \in \mathbb{R}\},$

$l = \mathbf{e}_y - \mathbf{e}_x$, $u|_L = x e^{-x}$, $\frac{\partial u}{\partial l}|_L = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-x}.$

8.129. $3u_{xx} - u_{xy} - 2u_{yy} + 2\sqrt{3}u_x - \frac{1}{\sqrt{3}}u_y + u = 0,$

1) $u(0, y) = 3y^2$, $u_x(0, y) = -\sqrt{3}y^2;$

2) $L = \{x, y: y = \frac{x}{3}, x \in \mathbb{R}\}, \quad l$ — нормаль к L , $(l, \mathbf{e}_y) > 0,$

$u|_L = \sqrt{10} x^2 e^{-\frac{x}{\sqrt{3}}}, \quad \frac{\partial u}{\partial l}|_L = \left(\frac{x^2}{\sqrt{3}} + \frac{14x}{3} \right) e^{-\frac{x}{\sqrt{3}}}.$

8.130. $u_{xx} + 2u_{xy} - 8u_{yy} - 4u_x + 2u_y + 3u = 0;$

1) $L = \{x, y: y = 4x, x \in \mathbb{R}\},$

$\mathbf{l}$ — нормаль к L , $(\mathbf{l}, \mathbf{e}_y) > 0$, $u|_L = 9xe^{3x},$

$\frac{\partial u}{\partial l}|_L = -\frac{4}{\sqrt{17}}(3x+1)e^{3x};$

2) $L = \{x, y: y = -5x, x \in \mathbb{R}\},$

$\mathbf{l} = \mathbf{e}_x - 5\mathbf{e}_y$, $u|_L = 6x^2$, $\frac{\partial u}{\partial l}|_L = \frac{12x}{\sqrt{26}}.$

8.131. $u_{xx} - 2u_{xy} - 8u_{yy} - 2u_x - 10u_y - 3u = 0,$

$L = \{x, y: y = -x, x \in \mathbb{R}\},$

$\mathbf{l} = \mathbf{e}_y$, $u|_L = \operatorname{sh} 3xe^x$, $\frac{\partial u}{\partial l}|_L = -\frac{2}{3}\operatorname{sh} 3xe^x.$

8.132. $y u_{xx} + (x+y)u_{xy} + x u_{yy} + u_x + u_y = 0, 0 < x < y,$

$u(0, y) = 0, u_x(0, y) = y^7.$

8.133. $y u_{xx} + (x-y)u_{xy} - x u_{yy} - u_x + u_y = 0, x+y > 0,$

$u(x, 0) = x^6, u_y(x, 0) = 3x^5.$

8.134. $y u_{xx} + (x+y)u_{xy} + x u_{yy} + u_x + u_y = 0; y < x, x \in \mathbb{R},$

$u(0, y) = y^4, u_x(0, y) = -2y^3.$

8.135. $u_{xx} - y^2 u_{yy} - y u_y = 0, -\infty < x < \infty, 0 < y,$

$u(x, 1) = 0, u_y(x, 1) = 3x^2.$

8.136. $x^2 u_{xx} - y^2 u_{yy} + x u_x - y u_y = 0, 1 < x, 1 < y;$

1) $u(x, 1) = u_0(x), u_y(x, 1) = u_1(x);$

2) $u(x, 1) = \operatorname{ch} x, u_x(x, 1) = \sqrt{x}.$

8.137. $x u_{xx} - u_{yy} + \frac{1}{2} u_x = 0, 0 < x, y \in \mathbb{R},$

$u(x, 0) = 0, u_y(x, 0) = e^{-\sqrt{x}}.$

8.138. $x u_{xx} - y u_{yy} + \frac{1}{2}(u_x - u_y) = 0; 1 < x, 1 < y;$

1) $u(1, y) = 2 \cos \sqrt{y} e^{1-\sqrt{y}}, u_x(1, y) = \cos \sqrt{y} e^{1-\sqrt{y}};$

2) $u(x, 1) = e^{-\sqrt{x}}, u_y(x, 1) = 3x.$

8.139. $u_{xx} - \operatorname{sh}^2 x u_{yy} - \operatorname{cth} x u_x = 0, x > 0, y \in \mathbb{R},$

$u(x, 0) = 1 + 2 \operatorname{sh}(\operatorname{ch} x), u_y(x, 0) = 2 \operatorname{sh}(\operatorname{ch} x).$

- 8.140.** $\operatorname{sh} y u_{xx} + \operatorname{sh} 2y u_{xy} + \operatorname{sh} y u_{yy} - u_x - \operatorname{ch} y u_y = 0$, $x \in \mathbb{R}$, $y > 0$;
 1) $L = \{x, y: x = \operatorname{ch} y, y > 0\}$, $\mathbf{l}$ — нормаль к L , $(\mathbf{l}, \mathbf{e}_y) > 0$,
 $u|_L = 1 - e^{-x}$, $\left. \frac{\partial u}{\partial l} \right|_L = \operatorname{sh} y + \frac{1}{\operatorname{sh} y}$,
 2) $L = \{x, y: x = \operatorname{sh} y, y > 0\}$, $\mathbf{l} = \mathbf{e}_x$,
 $u|_L = 2 \operatorname{sh} 2y$, $\left. \frac{\partial u}{\partial l} \right|_L = 2 \operatorname{ch} y$.
- 8.141.** $\operatorname{ch} x u_{xx} + \operatorname{sh} 2x u_{xy} - \operatorname{ch} x u_{yy} - \operatorname{sh} x u_x + u_y = 0$,
 $L = \{x, y: y = \operatorname{ch} x, x \in \mathbb{R}\}$, $\mathbf{l}$ — нормаль к L , $(\mathbf{l}, \mathbf{e}_y) > 0$,
 $u|_L = 1$, $\left. \frac{\partial u}{\partial n} \right|_L = \operatorname{sh} 2x$.
- 8.142.** $x^2 u_{xx} - u_{yy} + 3x u_x + 2u_y = 0$, $0 < x$, $-\infty < y < \infty$,
 $u(1, y) = y^2$, $u_x(1, y) = 2y$.
- 8.143.** $u_{xx} - 2 \cos x u_{xy} - \sin^2 x u_{yy} - u_x + (1 + \sin x + \cos x) u_y = 0$,
 $u(0, y) = e^y$, $u_x(0, y) = e^y$.
- 8.144.** $x u_{xx} - y u_{yy} + \left(\sqrt{x} + \frac{1}{2}\right) u_x + \left(\sqrt{y} - \frac{1}{2}\right) u_y = 0$, $0 < x$, $0 < y$;
 1) $u(1, y) = \operatorname{sh} \sqrt{y}$, $u_x(1, y) = 0$;
 2) $L = \{x, y: y = 4x, 0 < x\}$,
 $\mathbf{l} = -\mathbf{e}_x + 2\mathbf{e}_y$, $u|_L = e^{4\sqrt{x}} \operatorname{sh} 3\sqrt{x}$, $\left. \frac{\partial u}{\partial l} \right|_L = \frac{e^{4\sqrt{x}} \operatorname{sh} 3\sqrt{x}}{5\sqrt{x}}$.
- 8.145.** $x u_{xx} + (x + y) u_{xy} + y u_{yy} = 0$, $0 < x < y$,
 $u(0, y) = -y$, $u_x(0, y) = 1$.
- 8.146.** $x^2 u_{xx} - y^2 u_{yy} = 0$, $0 < x$, $y < 0$,
 $L = \{x, y: yx = -1, 0 < x\}$,
 $\mathbf{l} = \mathbf{e}_y$, $u|_L = x^2 + 1$, $\left. \frac{\partial u}{\partial l} \right|_L = \frac{x(x^2 + 1)}{2}$.
- 8.147.** $x u_{xx} + (x - y) u_{xy} - x u_{yy} - \frac{3}{2}(u_x - u_y) = 0$,
 $-x < y < x$, $x > 0$, $u(x, 0) = 2x\sqrt{x}$, $u_y(x, 0) = 2\sqrt{x}$.
- 8.148.** $x u_{xx} - u_{yy} + \frac{1}{2} u_x + 4u_y - 4u = 0$, $0 < x$, $y \in \mathbb{R}$,
 $u(x, 0) = 4x$, $u_y(x, 0) = 8x$.

- 8.149.** $u_{xx} - u_{yy} + xu_x - yu_y + \frac{x^2 - y^2}{4}u = 0$,
 $L = \{x, y: y = \sqrt{3}x, x \in \mathbb{R}\}$, $\mathbf{l}$ — нормаль к L , $(\mathbf{l}, \mathbf{e}_x) < 0$,
 $u|_L = xe^{-x^2}$, $\frac{\partial u}{\partial l}|_L = -\frac{1}{2}(1 - x^2)e^{-x^2}$.
- 8.150.** $xu_{xx} - u_{yy} - \frac{1}{2}u_x = 0$, $x > 0$, $y \in \mathbb{R}$,
 $u(x, 0) = 4x$, $u_y(x, 0) = 1$.
- 8.151.** $2 \operatorname{sh} y u_{xy} - \sqrt{\operatorname{ch} y} u_{yy} - \operatorname{sh} y \operatorname{th} y u_x + \sqrt{\operatorname{ch} y} \operatorname{cth} y u_y = 0$,
 $x \in \mathbb{R}$, $y > 0$, $u(0, y) = 8 \operatorname{ch} y$, $u_x(0, y) = 8\sqrt{\operatorname{ch} y}$.
- 8.152.** $yu_{xx} + 2xu_{xy} + yu_{yy} - \frac{yu_x + xu_y}{\sqrt{x^2 - y^2}} = 0$, $|y| < x$, $x \in \mathbb{R}$,
 $L = \{x, y: x = \sqrt{y^2 + 4}, x > 2\}$,
 $u|_L = 4(3x - 2)$, $u_x|_L = 6(x^2 - x + 2)$.
- 8.153.** $xu_{xx} - u_{yy} + \frac{3}{2}u_x = 0$, $1 < x$, $y \in \mathbb{R}$,
 $u(1, y) = 4 + y^2$, $u_x(1, y) = \frac{1}{2}(4 - y^2)$.
- 8.154.** $yu_{xx} + 2xu_{xy} + yu_{yy} - u_y = 0$, $x > |y|$, $y \in \mathbb{R}$;
 1) $L = \{x, y: y^2 = 4(x - 1), 1 < x < 2\}$,
 $\mathbf{l}$ — нормаль к L , $(\mathbf{l}, \mathbf{e}_x) < 0$,
 $u|_L = 2x\left(2x - 2 - \frac{x^2}{3}\right)$, $\frac{\partial u}{\partial l}|_L = \frac{2(3x^2 - 4x + 2)}{\sqrt{x}}$;
 2) $L = \{x, y: x^2 + y^2 = 2, 1 < x < \sqrt{2}\}$,
 $\mathbf{l} = x\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y$, $u|_L = \sqrt{2}x(x^2 - 1)^{\frac{3}{2}}$, $\frac{\partial u}{\partial l}|_L = 4x(x^2 - 1)^{\frac{3}{2}}$;
 3) $L = \{x, y: y = 0, 0 < x\}$,
 $\mathbf{l} = \mathbf{e}_x + 3\sqrt{7}\mathbf{e}_y$, $u|_L = 8x^4$, $\frac{\partial u}{\partial l}|_L = 4x^3$.
- 8.155.** $yu_{xx} + 2xu_{xy} + yu_{yy} + 3u_y = 0$, $x > |y|$, $y \in \mathbb{R}$,
 $L = \{x, y: y = 0, 0 < x\}$,
 $\mathbf{l} = \mathbf{e}_x + \sqrt{3}\mathbf{e}_y$, $u|_L = e^{2x}$, $\frac{\partial u}{\partial l}|_L = e^{2x}$.
- 8.156.** $xu_{xx} + 2yu_{xy} + xu_{yy} + \left(4 - \frac{y}{\sqrt{y^2 - x^2}}\right)u_x - \frac{xu_y}{\sqrt{y^2 - x^2}} = 0$,
 $y > |x|$, $x \in \mathbb{R}$, $L = \{x, y: x = \sqrt{y^2 + 1}, 0 < y\}$, $\mathbf{l} = \mathbf{e}_y$,
 $u|_L = -3y^2 + 2y - 1$, $\frac{\partial u}{\partial l}|_L = 2(y^2 - 4y + 1)$.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{8.157.} \quad & yu_{xx} + 2xu_{xy} + yu_{yy} - \frac{yu_x}{\sqrt{x^2 - y^2}} + \\
 & + \left(1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 - y^2}}\right)u_y + \frac{3u}{4\sqrt{x^2 - y^2}} = 0, \quad x > |y|, \quad y \in \mathbb{R}, \\
 & L = \{x, y: x = \sqrt{y^2 + 1}, x > 0\}, \quad \mathbf{l} - \text{нормаль к } L, \quad (\mathbf{l}, \mathbf{e}_x) > 0, \\
 & u|_L = 1, \quad \frac{\partial u}{\partial l}|_L = \frac{3}{2}\sqrt{2y^2 + 1}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{8.158.} \quad & u_{xx} - \operatorname{sh}^2 xu_{yy} - \operatorname{cth} xu_x - 2\operatorname{th}^2 xu = 0, \\
 & x > 0, \quad y \in \mathbb{R} u(x, 0) = 1, \quad u_y(x, 0) = 3 \operatorname{ch} x.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{8.159.} \quad & xu_{xx} + 2yu_{xy} + xu_{yy} - \left(2 + \frac{y}{\sqrt{y^2 - x^2}}\right)u_x - \frac{xu_y}{\sqrt{y^2 - x^2}} = 0, \\
 & y > |x|, \quad x \in \mathbb{R}; \\
 & 1) L = \{x, y: y = \sqrt{x^2 + 1}, x \in \mathbb{R}\}, \\
 & \quad \mathbf{l} = \mathbf{e}_y, \quad u|_L = 3y^2 + 2y, \quad \frac{\partial u}{\partial l}|_L = 2(y + 1)^2; \\
 & 2) L = \{x, y: y = \sqrt{x^2 + 4}, x \in \mathbb{R}\}, \\
 & \quad \mathbf{l} = \mathbf{e}_y, \quad u|_L = 2\frac{\partial u}{\partial l}|_L = (y + 2)(y + 2)^2.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{8.160.} \quad & xu_{xx} - x^2u_{yy} + \frac{1}{3}u_y = 0, \quad x > 0, \quad y \in \mathbb{R}; \\
 & 1) u(0, y) = 7, \quad u_x(0, y) = y; \quad 2) u(0, y) = 3, \quad u_x(0, y) = y^2.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{8.161.} \quad & u_{xx} - 4yu_{yy} + \frac{5u}{4y} = 0, \quad y > 0, \quad x \in \mathbb{R}; \\
 & 1) L = \{x, y: x^2 + y^2 = 1, y > 0\}, \\
 & \quad \mathbf{l} - \text{нормаль к } L, \quad (\mathbf{l}, \mathbf{e}_y) > 0, \\
 & \quad u|_L = 4y^{\frac{5}{4}}\sqrt{1 - y^2}, \quad \frac{\partial u}{\partial l}|_L = 9y^{\frac{5}{4}}\sqrt{1 - y^2}; \\
 & 2) L = \{x, y: x = 0, y > 0\}, \\
 & \quad \mathbf{l} = \sqrt{65}\mathbf{e}_x + 4\mathbf{e}_y, \quad u|_L = y^{\frac{9}{4}}, \quad \frac{\partial u}{\partial l}|_L = y^{\frac{5}{4}}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{8.162.} \quad & 4xu_{xx} - u_{yy} + \frac{3u}{4x} = 0, \quad x > 0, \quad y \in \mathbb{R}, \\
 & L = \{x, y: x = 1, y \in \mathbb{R}\}, \\
 & \mathbf{l} = 2\mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y, \quad u|_L = y^2, \quad \frac{\partial u}{\partial l}|_L = \frac{2}{\sqrt{5}}\left(\frac{1}{2}y + 1\right)^2.
 \end{aligned}$$

8.163. $\text{sh}^2 y u_{xx} - u_{yy} - u_x + \text{cth} y u_y + 2 \text{th}^2 y u = 0$, $x \in \mathbb{R}$, $y > 0$,
 $L = \{x, y: x = \text{ch } y, y > 0\}$, l — нормаль к L , $(1, \mathbf{e}_y) > 0$,
 $u|_L = 2 \text{ch}^2 y$, $\left. \frac{\partial u}{\partial l} \right|_L = 4 \text{sh}^2 y$.

8.164. Решить задачу
 $xu_{xx} - xu_{yy} + \frac{3}{4}u_x + \frac{1}{4}u_y = 0$, $x > 0$, $y \in \mathbb{R}$,
 $u(0, y) = y^2$, $\lim_{x \rightarrow 0} x^{\frac{3}{4}} u_x = y$.

8.165. Решить задачу
 $4xe^{-2y^2} u_{xx} - \pi u_{yy} + \frac{8}{3}e^{-2y^2} u_x - 2\pi y u_y = 0$, $x > 0$, $y \in \mathbb{R}$,
 $u(0, y) = \text{erf } y$, $\lim_{x \rightarrow 0} x^{\frac{2}{3}} u_x = 1$.

Пример 8.6. Решить задачу Коши для неоднородного волнового уравнения

$$u_{tt} = a^2 u_{xx} + f(x, t), \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = 0, \quad u_t(x, 0) = 0.$$

В переменных $\sigma = x + at$, $\theta = x - at$ задача Коши имеет вид

$$u_{\sigma\theta} = -\frac{1}{4a^2} f\left(\frac{\sigma + \theta}{2}, \frac{\sigma - \theta}{2a}\right), \quad -\infty < \theta < \sigma < \infty,$$

$$u(\sigma, \sigma) = 0, \tag{8.20}$$

$$u_{\sigma}(\sigma, \sigma) - u_{\theta}(\sigma, \sigma) = 0. \tag{8.21}$$

После интегрирования уравнения по θ от θ до σ получается выражение

$$u_{\sigma}(\sigma, \sigma) - u_{\sigma}(\sigma, \theta) = -\frac{1}{4a^2} \int_{\theta}^{\sigma} f\left(\frac{\sigma + \beta}{2}, \frac{\sigma - \beta}{2a}\right) d\beta. \tag{8.22}$$

Если $\theta = \theta(\sigma)$, то $\frac{du}{d\sigma} = u_{\sigma} + u_{\theta} \frac{d\theta}{d\sigma}$. При $\sigma = \theta$ в силу (8.21)

$$\frac{du(\sigma, \sigma)}{d\sigma} = u_{\sigma}(\sigma, \sigma) + u_{\theta}(\sigma, \sigma) = 2 u_{\sigma}(\sigma, \sigma).$$

С учетом этого соотношения и условия (8.20) интегрирование уравнения (8.22) по σ от θ до σ приводит к решению задачи

Коши в форме

$$u(\sigma, \theta) = \frac{1}{4a^2} \int_{\theta}^{\sigma} d\alpha \int_{\theta}^{\sigma} f\left(\frac{\alpha + \beta}{2}, \frac{\alpha - \beta}{2a}\right) d\beta.$$

Естественно сделать замену $\alpha + \beta = 2\xi$, $\alpha - \beta = 2a\tau$ и вернуться к старым переменным, тогда

$$u(x, t) = \frac{1}{2a} \int_0^t d\tau \int_{x-a(t-\tau)}^{x+a(t-\tau)} f(\xi, \tau) d\xi. \quad (8.23)$$

8.166. На бесконечную струну ($-\infty < x < \infty$) с момента времени $t = 0$ до $t = t_0 > 0$ действует сила $F(t) \mathbf{e}_u$, приложенная в точке $x = 0$. Решить задачу о движении струны при нулевых начальных условиях, если $F(t) = F_0$. Начертить профиль струны в моменты времени $0 < t_1 < t_0$ и $t_2 > t_0$. Найти закон движения точки $x = 0$ и построить соответствующий график.

8.167. Решить предыдущую задачу для $F(t) = F_0 \sin \omega t$, $t_0 = 2\pi/\omega$, $t_1 = \frac{\pi}{\omega}$, $t_2 = \frac{3\pi}{\omega}$.

8.168. К неограниченной струне ($-\infty < x < \infty$) с момента времени $t = 0$ приложена сосредоточенная сила $F(t) \mathbf{e}_u$, движущаяся вдоль струны по закону $x = v_0 t$, $0 < v_0 \ll a$. Решить задачу о движении струны при нулевых начальных условиях.

8.169. Решить задачу 8.168 для $F(t) = F_0 e^{-\alpha t}$, $\alpha > 0$. Начертить профиль струны в момент времени $t_0 > 0$. Найти закон движения точек струны с координатами $x_0 > 0$ и $x_0 < 0$.

8.170. Решить задачу 8.168 для $F(t) = F_0 \sin \omega t$. Найти частоты ω_1 и ω_2 колебаний точек струны, находящихся перед источником колебаний и за ним (эффект Допплера).

8.171. Трубка ($-\infty < x < \infty$) заполнена идеальным газом, давление и плотность которого P_0 и ρ_0 соответственно. С момента времени $t = 0$ в трубке начинает действовать плоский источник того же газа мощности $q(t)$ на единицу площади, движущийся по закону $x = v_0 t$, $0 < v_0 \ll a$. Определить в акустическом приближении потенциал скоростей газа.

Пример 8.7. Решение смешанной задачи для гиперболического уравнения. К концу полуограниченного стержня ($0 < x$)

прикреплена пружинка с коэффициентом жесткости k . С момента $t = 0$ свободный конец пружинки движется вдоль оси Ox по закону $\mu(t)$. Решить задачу о движении стержня при нулевых начальных условиях. Постановка задачи:

$$\begin{aligned} u_{tt} &= a^2 u_{xx}, \quad 0 < x, \quad 0 < t, \\ ESu_x(0, t) - k[u(0, t) - \mu(t)] &= 0, \\ u(x, 0) &= u_t(x, 0) = 0. \end{aligned}$$

Общее решение $u(x, t) = f(x + at) + g(x - at)$ волнового уравнения (задача 8.123) содержит две произвольные функции, которые надо выбрать так, чтобы при $x \geq 0$,

$$\begin{cases} f(x) + g(x) = 0, \\ af'(x) - ag'(x) = 0, \end{cases}$$

$$f'(at) + g'(-at) - \frac{\beta}{a}[f(at) + g(-at)] - \frac{\beta}{a}\mu(t) = 0, \quad t > 0, \quad \beta = \frac{k}{S\sqrt{E\rho}}.$$

Из первых двух уравнений следует, что $f(x) = -g(x) = C$ при $x \geq 0$. Для $x < 0$ функция $g(x)$ определяется из третьего уравнения

$$g'(x) - \frac{\beta}{a}g(x) = \frac{\beta}{a}C - \frac{\beta}{a}\mu\left(-\frac{x}{a}\right), \quad x < 0,$$

при условии $g(0) = -C$, которое вытекает из непрерывности $g(x)$ в нуле. Отсюда

$$g(x) = \beta e^{\frac{\beta x}{a}} \int_0^{-\frac{x}{a}} \mu(\tau) e^{\beta\tau} d\tau - C, \quad x \leq 0.$$

Следовательно,

$$u(x, t) = \beta e^{-\beta(t-\frac{x}{a})} \int_0^{t-\frac{x}{a}} \mu(\tau) e^{\beta\tau} d\tau \cdot \eta\left(t - \frac{x}{a}\right).$$

8.172. Полуограниченная трубка ($0 < x$) заполнена идеальным газом, давление и плотность которого P_0 и ρ_0 соответственно. Конец трубки закрыт поршнем, который начинает двигаться с момента времени $t = 0$ по закону $u_0 \sin \omega t$. Определить в акустическом приближении потенциал скоростей газа.

8.173. Найти потенциал полубесконечной линии ($0 < x$) без искажения ($RC = LG$), к концу которой в момент времени $t = 0$ подключается батарея с э.д.с. $E(t)$.

8.174. На конце полуограниченной линии ($0 < x$) без искажения ($RC = LG$) находится конденсатор C_0 , заряд которого Q_0 . В момент времени $t = 0$ конец линии заземляется. Определить зависимость от времени заряда конденсатора.

8.175. Полуограниченный круглый вал ($0 < x$) не деформирован и находится в покое. С момента времени $t = 0$ на торец $x = 0$ действует момент сил $M(t)$. Решить задачу о движении вала.

8.176. Торец вала ($0 < x$) упруго закреплен посредством спиральной пружины с коэффициентом жесткости k ; свободный конец пружины совершает крутильные (относительно оси вала) колебания по закону $u_0 \sin \omega t$. Решить задачу о движении вала при нулевых начальных условиях.

8.177. Точечная масса M , движущаяся со скоростью v вдоль оси Ox , ударяет в торец полуограниченного цилиндрического стержня ($0 < x$), находящегося в статическом равновесии. Решить задачу о движении стержня. Определить скорость массы M . Произойдет ли ее отрыв от стержня?

8.178. По полуограниченному стержню ($0 < x$) распространяется волна $f(x + at)$. При каком условии отсутствует отраженная волна, если на торец $x = 0$ действует сила сопротивления, пропорциональная скорости (коэффициент пропорциональности на единицу площади поперечного сечения стержня равен α)?

8.179. На конце полуограниченного стержня ($0 < x$) находится тонкая пластинка, масса которой M ; к пластинке прикреплена пружинка с коэффициентом жесткости k , расположенная вдоль оси Ox . Свободный конец пружинки движется по закону $\mu(t)\eta(t)\mathbf{e}_x$. Решить задачу о движении стержня при нулевых начальных условиях.

Найти непрерывные в области $\overline{\Omega} = \{x, t: 0 \leq x, 0 \leq t\}$ решения смешанных задач 8.180–8.238.

8.180. $u_{tt} = u_{xx} + \sin x, \quad 0 < x, 0 < t,$
 $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0, \quad u(0, t) = 1 - e^{-t} \sin t.$

8.181. $u_{tt} = u_{xx} + \cos x, \quad 0 < x, 0 < t,$
 $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0, \quad u(0, t) = \sin t.$

8.182. $u_{tt} = u_{xx} - e^{-t}, \quad 0 < x, 0 < t,$
 $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0, \quad u(0, t) = 1 - \cos t.$

- 8.183.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$, $u_x(0, t) = \cos t$.
- 8.184.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$, $u_x(0, t) = te^{-t}$.
- 8.185.** $u_{tt} = u_{xx} + \cos x$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$, $u_x(0, t) = \sin t$.
- 8.186.** $u_{tt} = u_{xx} + e^{-t}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$, $u_x(0, t) = e^{-t}$.
- 8.187.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 0$, $u_t(x, 0) = \sin x$, $u_t(0, t) = \sin t$.
- 8.188.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$, $u_x(0, t) - u(0, t) = 1$.
- 8.189.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 0$, $u_t(x, 0) = \sin x$, $u_x(0, t) - u(0, t) = \cos t$.
- 8.190.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \cos x$, $u_t(x, 0) = 0$, $u_x(0, t) + 2u_t(0, t) = 0$.
- 8.191.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \sin x$, $u_t(x, 0) = \cos x$, $u(0, t) = \sin t$.
- 8.192.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \sin x$, $u_t(x, 0) = -\cos x$, $u(0, t) = \sin t$.
- 8.193.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \eta(\pi - x) \sin x$, $u_t(x, 0) = u(0, t) = 0$.
- Физическая интерпретация задачи: движение полуограниченной струны с закрепленным концом. 1) Найти закон движения точки $x = \frac{\pi}{2}$ при $t > \frac{3\pi}{2}$; 2) какова форма участка $(0, 17\pi)$ струны при $t > 18\pi$?
- 8.194.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 0$, $u_t(x, 0) = \frac{1}{1+x^2}$, $u(0, t) = t^3$.
- 8.195.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 0$, $u_t(x, 0) = \frac{2x}{1+x^4}$, $u(0, t) = te^{-t}$.

- 8.196.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 0$, $u_t(x, 0) = \frac{1}{1+x}$, $u(0, t) = e^{-t} \operatorname{sh} t$.
- 8.197.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \operatorname{ch} x \sin x$, $u_t(x, 0) = \operatorname{ch} x \sin x + \operatorname{sh} x \cos x$,
 $u(0, t) = te^{-t}$.
- 8.198.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = e^{-x} \sin x$, $u_t(x, 0) = e^{-x}(\cos x - \sin x)$,
 $u(0, t) = -e^{-t} \sin t$.
- 8.199.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 0$, $u_t(x, 0) = J_1(x)$, $u(0, t) = 1 - e^{-t}$.
- 8.200.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = J_0(x)$, $u_t(x, 0) = J_1(x)$, $u(0, t) = \cos t$.
- 8.201.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 1 - \cos x$, $u_t(x, 0) = \sin x$, $u(0, t) = J_1(t)$.
- 8.202.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 0$, $u_t(x, 0) = x^2 Y_1(x)$, $u(0, t) = tY_0(t)$.
- 8.203.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = e^{-x} I_1(x)$, $u_t(x, 0) = 0$, $u(0, t) = tK_0(t)$.
- 8.204.** $u_{tt} = u_{xx} - 1$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \frac{1}{2}x^2$, $u_t(x, 0) = 2x + 1$, $u(0, t) = te^{-t}$.
- 8.205.** $u_{tt} = u_{xx} - xt$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$, $u(0, t) = t^2$.
- 8.206.** $u_{tt} = u_{xx} + 2 \sin(x - t)$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 0$, $u_t(x, 0) = \frac{1}{2}x \sin x$, $u(0, t) = 0$.
- 8.207.** $u_{tt} = u_{xx} + 4 \operatorname{ch} x \sin t$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 0$, $u_t(x, 0) = -x \operatorname{sh} x$, $u(0, t) = t \operatorname{ch} t$.
- 8.208.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \sin x$, $u_t(x, 0) = 0$, $u_x(0, t) = \sin t$.
- 8.209.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \sin x$, $u_t(x, 0) = \cos x$, $u_x(0, t) = 2 \cos t$.

$$8.210. \quad u_{tt} = u_{xx}, \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = 0, \quad u_t(x, 0) = \eta \left(\frac{\pi}{2} - x \right) \cos x, \quad u_x(0, t) = 0.$$

Физическая интерпретация задачи: движение полуограниченной струны со свободным концом. 1) Найти закон движения точки $x = 0$ при $t > \frac{\pi}{2}$; 2) какова форма участка $(0, 10\pi)$ струны при $t > \frac{21\pi}{2}$?

$$8.211. \quad u_{tt} = u_{xx}, \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = xY_1(x), \quad u_t(x, 0) = xY_0(x), \quad u_x(0, t) = \frac{1}{1+t^2}.$$

$$8.212. \quad u_{tt} = u_{xx}, \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = 0, \quad u_t(x, 0) = J_1(x), \quad u_x(0, t) = J_1(t).$$

$$8.213. \quad u_{tt} = u_{xx}, \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = xY_0(x), \quad u_t(x, 0) = 0, \quad u_x(0, t) = tK_0(t).$$

$$8.214. \quad u_{tt} = u_{xx} + xe^{-t}, \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = x, \quad u_t(x, 0) = 0, \quad u_x(0, t) = \sin t.$$

$$8.215. \quad u_{tt} = u_{xx} + 2u_x + u, \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = e^{-\frac{x}{2}}, \quad u_t(x, 0) = 0, \quad u_x(0, t) = \frac{1}{12}e^{-\frac{t}{2}}.$$

$$8.216. \quad u_{tt} = u_{xx} + \frac{2}{\sqrt{\pi}}e^{-x^2}, \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = x \operatorname{erf} x, \quad u_t(x, 0) = u_x(0, t) = 0.$$

$$8.217. \quad u_{tt} = u_{xx} + 2u_x - u, \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = e^{-x}, \quad u_t(x, 0) = -e^{-x}, \quad u_x(0, t) = e^{-t}.$$

$$8.218. \quad u_{tt} = u_{xx} + te^{-x}, \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = e^{-x}, \quad u_t(x, 0) = 0, \quad u_x(0, t) = \operatorname{erf} t.$$

$$8.219. \quad u_{tt} = u_{xx} - \frac{4x}{\sqrt{\pi}}e^{-x^2}, \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = \operatorname{erf} x, \quad u_t(x, 0) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}e^{-x^2}, \quad u_x(0, t) = 0.$$

$$8.220. \quad u_{tt} = u_{xx} + x[J_0(x) + xJ_1(x)], \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0, \quad u_x(0, t) = J_1(t).$$

$$8.221. \quad u_{tt} = u_{xx} + x + t, \quad 0 < x, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = x, \quad u_t(x, 0) = 0, \quad u_x(0, t) = t.$$

- 8.222.** $u_{tt} = u_{xx} + t \sin x$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \cos x$, $u_t(x, 0) = 1$, $u_x(0, t) = -\sin t$.
- 8.223.** $u_{tt} = u_{xx} + \operatorname{sh} x$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \operatorname{ch} x$, $u_t(x, 0) = 0$, $u_x(0, t) = \operatorname{sh} t$.
- 8.224.** $u_{tt} = u_{xx} + 2 \sin x \cos t$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$, $u_x(0, t) = -\cos t$.
- 8.225.** $u_{tt} = u_{xx} + u_x + u_t$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 0$, $u_t(x, 0) = e^{-x}$, $u_x(0, t) = e^{-t}$.
- 8.226.** $u_{tt} = u_{xx} + x[xK_0(x) - K_1(x)]$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$, $u_x(0, t) = t^2 K_1(t)$.
- 8.227.** $u_{tt} = u_{xx}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \sin x$, $u_t(x, 0) = \cos x$, $u_x(0, t) - u(0, t) = \sin t$.
- 8.228.** $u_{tt} = u_{xx} + \frac{4x}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \operatorname{erf} x$, $u_t(x, 0) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2}$, $u_x(0, t) - u(0, t) = -\operatorname{erf} t$.
- 8.229.** $u_{tt} = u_{xx} - 4e^{x-t}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = xe^x$, $u_t(x, 0) = -xe^x$, $2u_x(0, t) - u(0, t) = te^{-t}$.
- 8.230.** $u_{tt} = u_{xx} + \cos t \operatorname{sh} x$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 0$, $u_t(x, 0) = \frac{1}{2} \operatorname{sh} x$, $u_x(0, t) - u(0, t) = \frac{1}{2} \cos t$.
- 8.231.** $u_{tt} = u_{xx} + e^{-x-t}$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 0$, $u_t(x, 0) = -\frac{1}{2}xe^{-x}$, $u_t(0, t) + u(0, t) = -\frac{1}{4}e^{-t}$.
- 8.232.** $u_{tt} = u_{xx} + 4xt$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$, $u_t(0, t) + 24u(0, t) = t^4$.
- 8.233.** $u_{tt} = u_{xx} + 2 \sin x$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = x$, $u_t(x, 0) = -1$, $u_t(0, t) + u(0, t) = \sin t$.
- 8.234.** $u_{tt} = u_{xx} + 2e^{-t} \sin x$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \sin x$, $u_t(x, 0) = x + \sin x$, $2u_x(0, t) - u_t(0, t) = 2e^{-t}$.
- 8.235.** $u_{tt} = u_{xx} - x \sin t$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 0$, $u_t(x, 0) = x + \sin x$, $4u_x(0, t) - 3u_t(0, t) = 4 \sin t$.

8.236. $u_{tt} = u_{xx} + 4 \operatorname{ch}(x+t)$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = 1$, $u_t(x, 0) = -x \operatorname{ch} x$, $3u_x(0, t) - 2u_t(0, t) = t \operatorname{ch} t$.

8.237. $u_{tt} = u_{xx} + 2 \sin 2(x+t)$, $0 < x$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = \frac{1}{2}x \cos 2x$, $u_t(x, 0) = -\frac{1}{4} \cos 2x$,
 $u_x(0, t) - u_t(0, t) = \cos 2t$.

8.238. $(H-x)^2 u_{tt} = a^2 \frac{\partial}{\partial x} (H-x)^2 \frac{\partial u}{\partial x}$, $-\infty < x < H$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_0(x)$, $u_t(x, 0) = u_1(x)$, $|u(H, t)| < \infty$.

8.239. Решить следующую задачу Коши в $\mathbb{R}^3$:

$$u_{tt} = a^2 \Delta u, \quad u|_{t=0} = u_0(r), \quad u_t|_{t=0} = u_1(r).$$

Рассмотреть случай $u_0(r) = u_0 e^{-\alpha r}$, $u_1(r) = 0$.

8.240. По неоднородной струне $(-\infty < x < \infty)$, плотность которой

$$\rho(x) = \begin{cases} \rho_1, & x < 0, \\ \rho_2, & 0 < x, \end{cases}$$

распространяется волна $f\left(t - \frac{x}{a}\right)$. Найти отраженную и прошедшую волны.

8.241. Длинная трубка, площадь поперечного сечения которой равна S_1 при $x < 0$ и S_2 при $0 < x$, заполнена идеальным газом. По трубке распространяется звуковая волна $f(x+at)$. Определить в акустическом приближении коэффициент отражения звука (отношение потоков энергии в отраженной и прошедшей волнах) при прохождении волны через сечение $x = 0$.

8.242. Идеальная несжимаемая жидкость заполняет неограниченный канал $(-\infty < x < \infty)$ с прямоугольным поперечным сечением; ширина и глубина канала равны, соответственно, b_1 и h_1 при $x < 0$, b_2 и h_2 при $x > 0$. Вдоль канала распространяется длинная гравитационная волна, при движении которой поверхность жидкости принимает форму $\zeta(x, t) = f\left(t - \frac{x}{c_1}\right)$, где $c_1 = \sqrt{gh_1}$ (задача 1.325, т. 1). Определить коэффициент отражения волны при прохождении через сечение $x = 0$.

8.243. В точке $x = 0$ неограниченной струны $(-\infty < x < \infty)$ находится шарик, масса которого M . По струне распространяется волна $f(x+at)$. Найти закон движения шарика.

8.244. В сечении $x=0$ неограниченного стержню $(-\infty < x < \infty)$ находится тонкая прокладка, масса которой M . Вдоль стержня распространяется волна $f(x+at)$. Решить задачу о движении стержня.

8.245. В точке $x=0$ неограниченной струны $(-\infty < x < \infty)$ находится шарик, масса которого M . В момент времени $t=0$ шарик получает ударный импульс $I\mathbf{e}_u$. Решить задачу о движении струны, если на шарик действует сила сопротивления, пропорциональная его скорости (коэффициент пропорциональности α задан); до удара смещения и скорости точек струны равны нулю.

8.246. В покоящемся идеальном газе находится сфера, радиус которой r_0 ; поверхность сферы совершает малые радиальные колебания со скоростью $V_0 \sin \omega t \cdot \eta(t)$. Найти в акустическом приближении потенциал скоростей газа.

Пример 8.8. Решить задачу о движении струны $(0 < x < l)$ с закрепленными концами, начальная скорость которой равна нулю, а начальная форма $u(x, 0) = u_0(x)$, где $u_0(0) = u_0(l) = 0$, $u_0(x)$ — функция класса $C^2[0; l]$.

Функция $u(x, t)$ удовлетворяет уравнениям

$$\begin{aligned} u_{tt} &= a^2 u_{xx}, \quad 0 < x < l, \quad 0 < t, \\ u(0, t) &= u(l, t) = 0, \\ u(x, 0) &= u_0(x), \quad u_t(x, 0) = 0 \end{aligned} \quad (8.24)$$

и может быть представлена в виде (см. задачу 8.123)

$$u(x, t) = f_1(x - at) + f_2(x + at), \quad f_{1,2} \in C^2. \quad (8.25)$$

Начальные условия порождают систему уравнений

$$\begin{aligned} f_1(x) + f_2(x) &= u_0(x) \\ f'_1(x) - f'_2(x) &= 0, \quad 0 \leq x \leq l, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} f_1(x) + f_2(x) &= u_0(x) \\ f_1(x) - f_2(x) &= 0, \quad 0 \leq x \leq l, \end{aligned} \quad (8.26)$$

где константа интегрирования, не влияющая на результат, принята равной нулю. Решение системы (8.26)

$$f_1(x) = f_2(x) = \frac{1}{2} u_0(x), \quad 0 \leq x \leq l. \quad (8.27)$$

Следует заметить, что функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$ пока определены лишь для $x \in [0; l]$, тогда как их аргументы $x - at$ и $x + at$ принимают любые вещественные значения.

Для определения функций $f_1(x)$ и $f_2(x)$ на всей числовой оси добавляются граничные условия

$$\begin{aligned} f_1(-at) + f_2(at) &= 0, \\ f_1(l - at) - f_2(l + at) &= 0, \end{aligned}$$

или

$$f_1(x) + f_2(x) = 0, \quad (8.28)$$

$$f_1(l - x) - f_2(l + x) = 0. \quad (8.29)$$

Действительно, если $-l \leq x \leq 0$, то $0 \leq -x \leq l$ и согласно (8.28), (8.27)

$$\begin{aligned} f_1(x) &= -f_2(-x) = -\frac{u_0(-x)}{2}, \\ f_2(x) &= -f_1(-x) = -\frac{u_0(-x)}{2}. \end{aligned}$$

Пусть

$$\tilde{u}_0(x) = \begin{cases} u_0(x), & 0 \leq x \leq l, \\ -u_0(-x), & -l \leq x \leq 0, \end{cases}$$

тогда

$$f_1(x) = f_2(x) = \frac{1}{2}\tilde{u}_0(x), \quad |x| \leq l. \quad (8.30)$$

Если $l \leq x \leq 3l$, то $-l \leq 2l - x \leq l$ и вследствие (8.29)

$$\begin{aligned} f_1(x) &= -f_2(l - x) = -\frac{1}{2}\tilde{u}_0(2l - x), \\ f_2(x) &= -f_1(l - x) = -\frac{1}{2}\tilde{u}_0(2l - x), \end{aligned}$$

так что

$$f_1(x) = f_2(x) = -\frac{1}{2}\tilde{u}_0(2l - x), \quad l \leq x \leq 3l.$$

Продолжая этот процесс, можно с помощью (8.28) определить значения $f_{1,2}(x)$ на промежутке $[-3l; -l]$, затем посредством (8.29) — на промежутке $[3l; 5l]$ и т.д. На каждом новом промежутке значения функций $f_1(x)$ и $f_2(x)$ определяются однозначно, поэтому обе функции оказываются определенными, притом единственным образом, на всей числовой оси. Теперь из соотношений (8.28) и (8.29), справедливых для любых $x \in \mathbb{R}$, вытекает, что

$$f_1(x) = -f_2(-x) = -[-f_1(2l + x)] = f_1(2l + x),$$

т. е. функция $f_1(x)$, так же как и $f_2(x)$ — периодические с периодом $2l$:

$$f_{1,2}(x + 2l) = f_{1,2}(x), \quad x \in \mathbb{R}.$$

Таким образом,

$$f_1(x) = f_2(x) = \frac{1}{2}U_0(x), \quad x \in \mathbb{R}, \quad (8.31)$$

где

$$\begin{aligned} U_0(x + 2l) &= U_0(x), \quad x \in \mathbb{R}, \\ U_0(x) &= \tilde{u}_0(x), \quad x \in [-l; l]. \end{aligned}$$

В итоге формула (8.25) определяет решение задачи (8.24)

$$u(x, t) = \frac{U_0(x - at) + U_0(x + at)}{2}, \quad 0 \leq x \leq l. \quad (8.32)$$

Полученный результат можно трактовать следующим образом. Так как функция $U(x, t)$, где $x \in \mathbb{R}$, является нечетным продолжением функции $u_0(x)$ на всю числовую ось относительно точек $x = 0$ и $x = l$ (это следует из соотношений (8.27), (8.28) и (8.29)), то задачу 8.24 можно свести к задаче Коши

$$\begin{aligned} U_{tt} &= a^2 U_{xx}, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ U(x, 0) &= U_0(x), \quad U_t(x, 0) = 0. \end{aligned}$$

Согласно формуле Даламбера (см. задачу 8.123)

$$U(x, t) = \frac{U_0(x - at) + U_0(x + at)}{2},$$

а решением задачи (8.24) будет

$$u(x, t) = U(x, t), \quad x \in [0; l].$$

Действительно, функция $U(x, t)$ удовлетворяет волновому уравнению, т. е. уравнению задачи (8.24). При $x = 0$

$$U(0, t) = \frac{U_0(-at) + U_0(at)}{2} = 0,$$

так как $U_0(x)$ — нечетная функция относительно $x = 0$. Аналогично, при $x = l$

$$\frac{U_0(l - at) + U_0(l + at)}{2} = 0.$$

При $t = 0$

$$\begin{aligned} U(x, 0) &= u_0(x), \quad x \in [0; l], \\ U_t(x, 0) &= 0, \quad x \in [0; l]. \end{aligned}$$

Таким образом, функция $U(x, t)$ удовлетворяет всем условиям задачи (8.24) и, следовательно, является ее решением. В силу теоремы единственности

$$u(x, t) = U(x, t), \quad x \in [0; l],$$

что совпадает с (8.32).

8.247. Струна ($0 < x < l$) с закрепленными концами находится в равновесии под действием сосредоточенной силы $F_0 \mathbf{e}_u$, приложенной в точке $x = l/2$. В момент времени $t = 0$ действие силы прекращается. Решить задачу о движении струны. Найти также: 1) закон движения точки струны (a) $x = l/4$, (b) $x = l/2$; 2) профиль струны в момент времени (a) $t = \frac{l}{8a}$, (b) $t = \frac{l}{2a}$.

8.248. Начальная скорость струны ($0 < x < l$) с закрепленными концами равна нулю, а начальный профиль — парабола с вершиной в точке с координатами $x = l/2, u = h$. Решить задачу о движении струны. Найти также: 1) закон движения точки струны (a) $x = l/2$, (b) $x = 3l/4$; 2) профиль струны в момент времени (a) $t = \frac{l}{4a}$, (b) $t = \frac{l}{2a}$.

8.249. Решить задачу о колебаниях струны ($0 < x < l$) с закрепленными концами, начальный профиль которой $h \sin \pi x/l$, а начальная скорость равна нулю.

8.250. Струна ($0 < x < l$), расположенная на оси Ox , получает в момент времени $t = 0$ скорость $u_1(x) \mathbf{e}_u$. Решить задачу о движении струны, если ее концы закреплены.

8.251. Струна ($0 < x < l$) с закрепленными концами получает в результате ударного импульса в момент $t = 0$ скорость $v_0 \sin \frac{2\pi x}{l} \mathbf{e}_u$. Решить задачу о движении струны, если ее начальное отклонение равно нулю.

8.252. Струна ($0 < x < l$), один конец ($x = 0$) которой закреплен, а другой свободен, находится в статическом равновесии под действием сосредоточенной силы $F_0 \mathbf{e}_u$, приложенной в точке $x = l/2$. В момент времени $t = 0$ действие силы прекращается. Решить задачу о колебаниях струны. Найти также: 1) закон движения точки струны (a) $x = l/2$, (b) $x = l$; 2) форму струны в момент времени (a) $t = \frac{l}{2a}$, (b) $t = \frac{3l}{4a}$.

8.253. Неподвижная струна ($0 < x < l$), конец $x = 0$ которой закреплен, а конец $x = l$ свободен, получает в результате ударного импульса в момент времени $t = 0$ скорость $u_1(x) \mathbf{e}_u$. Решить задачу о движении струны, если ее начальное отклонение равно нулю.

8.254. Начальная скорость струны ($0 < x < l$) равна нулю, а начальный профиль $u_0(x)$. Решить задачу о движении струны, если один ее конец ($x = 0$) закреплен, а другой свободен.

8.255. Начальная скорость струны ($0 < x < l$) равна нулю, а начальный профиль $h \sin \frac{\pi x}{2l}$. Решить задачу о движении струны, если один ее конец ($x = 0$) закреплен, а другой свободен.

8.256. Конец $x = 0$ струны ($0 < x < l$) свободен, а конец $x = l$ закреплен. Решить задачу о движении струны, если ее начальное отклонение равно нулю, а начальная скорость $v_0 \sin \frac{3\pi x}{2l}$.

8.257. Тяжелая неподвижная струна ($0 < x < l$) расположена на горизонтальной подставке. В момент времени $t = 0$ подставку убирают. Решить задачу о движении струны под действием силы тяжести, если ее концы закреплены. Определить также: 1) закон движения точки струны (а) $x = l/2$, (б) $x = 3l/4$; 2) профиль струны в момент времени (а) $t = \frac{l}{4a}$, (б) $t = \frac{3l}{2a}$.

8.258. На струну ($0 < x < l$) с закрепленными концами действует сосредоточенная сила $F_0 \sin \frac{\pi a t}{l} \mathbf{e}_u$, приложенная в точке $x = l/2$. Найти: 1) закон движения точки $x = l/2$; 2) профиль струны в момент времени (а) $t = \frac{l}{2a}$, (б) $t = \frac{l}{a}$. Начальные условия нулевые.

8.259. На струну ($0 < x < l$) с закрепленными концами действует сила, линейная плотность которой $F_0 \sin \frac{2\pi x}{l} \sin \omega t \mathbf{e}_u$. Решить задачу о колебаниях струны при нулевых начальных условиях.

8.260. На единицу длины струны ($0 < x < l$), один конец ($x = 0$) которой закреплен, а другой свободен, действует сила $F_0 \sin \frac{\pi x}{2l} \sin \omega t \mathbf{e}_u$. Решить задачу о колебаниях струны при нулевых начальных условиях.

8.261. На струну ($0 < x < l$), конец $x = 0$ которой закреплен, а второй конец $x = l$ свободен, действует сосредоточен-

ная сила $F_0 \sin \frac{\pi at}{2l} \eta(t) \mathbf{e}_u$, приложенная в точке $x = l/2$. Найти: 1) закон движения точки $x = l/2$; 2) форму струны в момент $t = \frac{l}{4a}$. Начальные условия нулевые.

8.262. Тяжелая струна ($0 < x < l$), конец $x = 0$ которой закреплен, а конец $x = l$ свободен, находится на горизонтальной подставке. В момент времени $t = 0$ подставку убирают. Решить задачу о движении струны под действием силы тяжести.

8.263. Один конец $x = 0$ струны ($0 < x < l$) закреплен жестко, а конец $x = l$ — упруго. Найти форму струны в момент времени $t = \frac{l}{3a}$, если начальное отклонение $u(x, 0) = Ax$, а начальная скорость равна нулю.

8.264. Конец $x = l$ струны ($0 < x < l$) закреплен жестко, а другой конец $x = 0$ — упруго. Найти форму струны в момент времени $t = \frac{3l}{4a}$, если начальное отклонение равно нулю, а начальная скорость равна v_0 .

8.265. Тяжелая струна ($0 < x < l$), конец $x = 0$ которой закреплен жестко, а конец $x = l$ — упруго, находится на горизонтальной подставке и занимает отрезок $[0; l]$ оси Ox , $\mathbf{e}_u = \mathbf{e}_g$. Найти форму струны в момент времени $t = \frac{l}{2a}$ после того, как подставку убрали.

8.266. Конец $x = l$ струны ($0 < x < l$) закреплен, а на свободный конец $x = 0$ действует сила трения, пропорциональная скорости (коэффициент пропорциональности α задан). Найти форму струны в моменты времени: 1) $t = \frac{3l}{5a}$, если начальное отклонение $u(x, 0) = Ax$, а начальная скорость равна нулю; 2) $t = \frac{5l}{7a}$, если начальное отклонение равно нулю, а начальная скорость равна v_0 .

8.267. Конец $x = l$ струны ($0 < x < l$) закреплен, а на свободном конце $x = 0$ имеется шарик, масса которого M . Найти форму струны в момент времени $t = \frac{4l}{5a}$, если ее начальное отклонение $u(x, 0) = Ax$, а начальная скорость равна нулю.

8.268. Найти форму струны в момент времени $t = \frac{5l}{6a}$ при тех же условиях на концах струны, что и в предыдущей задаче, если

начальное отклонение струны равно нулю, а начальная скорость равна v_0 .

8.269. Цилиндрический стержень ($0 < x < l$) массой m покоится на гладкой горизонтальной поверхности. В момент времени $t = 0$ стержень получает продольный ударный импульс I в торец $x = 0$. Найти закон движения сечения с координатой x и построить соответствующий график.

8.270. Стержень ($0 < x < l$), торец $x = 0$ которого свободен, а торец $x = l$ закреплен, выводится из состояния статического равновесия продольным ударным импульсом I в свободный торец. Решить задачу о движении стержня.

8.271. Точечная масса M , движущаяся с постоянной скоростью v по оси Ox , ударяет в торец $x = 0$ упругого недеформированного цилиндрического стержня ($0 < x < l$), покоящегося на гладкой горизонтальной поверхности. Показать, что: 1) время соударения $\tau > 2l/a$, где $a = \sqrt{E/\rho}$; 2) если $\frac{m}{M} \geq \mu_0$, где m — масса стержня, μ_0 — корень уравнения $2 + e^{-2\mu} = 4\mu$, то $\tau = \frac{l}{2\mu a}(2 + 4\mu + e^{-2\mu})$ принадлежит промежутку $(\frac{2l}{a}; \frac{4l}{a})$.

8.272. Упругий цилиндрический стержень ($0 < x < l$), масса которого m , с закрепленным торцом $x = l$ находится в состоянии покоя. В момент времени $t = 0$ стержень получает импульс в результате удара в свободный торец $x = 0$ тела, масса которого M , движущегося со скоростью v вдоль оси Ox . Показать, что время соударения $\tau > 2l/a$, где $a = \sqrt{E/\rho}$. При каком условии значение $\tau \in (\frac{2l}{a}; \frac{4l}{a})$? Каково это значение?

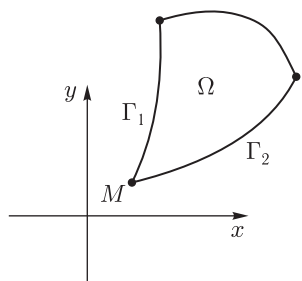


Рис. 8.1

Пример 8.9. Задача Гурса. Пусть уравнение (8.19) принадлежит гиперболическому типу в области Ω , граница $\partial\Omega$ которой содержит части характеристик Γ_1 и Γ_2 , выходящих из точки $M \in \partial\Omega$; при этом $(\Gamma_1 \cap \Gamma_2) \cup \partial\Omega$ — связное множество (рис. 8.1). Постановка задачи Гурса: на множестве достаточно гладких в $\Omega \cap \Gamma_1 \cap \Gamma_2$ функций $u(x, y)$ найти решение уравнения (8.19) при условиях

$$u|_{\Gamma_i} = u_i, \quad u_i \in C(\partial\Omega \cap \Gamma_i), \quad i = 1, 2, \quad u_1(M) = u_2(M).$$

Модификации задачи Гурса: 1) условия для u ставятся на части характеристики Γ_1 (или Γ_2) и линии L , которая выходит из M и пересекает каждую характеристику не более, чем в одной точке; 2) условия для u ставятся на двух линиях L_1 и L_2 , выходящих из точки M , при этом каждая из линий имеет с любой характеристикой не более одной общей точки. В обоих случаях сохраняется требование связности участка границы области Ω , на котором функция u принимает заданные значения. Задача Гурса для уравнения (8.4): решить уравнение в области $\Omega\{x, y: \operatorname{sh} x - y < y < \operatorname{sh} x + x, 0 < y\}$ при условиях

$$u|_{y=\operatorname{sh} x - x} = 1, \quad u|_{y=\operatorname{sh} x + x} = \frac{1}{x+1}. \quad (8.33)$$

Чтобы решить эту задачу, нужно в общем решении (8.16) уравнения (8.4) взять такие функции f и g , при которых выполнялись бы условия (8.33), т. е.

$$\begin{cases} f(2x) + g(0) = 1, \\ f(0) + g(-2x) = \frac{1}{x+1}, \\ f(0) + g(0) = 1. \end{cases}$$

Отсюда

$$f(x) = 1 - g(0), \quad g(x) = \frac{2}{2-x} - f(0),$$

поэтому

$$u(x, y) = 1 - g(0) + \frac{2}{2 - \operatorname{sh} x + x + y} - f(0) = \frac{2}{2 + x - \operatorname{sh} x + y}.$$

Решить задачи Гурса 8.273–8.357.

8.273. $u_{xy} + 2xyu_y = 0$, $1 < x$, $1 < y$, $u|_{x=1} = y$, $u|_{y=1} = x$.

8.274. $u_{xy} + xu_x = 0$, $1 < x$, $1 < y$;
1) $u|_{x=1} = y$, $u|_{y=1} = x$; 2) $u|_{x=1} = \operatorname{erf} y$, $u|_{y=1} = \operatorname{erf} x$.

8.275. $u_{xy} + xu_x + u_y + (x+1)u = 0$, $0 < x$, $1 < y$,
 $u|_{y=1} = e^{-x-1}$, $u|_{x=0} = e^{-y^2}$.

8.276. $2u_{xx} + 3u_{xy} - 2u_{yy} + 3u_x + u_y + u = 0$, $0 < y < 2x$,
 $u|_{y=0} = 0$, $u|_{y=2x} = x$.

- 8.277.** $18u_{xx} + 26u_{xy} + 8u_{yy} + 15\sqrt{2}u_x + 10\sqrt{2}u_y + 12u = 0$,
 $\frac{4}{9}x < y < x$, $u|_{y=x} = u_1(x)$, $u|_{4x=9y} = u_2(x)$, $u_1(0) = u_2(0)$.
- 8.278.** $x^2u_{xx} - y^3u_{yy} + xu_x - \frac{3}{2}y^2u_y = 0$, $1 - \ln\sqrt{x} < \frac{1}{\sqrt{y}} < 1 + \ln\sqrt{x}$,
 $u|_{\ln x + \frac{2}{\sqrt{y}}=2} = \operatorname{sh} 1$, $u|_{\ln x - \frac{2}{\sqrt{y}}=-2} = \operatorname{sh}(\ln x + 1)$.
- 8.279.** $4y^2u_{xx} + 2(1 - y^2)u_{xy} - u_{yy} - \frac{2y}{1 + y^2}(2u_x - u_y) = 0$,
 $-\frac{x}{2} < y < \sqrt[3]{\frac{3x}{2}}$, $u|_{2y=-x} = \frac{x}{2} \left(1 + \frac{x^2}{12}\right)$,
 $u|_{y=\sqrt[3]{\frac{3x}{2}}} = \frac{1}{2}(x + \sqrt[3]{12x})$.
- 8.280.** $yu_{xx} - xu_{yy} - \frac{1}{2}\left(\frac{y}{x}u_x - \frac{x}{y}u_y\right) = 0$, $0 < x$, $0 < y$,
 $u|_{y=x} = 2x^6$, $u|_{y=4x} = 520x^6$.
- 8.281.** $xu_{xx} + (x + y)u_{xy} + yu_{yy} + u_x + u_y = 0$, $2x < y < x + 1$,
 $u|_{y=2x} = \frac{2}{3}$, $u|_{y=x+1} = \frac{x+1}{2x+1}$.
- 8.282.** $u_{xx} - 2\sin xu_{xy} - \cos^2 xu_{yy} - \cos xu_y = 0$,
 $-x + \cos x < y < x + \cos x$, $u|_{y=x+\cos x} = x^2$,
 $u|_{y=-x+\cos x} = -x^2$.
- 8.283.** $\sin^2 x u_{xx} + 2\cos x u_{xy} - u_{yy} + \sin 2x u_x - \sin x u_y = 0$,
 $2\operatorname{arctg}(-y) < x < 2\operatorname{arctg}(-y)$,
 $u|_{x=2\operatorname{arctg}(-y)} = -\operatorname{ctg}^2 x$, $u|_{x=2\operatorname{arctg}(-y)} = -\operatorname{ctg}^2 x$.
- 8.284.** $u_{xx} - \left(\frac{x}{y} + \frac{y}{x}\right)u_{xy} + u_{yy} - \frac{3x^2 + y^2}{x(x^2 - y^2)}u_x + \frac{x^2 + 3y^2}{y(x^2 - y^2)}u_y = 0$,
 $2x < y < 3x$, $u|_{y=2x} = 9x^2$, $u|_{y=3x} = 16x^2$.
- 8.285.** $xu_{xx} + 2yu_{xy} + xu_{yy} + u_x = 0$, $1 < y < x < \sqrt{2y-1}$,
 $u|_{x=y} = 1$, $u|_{x=\sqrt{2y-1}} = e^{2(y-1)}$.
- 8.286.** $x^2yu_{xx} - y^3u_{yy} + x(2x + y)u_x + y(2x - y)u_y = 0$,
 $0 < \frac{1}{x} < y < x$, $u|_{x=y} = 2\ln x$, $u|_{xy=1} = x - 1$.

$$8.287. \quad u_{xx} - u_{yy} + 2 \frac{u_x + u_y}{x - y} = 0, \quad 2 - x < y < x,$$

$$u|_{y=x} = 2x, \quad u|_{y=-x+2} = x + 1.$$

$$8.288. \quad y u_{xx} + (x - y) u_{xy} - x u_{yy} = 0, \quad 0 < y < x,$$

$$u|_{y=0} = x^5, \quad u|_{y=x} = 16x^5.$$

$$8.289. \quad x^2 u_{xx} - y^2 u_{yy} = 0, \quad \frac{1}{x} < y < x,$$

$$u|_{y=x} = \sqrt{x}(\sqrt{x} + 1), \quad u|_{xy=1} = x + 1.$$

$$8.290. \quad x^2 u_{xx} + 3xy u_{xy} - 4y^2 u_{yy} + 6xu_x + 16yu_y = 0, \quad \frac{1}{2} < \frac{1}{x} < y < x^4,$$

$$u|_{xy=1} = u_1(x), \quad u|_{y=x^4} = u_2(x), \quad u_1(1) = u_2(1).$$

Решить задачу в частном случае: $u_1(x) = 1 + x^{-5}$, $u_2(x) = 1 + x^5$.

$$8.291. \quad u_{xx} + u_{xy} - y(u_x + u_y) - u = 0, \quad 0 < y < x,$$

$$u|_{y=0} = 1 - e^{-x}, \quad u|_{y=x} = 0.$$

$$8.292. \quad u_{xx} + u_{xy} + y(u_x + u_y) = 0, \quad 0 < y < x,$$

$$u|_{y=0} = u_1(x), \quad u|_{y=x} = u_2(x), \quad u_1(0) = u_2(0).$$

Решить задачу в частном случае: $u_1(x) = 1$, $u_2(x) = e^{-x}$.

$$8.293. \quad u_{xx} + u_{xy} - y(u_x + u_y) = 0, \quad 0 < y < x,$$

$$u|_{y=0} = 1 - e^{-x}, \quad u|_{y=x} = -1 + e^{-x}.$$

$$8.294. \quad x^2 y^3 u_{xx} + 10xy^2 u_{xy} + 16yu_{yy} + xy^3 u_x + 8(9y^2 - 2)u_y - \\ - 144y^3 u = 0,$$

$$1 < x, \quad 4 \ln x < y, \quad u|_{x=1} = e^{2y^2}, \quad u|_{y=2 \ln x} = x.$$

$$8.295. \quad x^2 u_{xx} - y^2 u_{yy} - x(1 - 2xy)u_x - y(3 + 2xy)u_y - 4xyu = 0,$$

$$0 < x, \quad \frac{1}{x} < y < x, \quad u|_{y=x} = e^{-x^2}, \quad u|_{xy=1} = e^{-x}.$$

$$8.296. \quad u_{xx} + u_{xy} + y(u_x + u_y) - u = 0, \quad 0 < y < x,$$

$$u|_{y=0} = \frac{1}{(x+1)^2}, \quad u|_{y=x} = e^{-x}.$$

$$8.297. \quad x^2 u_{xx} + 2xy u_{xy} + (y^2 - x^4) u_{yy} + 2xu_x + 2yu_y = 0,$$

$$5x - x^2 < y < x^2 + x, \quad u|_{y=5x-x^2} = \frac{2}{x}, \quad u|_{y=x^2+x} = 1.$$

$$8.298. \quad xu_{xx} + 2yu_{xy} + xu_{yy} - u_x = 0, \quad 0 < x < \sqrt{2y-1} < 1,$$

$$u|_{x=0} = 1 - y, \quad u|_{x=\sqrt{2y-1}} = ye^{1-2y}.$$

$$8.299. \quad 4x u_{xx} - u_{yy} + \frac{3u}{4x} = 0, \quad 1 - \sqrt{x} < y < 1 + \sqrt{x},$$

$$u|_{y+\sqrt{x}=1} = x^{\frac{7}{4}}(\sqrt{x} - 1), \quad u|_{y-\sqrt{x}=1} = x^{\frac{7}{4}}(\sqrt{x} + 1).$$

$$8.300. \quad u_{xx} - u_{yy} + 2\frac{u_x - u_y}{x - y} - \frac{4u}{(x - y)^2} = 0,$$

$$-y < x < y - 1, \quad \frac{1}{2} < y, \quad u|_{y=-x} = 1, \quad u|_{y=x+1} = 1.$$

$$8.301. \quad u_{xx} - \operatorname{sh}^2 xu_{yy} - \operatorname{cth} xu_x - 2\operatorname{th}^2 xu = 0, \quad |y - 1| < \operatorname{ch} x, \quad x > 0,$$

$$u|_{y=1-\operatorname{ch} x} = \frac{1}{\operatorname{ch} x} - 2, \quad u|_{y=1+\operatorname{ch} x} = \frac{1}{\operatorname{ch} x} + 2.$$

$$8.302. \quad x u_{xx} + 2y u_{xy} + x u_{yy} + \frac{2(yu_x + xu_y)}{\sqrt{y^2 - x^2}} + \frac{5xu}{4(y^2 - x^2)},$$

$$u|_{y=\sqrt{2}x} = x^{\frac{5}{2}}, \quad u|_{y=-\sqrt{5}x} = 4\sqrt{2}(-x)^{\frac{5}{4}}.$$

$$8.303. \quad \operatorname{ch} xu_{xx} + \operatorname{sh} 2xu_{xy} - \operatorname{ch} xu_{yy} - \operatorname{sh} xu_x + u_y - 2\operatorname{ch} x \operatorname{cth}^2 xu = 0,$$

$$u|_{y=e^x+1} = \operatorname{sh}^2 x(1 + \operatorname{sh} x), \quad u|_{y=e^{-x}+1} = \operatorname{sh}^2 x(1 - \operatorname{sh} x).$$

$$8.304. \quad x u_{xx} + 2y u_{xy} + x u_{yy} + \frac{5}{3}u_x = 0, \quad -x < y < x,$$

$$u|_{x=0} = y^{\frac{4}{3}}, \quad u|_{x=y} = 0.$$

$$8.305. \quad (x - y)u_{xy} - u_y = 0, \quad -y < x < y, \quad 0 < y,$$

$$u|_{y=x} = 0, \quad u|_{y=-x} = -4x^3.$$

$$8.306. \quad yu_{xx} - yu_{yy} - \frac{1}{6}u_x - \frac{1}{2}u_y = 0, \quad 0 < y < x,$$

$$u|_{y=0} = \frac{27}{28}x^2, \quad u|_{y=x} = \sqrt{x} + x^2.$$

8.307. Пусть

$$f(x, y) \in C(y \geq x); \quad \forall x: \int_x^\infty d\xi \int_\xi^\infty |f(\xi, \eta)| d\eta < \infty,$$

$$\varphi(x) \in C^1(\mathbb{R}), \quad \int_{-\infty}^\infty |\varphi(\xi)| d\xi < \infty.$$

Доказать, что задача Гурса

$$v_{xx} - v_{yy} = f(x, y), \quad -\infty < x < y < \infty,$$

$$v(x, x) = \varphi(x), \quad \forall C: \lim_{\substack{x+y \rightarrow \infty \\ y-x=C}} v(x, y) = 0$$

имеет единственное решение

$$v(x, y) = \varphi\left(\frac{x+y}{2}\right) + \frac{1}{2} \int_x^{\frac{x+y}{2}} d\xi \int_{y+x-\xi}^{y-x+\xi} f(\xi, \eta) d\eta + \\ + \frac{1}{2} \int_{\frac{x+y}{2}}^{\infty} d\xi \int_{\xi}^{y-x+\xi} f(\xi, \eta) d\eta. \quad (8.34)$$

Пример 8.10. Пусть функция $u(x)$ удовлетворяет условиям (6.50); доказать существование и единственность решения задачи Гурса

$$v_{xx} - v_{yy} = u(x)v, \quad -\infty < x < y < \infty, \\ v(x, x) = \frac{1}{2} \int_x^{\infty} u(\xi) d\xi, \quad \forall C: \lim_{\substack{x+y \rightarrow \infty \\ y-x=C}} v(x, y) = 0. \quad (8.35)$$

Функция $v(x, y)$ — решение интегрального уравнения

$$v(x, y) = \frac{1}{2} \varphi\left(\frac{x+y}{2}\right) + (\mathcal{K}v)(x, y) \quad (8.36)$$

(см. (8.34)), где

$$\varphi(z) = \int_z^{\infty} u(\xi) d\xi, \\ (\mathcal{K}v)(x, y) = \frac{1}{2} \int_x^{\frac{x+y}{2}} d\xi \int_{y+x-\xi}^{y-x+\xi} u(\xi) v(\xi, \eta) d\eta + \\ + \frac{1}{2} \int_{\frac{x+y}{2}}^{\infty} d\xi \int_{\xi}^{y-x+\xi} u(\xi) v(\xi, \eta) d\eta. \quad (8.37)$$

Условия (6.50) обеспечивают существование следующих интегралов:

$$U_0(x) = \int_x^{\infty} |u| d\xi, \quad F(x, y) = \int_x^{\infty} (\xi - y) |u| d\xi, \quad U(x) = F(x, x). \quad (8.38)$$

Если $x \geq y$, то

$$U(x) \leq F(x, y). \quad (8.39)$$

Пусть $\mathcal{M}_{\mathcal{K}}$ — множество функций $v(x, y)$, непрерывных и ограниченных на $\overline{\Delta} = \{x, y: h \leq x \leq y\}$ при любом h . Нормой функции $v(x, y)$ называется число

$$\|v\| = \max_{\overline{\Delta}} |v(x, y)|;$$

последовательность функций называется сходящейся, если она сходится по норме, причем

$$\lim_{n \rightarrow \infty} v_n = v \iff \lim_{n \rightarrow \infty} \|v_n - v\| = 0. \quad (8.40)$$

Оператор $\mathcal{K}$ определен на $\mathcal{M}_{\mathcal{K}}$. Действительно,

$$\begin{aligned} |\mathcal{K}v| &\leq \|v\| \int_x^{\frac{x+y}{2}} (\xi - x) |u(\xi)| d\xi + \|v\| \int_{\frac{x+y}{2}}^{\infty} \frac{y-x}{2} |u(\xi)| d\xi \leq \\ &\leq \|v\| \int_x^{\infty} (\xi - x) |u(\xi)| d\xi \|v\| U(x) \leq \|v\| U(h). \end{aligned} \quad (8.41)$$

При выводе (8.41) учтено, что $(y-x)/2 \leq \xi - x$ при $(x+y)/2 \leq \xi$.

Если существует такое число $A > 0$, что для любой функции $v \in \mathcal{M}_{\mathcal{K}}$ выполняется неравенство $|\mathcal{K}v| \leq A\|v\|$, то оператор $\mathcal{K}$ называется ограниченным. Точная нижняя граница множества чисел A называется нормой оператора и обозначается $\|\mathcal{K}\|$. Свойство ограниченности записывается в виде $\|\mathcal{K}v\| \leq \|\mathcal{K}\| \|v\|$.

Оператор $\mathcal{K}$ отображает $\mathcal{M}_{\mathcal{K}}$ в $\mathcal{M}_{\mathcal{K}}$. В самом деле, ограниченность функции $\mathcal{K}v$ обусловлена оценкой (8.41). Для доказательства непрерывности функции $\mathcal{K}v$ соотношение (8.37) следует записать в виде суммы $\mathcal{K}v = w_1 + w_2 + w_3$, где w_1 — первое слагаемое, т. е. интеграл по $d\xi$ (с множителем $1/2$), взятый в пределах от x до $(x+y)/2$,

$$w_2 = \frac{1}{2} \int_{\frac{x+y}{2}}^h d\xi \int_{\xi}^{y-x+\xi} u(\xi) v(\xi, \eta) d\eta, \quad w_3 = \frac{1}{2} \int_h^{\infty} d\xi \int_{\xi}^{y-x+\xi} u(\xi) v(\xi, \eta) d\eta.$$

Функции w_1 и w_2 , не являющиеся несобственными интегралами, непрерывны, а непрерывность функции

$$w_3 = \int_h^{\infty} \Phi d\xi, \quad \Phi(x, y, \xi) = \frac{1}{2} \int_{\xi}^{y-x+\xi} u(\xi) v(\xi, \eta) d\eta \quad (8.42)$$

вытекает из неравенства

$$\begin{aligned}
 |\Delta w_3| &= \frac{1}{2} \left| \int_h^\infty d\xi \int_{y-x+\xi}^{y+\Delta y-x-\Delta x+\xi} u(\xi) v(\xi, \eta) d\eta \right| \leq \\
 &\leq \frac{\|v\|}{2} \int_h^\infty d\xi |\Delta x - \Delta y| |u(\xi)| \leq \frac{\|v\|}{2} U_0(h) (|\Delta x| + |\Delta y|).
 \end{aligned}$$

Оператор $\mathcal{K}$ называется непрерывным, если из сходимости последовательности $v_n \rightarrow v$ следует сходимость последовательности $\mathcal{K}v_n \rightarrow \mathcal{K}v$. Оператор $\mathcal{K}$ непрерывен, поскольку

$$\|\mathcal{K}v_n - \mathcal{K}v\| = \|\mathcal{K}(v_n - v)\| \leq \|\mathcal{K}\| \|v_n - v\| \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty.$$

В последующих выкладках используется оценка

$$|\mathcal{K}^m v| \leq \|v\| \frac{U^m(x)}{m!}, \quad m \in \mathbb{N}, \quad (8.43)$$

которая устанавливается методом математической индукции: если $m = 0$, то $|v| \leq \|v\|$, т.е. оценка верна; если она справедлива для $m - 1$, то (см. (8.39))

$$\begin{aligned}
 |\mathcal{K}^m v| &= |\mathcal{K}(\mathcal{K}^{m-1} v)| \leq \frac{\|v\|}{2(m-1)!} \times \\
 &\times \left(\int_x^{\frac{x+y}{2}} d\xi \int_{y+x-\xi}^{y-x+\xi} |u(\xi)| U^{m-1}(\xi) d\eta \int_{\frac{x+y}{2}}^\infty d\xi \int_\xi^{y-x+\xi} |u(\xi)| U^{m-1}(\xi) d\eta \right) \leq \\
 &\leq \frac{\|v\|}{2(m-1)!} \times \\
 &\times \left(\int_x^{\frac{x+y}{2}} |u(\xi)| U^{m-1}(\xi) 2(\xi - x) d\xi + \int_{\frac{x+y}{2}}^\infty |u(\xi)| U^{m-1}(\xi) (y - x) d\xi \right) \leq \\
 &\leq \frac{\|v\|}{(m-1)!} \int_x^\infty (\xi - x) |u(\xi)| U^{m-1}(\xi) d\xi \leq \\
 &\leq \frac{\|v\|}{(m-1)!} \int_x^\infty (-F_\xi(\xi, x)) F^{m-1}(\xi, x) d\xi \leq \|v\| \frac{U^m(x)}{m!}.
 \end{aligned}$$

Здесь, как и при доказательстве оценки (8.41), использовано неравенство $y - x \leq 2(\xi - x)$, справедливое при $x + y \leq 2\xi$. Для доказательства существования решения уравнения (8.37) применяется метод последовательных приближений (пример 4.9, т. 1). Он состоит в построении последовательности

$$v_0(x, y) = \frac{1}{2}\varphi\left(\frac{x+y}{2}\right), \quad v_n = v_0 + \mathcal{K}v_{n-1}, \quad (8.44)$$

n -й член которой

$$v_n = \sum_{m=0}^{m=n} \mathcal{K}^m v_0$$

представляет собой частичную сумму ряда Неймана $\sum_{m=0}^{\infty} \mathcal{K}^m v_0$.

Исследование сходимости ряда основано на оценке (8.43), в которой $v = v_0$. Так как

$$|v_0| \leq \frac{1}{2} \int_{\frac{x+y}{2}}^{\infty} |u(\xi)| d\xi = \frac{1}{2} U_0\left(\frac{x+y}{2}\right) \leq \frac{1}{2} U_0(h),$$

то $\|v\| \leq \frac{1}{2} U_0(h)$. Следовательно,

$$\left| \sum_{m=0}^{\infty} \mathcal{K}^m v_0 \right| \leq \frac{U_0(h)}{2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{U^m(x)}{m!} \frac{U_0(h)}{2} e^{U(x)} \leq \frac{U_0(h)}{2} e^{U(h)},$$

т. е. ряд Неймана абсолютно и равномерно сходится на $\overline{\Delta}$, поэтому его сумма $v(x, y) \in \mathcal{M}_{\mathcal{K}}$. Поскольку $\mathcal{K}$ — непрерывный оператор, а последовательность $v_n \rightarrow v$ при $n \rightarrow \infty$ в смысле определения (8.40), то переход к пределу в (8.44)

$$\lim_{n \rightarrow \infty} v_n = v_0 + \lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{K}v_{n-1} \implies v = v_0 + \mathcal{K}v$$

показывает, что $v(x, y)$ — решение уравнения (8.36).

Если есть два решения v_1, v_2 , то разность $v = v_1 - v_2$ — решение уравнения $v = \mathcal{K}v$. Последовательное применение оператора $\mathcal{K}$ к этому уравнению приводит к равенствам $v = \mathcal{K}v = \mathcal{K}^2 v = \dots = \mathcal{K}^m v$. Отсюда с помощью оценки (8.43) получается неравенство

$$\|v\| = \|\mathcal{K}^m v\| \leq \frac{\|v\|}{m!} U_0(h) U^m(h),$$

правая часть которого стремится к нулю при $t \rightarrow \infty$, поэтому $\|v\| = 0$, откуда $v = 0$.

Остается установить эквивалентность задачи Гурса (8.35) и интегрального уравнения (8.36). В одну сторону это свойство уже доказано (при построении уравнения (8.36)). Обратное положение — решение уравнения (8.36), удовлетворяет системе условий (8.35) и проверяется подстановкой; необходимо только обосновать дифференцирование по параметрам x и y интегралов в (8.36). Несобственный интеграл (8.42) сходится на $\overline{\Delta}$, а интеграл с подынтегральной функцией $|\Phi_y(x, y, \xi)|$ равномерно сходится на $\overline{\Delta}$, так как

$$|\Phi_y(x, y, \xi)| = \frac{1}{2}|u(\xi)v(\xi, y - x + \xi)| \leq \frac{\|v\|}{2}|u(\xi)|.$$

Следовательно, дифференцирование тождества (8.36) по параметру y под знаком интеграла законно, в результате чего

$$v_y = -\frac{1}{4}u\left(\frac{x+y}{2}\right) - \frac{1}{2} \int_x^{\frac{x+y}{2}} u(\xi)v(\xi, y+x-\xi) d\xi + \\ + \frac{1}{2} \int_x^\infty u(\xi)v(\xi, y-x+\xi) d\xi, \quad (8.45)$$

откуда

$$|v_y| \leq \frac{1}{4} \max_{\overline{\Delta}} \left| u\left(\frac{x+y}{2}\right) \right| + \frac{\|v\|}{2} \int_x^\infty |u(\xi)| d\xi + \\ + \frac{\|v\|}{2} \int_x^\infty |u(\xi)| d\xi \leq \frac{1}{4} \max_{\overline{\Delta}} \left| u\left(\frac{x+y}{2}\right) \right| + \frac{\|v\|}{2} \int_h^\infty |u(\xi)| d\xi = M_0.$$

Если в выражении (8.45) выделить интеграл

$$\int_h^\infty \Phi_1(x, y, \xi) d\xi, \quad \Phi_1(x, y, \xi) = u(\xi)v(y-x+\xi),$$

то оценки

$$\left| \int_h^\infty \Phi_1(x, y, \xi) d\xi \right| \leq \|v\| \int_h^\infty |u(\xi)| d\xi < \infty, \\ |\Phi_{1y}(x, y, \xi)| \leq M_0|u(\xi)|$$

доказывают правомерность дифференцирования по параметру y интегралов в (8.45). Законность дифференцирования этих интегралов по параметру x устанавливается так же.

8.308. Доказать, что решение $v(x, y)$ задачи Гурса (8.35) обладает свойствами:

для любого h функция $v(x, y) \rightarrow 0$ при $y \rightarrow +\infty$ равномерно на $\overline{H} = [h, \infty]$;
интегралы

$$\int_h^\infty \left| \frac{\partial^m v(x, y)}{\partial x^m} \right| dy, \quad \int_h^\infty \left| \frac{\partial^m v(x, y)}{\partial y^m} \right| dy, \quad m = 0, 1, 2,$$

равномерно сходятся на $\overline{H}$.

8.309. Доказать, что задача Гурса

$$v_{xx} - v_{yy} = f(x + y)v, \quad -\infty < x < y < \infty,$$

$$v(x, x) = \frac{1}{2} \int_x^\infty f(\xi) d\xi,$$

$$\forall C: \lim_{\substack{x+y \rightarrow \infty \\ y-x=C}} v(x, y) = 0, \quad \forall x: \int_x^\infty |f(\xi) d\xi| < \infty$$

имеет единственное решение

$$v(x, y) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F(x+y)}{y-x}} I_1 \left(\sqrt{(y-x) F(x+y)} \right), \quad F(z) = \int_z^\infty f(\zeta) d\zeta.$$

8.310. Найти общее решение уравнения

$$u_{tt} = a^2 u_{xx} - c^2 u$$

и решить задачу Гурса, если

$$u|_{x=at} = F_1(x), \quad u|_{x=-at} = F_2(x),$$

где $F_{1,2}(x) \in C^1$, $F_1(0) = F_2(0)$.

8.311. Найти общее решение уравнения

$$u_{tt} = a^2 u_{xx} + c^2 u$$

и решить задачу Гурса, если

$$u|_{x=at} = F_1(x), \quad u|_{x=-at} = F_2(x),$$

где $F_{1,2}(x) \in C^1$, $F_1(0) = F_2(0)$.

8.312. Заданы функции $q(x)$ и $r(x)$, удовлетворяющие условиям (6.53); доказать, что решение задачи Гурса

$$\begin{cases} u_x - u_y - q(x)v = 0, \\ v_x + v_y - r(x)u = 0, \\ v(x, x) = -\frac{1}{2}q(x), \quad -\infty < x < y < \infty, \end{cases} \quad (8.46)$$

$u(x, y) \rightarrow 0$, $v(x, y) \rightarrow 0$ при $y \rightarrow \infty$ равномерно на $\overline{H} = [h, \infty]$, где h — любое число, существует, единственно и при любом h интегралы

$$\int_h^\infty \left| \frac{\partial^{m+n} u}{\partial x^m \partial y^n} \right| dy, \quad \int_h^\infty \left| \frac{\partial^{m+n} v}{\partial x^m \partial y^n} \right| dy, \quad 0 \leq m+n < 1,$$

сходятся равномерно на $\overline{H}$.

Пример 8.11. Метод Римана. Метод применяется к задаче Коши

$$\begin{aligned} \mathcal{L}u &= f, \\ u|_L &= u_0, \quad \frac{\partial u}{\partial l}|_L = u_1, \end{aligned} \quad (8.47)$$

где

$$\mathcal{L} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + a(x, y) \frac{\partial}{\partial x} + b(x, y) \frac{\partial}{\partial y} + c(x, y).$$

Сущность метода: решение задачи (8.47) выражается через решение вспомогательной задачи Гурса. Для получения необходимых соотношений вводится сопряженный оператор $\mathcal{L}^*$:

$$\forall \varphi \in \mathcal{D}: (\mathcal{L}u, \varphi) = (u, \mathcal{L}^*\varphi).$$

Согласно (10.9) и по определению обобщенной производной (10.14)

$$\begin{aligned} (\mathcal{L}u, \varphi) &= \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}, \varphi \right) + \left(a \frac{\partial u}{\partial x}, \varphi \right) + \left(b \frac{\partial u}{\partial y}, \varphi \right) + (cu, \varphi) = \\ &= \left(u, \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \right) - \left(u, \frac{\partial(a\varphi)}{\partial x} \right) - \left(u, \frac{\partial(b\varphi)}{\partial y} \right) + (u, c\varphi), \end{aligned}$$

откуда

$$\mathcal{L}^* = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} - \frac{\partial}{\partial x} a - \frac{\partial}{\partial y} b + c.$$

Построение решения задачи Коши (8.47) основано на тождестве (оно доказывается непосредственной проверкой)

$$\begin{aligned} v\mathcal{L}u - u\mathcal{L}^*v &= \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial u}{\partial y} - u \frac{\partial v}{\partial y} + 2auv \right) + \\ &+ \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial u}{\partial x} - u \frac{\partial v}{\partial x} + 2buv \right). \end{aligned} \quad (8.48)$$

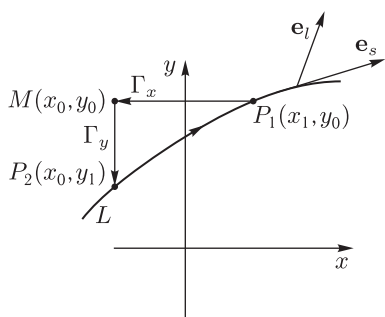


Рис. 8.2

Пусть $M(x_0, y_0)$ — точка плоскости, не принадлежащая линии L , Γ_x и Γ_y — характеристики $x = x_0$ и $y = y_0$ уравнения $\mathcal{L}u = f$, проходящие через точку M , P_1 и P_2 — точки пересечения характеристик с линией L , Ω — область, ограниченная линиями Γ_x , Γ_y и L , $\mathbf{e}_s$ — единичный вектор касательной к L (рис. 8.2). В результате интегрирования тождества (8.48) по Ω и применения формулы Грина получается соотношение

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (v\mathcal{L}u - u\mathcal{L}^*v) dx dy &= \\ &= \frac{1}{2} \int_{\partial\Omega} \left[- \left(v \frac{\partial u}{\partial x} - u \frac{\partial v}{\partial y} + 2buv \right) dx + \left(v \frac{\partial u}{\partial y} - u \frac{\partial v}{\partial x} + 2auv \right) dy \right]. \end{aligned} \quad (8.49)$$

Дальнейшие преобразования касаются интегралов по характеристикам, а именно:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2} \int_{P_1 M} \left(v \frac{\partial u}{\partial x} - u \frac{\partial v}{\partial x} + 2buv \right) dx &= -\frac{1}{2} \int_{P_1 M} \left[\frac{\partial(uv)}{\partial x} + 2u \left(bv - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] dx = \\ &= \frac{1}{2} (uv)|_{P_1} - \frac{1}{2} (uv)|_M - \int_{P_1 M} u \left(bv - \frac{\partial v}{\partial x} \right) dx; \end{aligned}$$

аналогично,

$$\frac{1}{2} \int_{MP_2} \left(v \frac{\partial u}{\partial y} - u \frac{\partial v}{\partial y} + 2auv \right) dy = \frac{1}{2} (uv)|_{P_2} - \frac{1}{2} (uv)|_M + \int_{MP_2} u \left(av - \frac{\partial v}{\partial y} \right) dy.$$

После проведенных преобразований интегральное соотношение (8.49) приобретает следующую форму:

$$\begin{aligned} (uv)|_M &= \frac{(uv)|_{P_1} + (uv)|_{P_2}}{2} - \frac{1}{2} \int_{P_2P_1} \left(v \frac{\partial u}{\partial x} - u \frac{\partial v}{\partial x} + 2buv \right) dx + \\ &+ \frac{1}{2} \int_{P_2P_1} \left(v \frac{\partial u}{\partial y} - u \frac{\partial v}{\partial y} + 2auv \right) dy - \int_{P_1M} u \left(bv - \frac{\partial v}{\partial x} \right) dx + \\ &+ \int_{MP_2} u \left(av - \frac{\partial v}{\partial y} \right) dy - \int_{\Omega} (v\mathcal{L}u - u\mathcal{L}^*v) dx dy. \quad (8.50) \end{aligned}$$

Значения производных u_x, u_y на линии L известны. Действительно, $\mathbf{e}_x = \alpha \mathbf{e}_s + \beta \mathbf{e}_l$, поэтому на L

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \alpha \frac{\partial u}{\partial s} + \beta \frac{\partial u}{\partial l} = \alpha u'_0(s) + \beta u_1(s);$$

производная u_y на L выражается подобным образом. Интегралы по Γ_x, Γ_y и Ω , где u, u_x, u_y не заданы, можно аннулировать, потребовав, чтобы выполнялось

$$\mathcal{L}^*v = 0, \quad (v_x - bv)|_{\Gamma_x} = 0, \quad (v_y - av)|_{\Gamma_y} = 0,$$

причем v в точке M равна 1 (последнее условие необходимо для единственности, иначе функция v определена с точностью до постоянного множителя). Итак, функция двух точек $v = \mathcal{R}(P, M)$, называемая функцией Римана, является решением следующей задачи Гурса:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^*_{(x,y)} \mathcal{R}(x, y; x_0, y_0) &= 0, \quad (x, y) \in \Omega, \\ \mathcal{R}(x, y_0; x_0, y_0) &= e^{\int_{x_0}^x b(x, y_0) dx}, \\ \mathcal{R}(x_0, y; x_0, y_0) &= e^{\int_{y_0}^y a(x_0, y) dy}, \end{aligned} \quad (8.51)$$

где символ (x, y) у $\mathcal{L}^*$ обозначает дифференцирование по переменным x и y . В итоге решение задачи Коши (8.47) выражается

формулой (она следует из (8.50))

$$u(M) = \frac{(u\mathcal{R})|_{P_1} + (u\mathcal{R})|_{P_2}}{2} + \frac{1}{2} \int_{P_1 P_2} \left(\mathcal{R} \frac{\partial u}{\partial x} - u \frac{\partial \mathcal{R}}{\partial x} + 2bu\mathcal{R} \right) dx - \\ - \frac{1}{2} \int_{P_1 P_2} \left(\mathcal{R} \frac{\partial u}{\partial y} - u \frac{\partial \mathcal{R}}{\partial y} + 2au\mathcal{R} \right) dy - \int_{\Omega} \mathcal{R} f dx dy. \quad (8.52)$$

Чтобы решить задачу Коши

$$2x^2 u_{xx} - 5xy u_{xy} + 2y^2 u_{yy} + 2x(1 + 3x^3 y^3) u_x + y(2 - 3x^3 y^3) u_y = 0, \\ u|_{y=x} = 0, \quad u_y|_{y=x} = x^2 e^{\frac{x^6}{2}}, \quad (8.53)$$

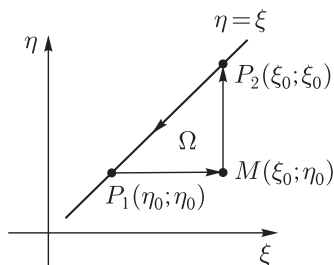


Рис. 8.3

где $1 < x$, $1 < y$, нужно привести дифференциальное уравнение к каноническому виду. В данном случае есть два характеристических уравнения $y' = -y/(2x)$, $y' = -2y/x$, общие интегралы которых $xy^2 = C_1$, $x^2 y = C_2$; эти интегралы определяют замену

$$\xi = xy^2, \quad \eta = x^2 y. \quad (8.54)$$

В переменных ξ, η уравнение (8.53) принимает форму $u_{\xi\eta} - \eta u_{\eta} = 0$, а задача Гурса (8.51) запишется в виде (рис. 8.3)

$$\mathcal{R}_{\xi\eta} + \frac{\partial}{\partial \eta}(\eta \mathcal{R}) = 0, \quad (\xi, \eta) \in \Omega, \quad (8.55)$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta_0; \xi_0, \eta_0) = e^{-\eta_0(\xi - \xi_0)}, \quad \mathcal{R}(\xi_0, \eta; \xi_0, \eta_0) = 1. \quad (8.56)$$

Посредством интегрирования по η уравнение (8.55) в частных производных сводится к обыкновенному:

$$\frac{\partial}{\partial \eta}(R_{\xi} + \eta R) = 0 \implies R_{\xi} + \eta R = f(\xi),$$

где $f(x)$ — произвольная непрерывная функция. Далее можно применить, например, метод вариации постоянной

$$R = C(\xi) e^{-\xi\eta}, \quad \text{где } C'(\xi) = f(\xi) e^{-\xi\eta}.$$

Отсюда

$$C(\xi) = \int_0^{\xi} f(s) e^{\eta s} ds + g(\eta),$$

так что общее решение уравнения (8.55) будет

$$\mathcal{R} = \left[\int_0^\xi f(s) e^{\eta s} ds + g(\eta) \right] e^{-\xi \eta}, \quad (8.57)$$

где $g(\eta)$ — произвольная дифференцируемая функция. Функции f и g связаны условиями (8.56) на характеристиках:

$$\int_0^\xi f(s) e^{\eta_0 s} ds + g(\eta_0) = e^{\xi_0 \eta_0}, \quad \int_0^{\xi_0} f(s) e^{\eta s} ds + g(\eta) = e^{\xi_0 \eta}.$$

Из первого тождества (после дифференцирования по ξ) следует, что $f(\xi) = 0$, тогда из второго — $g(\eta) = e^{\xi_0 \eta}$. Эти две функции определяют частное решение $\mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = e^{\eta(\xi_0 - \xi)}$.

Так как $u|_L = 0$, $f = 0$, то формула (8.52) упрощается:

$$u(M) = \frac{1}{2} \int_{P_1 P_2} \mathcal{R} \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} d\xi - \frac{\partial u}{\partial \eta} d\eta \right). \quad (8.58)$$

Для вычисления производных u_ξ и u_η на L их нужно выразить через производные u_x и u_y , значения которых на L известны из начальных условий. По правилу дифференцирования сложной функции и на основании преобразования переменных (8.54),

записанного в форме $x = \sqrt[3]{\frac{\eta^2}{\xi}}$, $y = \sqrt[3]{\frac{\xi^2}{\eta}}$,

$$u_\xi = u_x x_\xi + u_y y_\xi = -\frac{1}{3\xi} \sqrt[3]{\frac{\eta^2}{\xi}} u_x + \frac{2}{3\sqrt[3]{\xi\eta}} u_y,$$

$$u_\eta = u_x x_\eta + u_y y_\eta = \frac{2}{3\sqrt[3]{\xi\eta}} u_x - \frac{1}{3\eta} \sqrt[3]{\frac{\xi^2}{\eta}} u_y.$$

Пусть $y = y(x)$ — уравнение линии L . Если точка (x, y) принадлежит L , то $u(x, y(x)) \equiv u_0(x)$, откуда в результате дифференцирования по x получается соотношение $u_x + u_y y' = u'_0$. В данном случае $y = x$, $u_0(x) = 0$, поэтому $y' = 1$, $u'_0 = 0$, следовательно, $u_x = -u_y$ на L . Таким образом, на линии L , уравнение которой в новых переменных $\eta = \xi$,

$$u_\xi = \frac{1}{3\sqrt[3]{\xi^2}} u_y + \frac{2}{3\sqrt[3]{\xi^2}} u_y = \frac{1}{\sqrt[3]{\xi^2}} u_1(\sqrt[3]{\xi}),$$

$$u_\eta = -\frac{2}{3\sqrt[3]{\xi^2}} u_y - \frac{1}{3\sqrt[3]{\xi^2}} u_y = -\frac{1}{\sqrt[3]{\xi^2}} u_1(\sqrt[3]{\xi}),$$

где $u_1(x) = x^2 \exp\left(\frac{x^6}{2}\right)$. Решение задачи Коши завершается вычислением интеграла в формуле (8.58):

$$\begin{aligned} u(M) &= \int_{\eta_0}^{\xi_0} \mathcal{R}(\xi, \xi; \xi_0, \eta_0) u_1(\sqrt[3]{\xi}) \frac{d\xi}{\sqrt[3]{\xi^2}} = \int_{\eta_0}^{\xi_0} e^{\xi\xi_0 - \frac{\xi^2}{2}} d\xi = \\ &= \int_{\eta_0}^{\xi_0} e^{-\left(\frac{\xi - \xi_0}{\sqrt{2}}\right)^2 + \frac{\xi_0^2}{2}} d\xi = e^{\frac{\xi_0^2}{2}} \int_0^{\frac{\xi_0 - \eta_0}{\sqrt{2}}} e^{-t^2} dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{\frac{\xi_0^2}{2}} \operatorname{erf}\left(\frac{\xi_0 - \eta_0}{\sqrt{2}}\right). \end{aligned}$$

В старых переменных (они обозначаются x, y вместо x_0, y_0)

$$u(x, y) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{\frac{x^2 y^4}{2}} \operatorname{erf}\left(\frac{xy(y-x)}{\sqrt{2}}\right).$$

Решить методом Римана задачи 8.313–8.331.

8.313. $u_{xy} + \frac{u_y}{2\sqrt{x}(\sqrt{x} + \sqrt{y})} = 0, \quad 1 < x, 1 < y,$

$$u|_{y=x} = \frac{\pi}{2\sqrt[4]{x}}, \quad u_y|_{y=x} = \frac{1}{8x\sqrt[4]{x}}.$$

8.314. $u_{xy} - yu_x - yu_y + (y^2 - 1)u = 0, \quad (x, y) \in \mathbb{R}^2,$
 $u|_{y=-x} = 0, \quad u_y|_{y=-x} = 1.$

8.315. $u_{xy} + xu_x + u = 0, \quad 1 < x, -\infty < y < \infty,$
 $u|_{y=x} = 1, \quad u_y|_{y=x} = 0.$

8.316. $u_{xy} + 2xyu_x + 4yu = 0, \quad 1 < x, -\infty < y < \infty,$
 $u|_{y=\sqrt{x}} = 0, \quad u_y|_{y=\sqrt{x}} = 2\sqrt{x}.$

8.317. $2x^2u_{xx} + 2xyu_{xy} + x(1 - 2y)u_x - yu_y + yu = 0,$
 $0 < x, 0 < y, \quad u|_{y=\sqrt{x}} = \sqrt{x}e^{\sqrt{x}} + 1, \quad u_y|_{y=\sqrt{x}} = \sqrt{x}e^{\sqrt{x}} + 2.$

8.318. $u_{xx} - 2xu_{xy} - xu_x + 2(x^2 - 1)u_y + xu = 0, \quad 0 < x, 0 < y,$
 $u|_{y=0} = x^2, \quad u_y|_{y=0} = 1 - \frac{x}{2}.$

8.319. $xu_{xy} - yu_{yy} - x^3u_x - u_y + x^2(x^2y - 1)u = 0,$
 $-\infty < x < \infty, 1 < y, \quad u|_{y=1} = x^2 + 1, \quad u_y|_{y=1} = x^2(3 - x^2).$

- 8.320.** $xy^3u_{xx} - xy^3u_{yy} - y^3(1 - 16x^4)u_x + x^3(1 + 16x^2y^2)u_y = 0$,
 $-\infty < x < \infty$, $1 < y$, $u|_{y=1} = x^2(2 - x^2)$, $u_y|_{y=1} = 4(x^2 - 1)$.
- 8.321.** $xu_{xx} - yu_{yy} + \frac{3}{4}u_x + \frac{1}{4}\left(\sqrt{\frac{y}{x}} - 2\right)u_y = 0$, $x < 1$, $1 < y$,
 $u|_{y=1} = (1 - \sqrt{x})^2$, $u_y|_{y=1} = 1 - \sqrt{x}$.
- 8.322.** $x^2u_{xx} - y^2u_{yy} + 5xu_x - yu_y + 4u = 0$, $-\infty < x < \infty$, $1 < y$,
 $u|_{y=1} = (x + 1)^2$, $u_y|_{y=1} = 2(2x^2 + 1)$.
- 8.323.** $u_{xx} - e^{-2y}u_{yy} + (2 + e^{-y})u_x + 2e^{-y}(e^{-y} - 1)u_y + 2e^{-y}u = 0$,
 $-\infty < x < \infty$, $0 < y$, $u|_{y=0} = (1 - x)e^{-2x}$, $u_y|_{y=0} = e^{-2x}$.
- 8.324.** $xu_{xx} - 4xyu_{yy} + u_x - 2(x + \sqrt{y})u_y = 0$, $1 < x$, $1 < y$,
 $u|_{y=1} = 2 \ln \frac{x}{x+1}$, $u_y|_{y=1} = -\frac{1}{x+1}$.
- 8.325.** $xu_{xx} - 4x^3u_{yy} + [8x^2(x^2 + y) - 1]u_x - 16x^3(x^2 + y)u_y = 0$,
 $-\infty < x < \infty$, $0 < y$, $u|_{y=0} = 0$, $u_y|_{y=0} = e^{-x^4}$.
- 8.326.** $8x^2u_{xx} - 20xyu_{xy} + 8y^2u_{yy} + 4x(2 + 3xy\sqrt{xy})u_x +$
 $+ 2y(4 - 3xy\sqrt{xy})u_y + 9xy\sqrt{xy}u = 0$, $1 < x$, $1 < y$,
 $u|_{xy=1} = 2$, $u_y|_{xy=1} = 3x$.
- 8.327.** $x^2u_{xx} - 3xyu_{xy} + 2y^2u_{yy} + x(1 + 2xy\sqrt{y})u_x +$
 $+ 2y(1 - xy\sqrt{y})u_y = 0$, $1 < x$, $1 < y$,
 $u|_{y=1} = \frac{1}{x^2}e^x$, $u_y|_{y=1} = \frac{3x-4}{2x^2}e^x$.
- 8.328.** $4x^2u_{xx} + 10xyu_{xy} + 4y^2u_{yy} + x(4 + 3\sqrt{xy})u_x +$
 $+ 2y(2 + 3\sqrt{xy})u_y + 9u = 0$, $1 < x$, $1 < y$,
 $u|_{x=y} = 0$, $u_y|_{x=y} = \frac{1}{x}$.
- 8.329.** $\sin 2xu_{xx} - 2y \cos 2xu_{xy} - y^2u_{yy} + 2 \cos^2 xu_x = 0$,
 $\frac{\pi}{4} < x < \frac{3\pi}{4}$, $1 < y$, $u|_{x=\frac{\pi}{2}} = y$, $u_x|_{x=\frac{\pi}{2}} = 1$.
- 8.330.** $u_{tt} = a^2u_{xx} + c^2u = 0$, $-\infty < x < \infty$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_0(x)$, $u_t(x, 0) = u_1(x)$.
- 8.331.** $u_{tt} = a^2u_{xx} - c^2u = 0$, $-\infty < x < \infty$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_0(x)$, $u_t(x, 0) = u_1(x)$.

8.2. Квазилинейные уравнения с частными производными

Пример 8.12. Задача Коши для квазилинейного уравнения. Квазилинейное уравнение имеет вид

$$a(x, y, u)u_x + b(x, y, u)u_y = c(x, y, u), \quad (8.59)$$

где a, b, c — функции класса C^1 в некоторой области Ω пространства $\mathbb{R}^3$ переменных x, y, u , при этом $a^2 + b^2 \neq 0$ в Ω . Пусть линия $L_0 = \{x, y : x = \xi(\tau), y = \eta(\tau), \tau_1 < \tau < \tau_2\}$ класса C^1 в плоскости xOy не имеет ни самопересечений, ни особых точек ($\dot{x}^2 + \dot{y}^2 \neq 0$, где точка обозначает дифференцирование по параметру). Постановка задачи Коши: решить уравнение (8.59) в классе достаточно гладких в Ω функций $u(x, y)$ при условии $u|_{L_0} = u_0(\tau)$. Так как решение $u = u(x, y)$ представляет собой поверхность (ее называют интегральной поверхностью) в $\mathbb{R}^3$, то задачу Коши для уравнения (8.59) можно интерпретировать геометрически как поиск интегральной поверхности, которая содержит линию $L = \{x, y, u : x = \xi(\tau), y = \eta(\tau), u = u_0(\tau), \tau_1 < \tau < \tau_2\}$.

С геометрической точки зрения уравнение (8.59) задает в $\mathbb{R}^3$ поле направлений $\mathbf{l} = (a, b, c)$. Линия Γ , касательный вектор в каждой точке которой коллинеарен вектору $\mathbf{l}$ с началом в той же точке, называется характеристикой уравнения (8.59). Если характеристику задать параметрически,

$$\Gamma = \{x, y, u : x = x(s), y = y(s), u = u(s), s_1 < s < s_2\},$$

то x, y, u — компоненты касательного вектора. Следовательно, функции $x(s), y(s), u(s)$ удовлетворяют системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dx}{ds} = a, \quad \frac{dy}{ds} = b, \quad \frac{du}{ds} = c. \quad (8.60)$$

Поскольку a, b, c не зависят явно от s , то система (8.60) инвариантна относительно преобразования $s \rightarrow s - s_0$, т. е. значение параметра на характеристике определяется с точностью до аддитивной постоянной. Применение характеристик для построения решения уравнения (8.59) основано на свойстве: любая интегральная поверхность состоит из характеристик ([31]).

Итак, для решения задачи Коши

$$(x + y)u_x - u_y = yu, \quad (8.61)$$

$$u|_{y=x+1} = x e^{-\frac{1}{2}x^2} \quad (8.62)$$

необходимо найти характеристики уравнения (8.61). Соответствующая система (8.60)

$$\frac{dx}{ds} = x + y, \quad \frac{dy}{ds} = -1, \quad \frac{du}{ds} = yu$$

имеет решение

$$\begin{aligned} x &= C_1 e^s + s + 1 - C_2, \\ y &= -s + C_2, \\ u &= C_3 e^{-\frac{(C_2-s)^2}{2}}. \end{aligned} \quad (8.63)$$

Здесь линия L_0 — прямая $y = x + 1$, параметрические уравнения которой $x = \tau$, $y = \tau + 1$, а линия L (8.62) описывается уравнениями

$$x = \tau, \quad y = \tau + 1, \quad u = \tau e^{-\frac{\tau^2}{2}}. \quad (8.64)$$

Искомая интегральная поверхность $u = u(x, y)$ состоит из тех характеристик Γ семейства (8.63), которые имеют общую точку с линией L (8.64). Пусть $s = 0$ и τ — координаты этой точки на Γ и L соответственно, тогда

$$\begin{cases} \tau = C_1 + 1 - C_2, \\ 1 + \tau = C_2, \\ \tau e^{-\frac{\tau^2}{2}} = C_3 e^{-\frac{C_2^2}{2}}. \end{cases}$$

Решение этой системы — $C_1 = 2\tau$, $C_2 = 1 + \tau$, $C_3 = \tau e^{\frac{1+\tau}{2}}$. Подстановка значений C_1 , C_2 , C_3 в соотношения (8.63) превращает их в параметрические уравнения интегральной поверхности $u = u(x, y)$, т. е.:

$$\begin{aligned} x &= 2\tau e^s + s - \tau, \\ y &= -s + \tau + 1, \\ u &= \tau e^{s - \frac{1}{2}(s-\tau)^2}. \end{aligned}$$

В данном случае можно исключить параметры и представить решение задачи Коши в виде

$$u(x, y) = \frac{1}{2}(x + y - 1)e^{-\frac{1}{2}(y-1)^2}.$$

8.332. Показать, что производные u_x и u_y решения $u(x, y)$ задачи Коши для квазилинейного уравнения (8.59) могут иметь разрыв на характеристиках этого уравнения.

Методом характеристик решить задачи Коши 8.333–8.382 в области $\Omega = \{x, y: -\infty < x < \infty, y_0(x) < y\}$.

8.333. $au_x + u_y = 0, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = u_0(x).$

8.334. $(x-1)u_x - u_y = 0, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = x.$

8.335. $y^2 u_x + xu_y = 0, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = e^{-x^2}.$

8.336. $xu_x + (y^2 + 1)u_y = 0, \quad 1 < y, \quad u(x, 1) = x.$

8.337. $(x^2 + y^2)u_x + xu_y = 0, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = x^2(x^2 + 1).$

8.338. $e^y u_x + x^2 u_y = 0, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = x.$

8.339. $e^{x^2} u_x + 4\sqrt{y} u_y = 0, \quad \pi < y, \quad u(x, \pi) = \operatorname{Erf} x.$

8.340. $yu_x + \operatorname{ch} x u_y = 0, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = e^x.$

8.341. $y \operatorname{th} x u_x + 2(y^2 + 1)u_y = 0, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = \operatorname{sh} x.$

8.342. $xu_x + 2yu_y = 0, \quad 1 < y, \quad u(x, 1) = \operatorname{erf} x.$

8.343. $(x+y)u_x + yu_y = 0, \quad 1 < y, \quad u(x, 1) = e^{-x}.$

8.344. $(x^2 + y^2)u_x + xyu_y = 0, \quad 1 < y, \quad u(x, 1) = x^2.$

8.345. $3xyu_x - (3 + y^2)u_y = 0, \quad 1 < y, \quad u(x, 1) = 8x.$

8.346. $u_x + u_y + 2yu = 0, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = \sin x.$

8.347. $u_x + u_y + xu = 0, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = \cos x.$

8.348. $u_x + xu_y + x^3 yu = 0, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = e^{-x^2}.$

8.349. $u_x - 2u_y = 2u - y, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = x^2 - \frac{1}{2}.$

8.350. $2u_x + u_y = u + xy, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = x^2 - x - 4.$

8.351. $u_x + y^2 u_y = yu + \operatorname{sh} x, \quad 1 < y, \quad u(x, 1) = e^x.$

8.352. $xu_x + u_y = \frac{u}{3}, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = \frac{1}{x^2 + 1}.$

8.353. $xu_x - 2yu_y = (x + \sqrt{y})u, \quad x^2 < y, \quad u(x, x^2) = x^2.$

8.354. $yu_x + u_y = xu, \quad 0 < y, \quad u(x, 0) = x^3.$

8.355. $yu_x - xu_y = -2y^2, \quad x < y, \quad u(x, x) = -x^2.$

- 8.356.** $yu_x - xu_y = -\frac{x}{y^2 + 1}$, $0 < y$, $u(x, 0) = \cos x$.
- 8.357.** $xu_x - yu_y = x \ln y$, $1 < y$, $u(x, 1) = (x + 1)^2$.
- 8.358.** $(x + y)u_x + (4x + y)u_y = 4u$, $0 < y$, $u(x, 0) = x^4$.
- 8.359.** $u_x - 2xu_y = -\frac{2x}{y}u$, $x^2 < y$, $u|_{y=x^2} = 1$.
- 8.360.** $xu_x + yu_y = y$, $1 < y$, $u(x, 1) = \operatorname{Erf} x$.
- 8.361.** $2yu_x - u_y = e^y$, $0 < y$, $u(x, 0) = \sqrt[3]{x}$.
- 8.362.** $yu_x + u_y = 1 - xy$, $x^2 + y^2 < 1$, $u|_{x^2+y^2=1} = \frac{1}{2}(x^2 + y^2)$.
- 8.363.** $2yu_x - u_y = (2y^2 - x)u$, $1 < y$, $u(x, 1) = (1 + x)e^x$.
- 8.364.** $yu_x + xu_y = 2xy(x^2 + y^2)u$, $0 < y$, $u(x, 0) = 1$.
- 8.365.** $u_x - \sqrt{y}u_y = -xu^{-1}$, $1 < y$, $u(x, 1) = 2\sqrt{1 + x}$.
- 8.366.** $u_x + 2\sqrt{y}u_y = 2e^{-u}$, $0 < y$, $u(x, 0) = \ln(1 + x)$.
- 8.367.** $yu u_x + xu_y = 0$, $x < y$, $u(x, x) = 1$.
- 8.368.** $e^y u_x + e^{2x} u u_y = 0$, $x < y$, $u(x, x) = \operatorname{sech} x$.
- 8.369.** $u u_x + 2e^{-y} u_y = 0$, $0 < y$, $u(x, 0) = x$.
- 8.370.** $u^2 u_x + 2xy u_y = 0$, $1 < y$, $u(x, 1) = x$.
- 8.371.** $(y + u)u_x + (x + u)u_y = x + y$, $-2x < y$, $u(x, -2x) = 7x$.
- 8.372.** $yu_x - 2x(u^2 - x^2)u_y = 0$, $0 < y$, $u(x, 0) = \sqrt{x^2 + 1}$.
- 8.373.** $yu u_x - xu_y = xy$, $\sqrt{3}x < y$, $u(x, x\sqrt{3}) = 1 + 2x$.
- 8.374.** $u u_x + x\sqrt{y}u_y = xu$, $0 < y$, $u(x, 0) = \frac{1}{4}(x^2 + 1)$.
- 8.375.** $u u_x + (x + u)u_y = xu$, $x < y$, $u(x, x) = \frac{x^2 + 2}{4}$.
- 8.376.** $x^3 u_x - 2(2x^2 y + u)u_y = -2x^2 u$,
 $x^4 < y$, $u(x, x^4) = x^4 - x^2 + 1$.
- 8.377.** $u u_x + 2xy u_y = 2xu$, $5x < 2y$, $u\left(x, \frac{5x}{2}\right) = \frac{5x^2}{4}$.
- 8.378.** $xu_x + u u_y = x^2 y + u$, $3 < y$, $u(x, 3) = 5x$.
- 8.379.** $xu_x - 2u^2 u_y = -u$, $x^2 + 1 < y$, $u(x, x^2 + 1) = 1$.

8.380. $(y + u)u_x + xu_y = xy$, $0 < y$, $u(x, 0) = x^2$.

8.381. $2(y + u)u_x - xu_y = -x$, $x^2 + 4y^2 < 1$, $u|_{x^2+4y^2=1} = y$.

8.382. $xu_x - u^2u_y = -yu$, $\sqrt{x^2 + 1} < y$, $u(x, \sqrt{x^2 + 1}) = 1$.

8.383. Найти общее решение уравнения (1.8), в котором заданы функция $a(\sigma) = k\sigma$, где $k = C$, и функция $\rho(x) = (C_1 + C_2x)^{-\frac{4}{3}}$ (см. работу [54]).

Пример 8.13. Решения квазилинейных уравнений обладают качественно иными свойствами по сравнению с решениями линейных уравнений. Решение линейной задачи Коши

$$\begin{aligned} u_t + c_0 u_x &= 0, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) &= u_0(x) \end{aligned} \quad (8.65)$$

имеет вид $u(x, t) = u_0(x - c_0 t)$ (задача 8.333); гладкость функции $u(x, t)$ определяется гладкостью $u_0(x)$. Иначе обстоит дело в случае квазилинейных уравнений; существуют такие, сколь угодно гладкие функции $u_0(x)$, что соответствующее решение не обладает даже первой производной: $|\nabla u| = \infty$ при некотором t_k («градиентная катастрофа»). Чтобы в этом убедиться, достаточно решить задачу Коши для простейшего квазилинейного уравнения:

$$u_t + uu_x = 0, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \quad (8.66)$$

$$u(x, 0) = u_0(x). \quad (8.67)$$

Характеристическая система (пример 8.12)

$$\frac{dx}{ds} = u, \quad \frac{dt}{ds} = 1, \quad \frac{du}{ds} = 0$$

имеет решение

$$x = C_3 s + C_1, \quad t = s + C_2, \quad u = C_3. \quad (8.68)$$

Точка $s = 0$ характеристики (8.68) принадлежит линии (8.67), параметрическая форма которой $x = \tau$, $t = 0$, $u = u_0(\tau)$, при условии, что $C_1 = \tau$, $C_2 = 0$, $C_3 = u_0(\tau)$. Решение задачи Коши получается в параметрической форме

$$x = u_0(\tau)s + \tau, \quad t = s, \quad u = u_0(\tau),$$

или, после исключения s , в виде

$$u = u_0(\tau), \quad x = u_0(\tau)t + \tau. \quad (8.69)$$

Отсюда $u_x = u'_0(\tau) \tau_x$, $1 = u'_0(\tau) \tau_x t + \tau_x$, следовательно,

$$u_x = \frac{u'_0(\tau)}{1 + t u'_0(\tau)}.$$

При $t(\tau) = -1/u'_0(\tau) > 0$ производная $u_x = \infty$ и решение становится неоднозначным. Если функция $t(\tau) = -1/u'_0(\tau)$ достигает наименьшего значения при $\tau = \tau_k$, то время и место возникновения неоднозначности в решении соответственно равны

$$t_k = -\frac{1}{u'_0(\tau_k)}, \quad x_k = u_0(\tau_k)t_k + \tau_k.$$

Пусть $u_0(x) = 1 + e^{-x^2}$. В этом случае

$$u_{0x} = \frac{u'_0(\tau)}{1 - 2\tau e^{-\tau^2}}, \quad t(\tau) = \frac{e^{\tau^2}}{2\tau}.$$

Функция $t(\tau)$ достигает наименьшего значения при $\tau_k = 1/\sqrt{2}$, следовательно,

$$t_k = \sqrt{\frac{e}{2}}, \quad x_k = \frac{2 + \sqrt{e}}{\sqrt{2}}.$$

Уравнение (8.66) является частным случаем уравнения

$$a(x, t, u)u_t + b(x, t, u)u_x = 0, \quad (8.70)$$

характеристики которого — плоские кривые. Действительно, характеристическая система

$$\frac{dx}{ds} = b, \quad \frac{dt}{ds} = a, \quad \frac{du}{ds} = 0 \quad (8.71)$$

имеет решение

$$x = x(s), \quad t = t(s), \quad u = C, \quad (8.72)$$

которое представляет собой линию в плоскости $u = C$, параллельной координатной плоскости xOu (рис. 8.4). Обычно при решении уравнения (8.70) используется проекция линии (8.72) на плоскость xOu , и эта проекция Γ называется характеристикой уравнения (8.70). При таком определении характеристика задается двумя первыми уравнениями системы (8.71), а третье трактуется следующим образом: решение $u(x, t)$ уравнения (8.70) сохраняет на характеристике Γ постоянное значение. Пусть Γ есть характеристика уравнения (8.66), выходящая из точки x_0 оси Ox (рис. 8.5). Так как $u(x, t) = u_0(x_0)$ на Γ , то уравнение характеристики имеет вид

$$\frac{dx}{dt} = u_0(x_0),$$

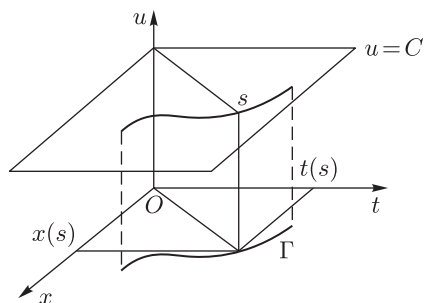


Рис. 8.4

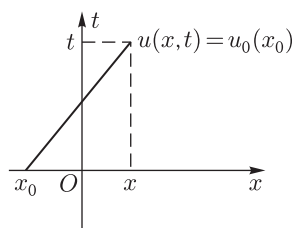


Рис. 8.5

а сама характеристика — прямая линия $x = u_0(x_0)t + x_0$. Следовательно,

$$u(x, t) = u_0(x_0), \quad x = u_0(x_0)t + x_0,$$

т. е. получено решение задачи Коши в форме (8.69).

Решение $u(x, t) = u_0(x - c_0 t)$ уравнения (8.65) описывает волну, каждая точка которой движется с одной и той же скоростью c_0 . Поэтому форма волны не изменяется. Семейство характеристик — параллельные прямые $x = c_0 t + x_0$, угловой коэффициент которых (рис. 8.6) $\tan \alpha = 1/c_0$. В случае уравнения (8.66)

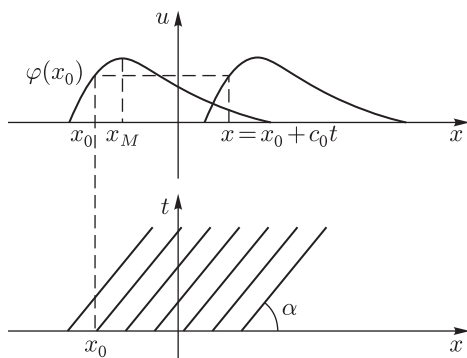


Рис. 8.6

точка с абсциссой x_0 перемещается со скоростью $u_0(x_0)$. Поэтому точки с бóльшим начальным отклонением имеют бóльшую скорость. Профиль волны искажается (рис. 8.7), и в некоторый момент t_k волна «опрокидывается». При $t > t_k$ решение становится неоднозначным и не соответствует физике процесса в рамках принятой модели. Характеристики $x = u_0(x_0)t + x_0$ — прямые, угол наклона которых сначала растет ($x \rightarrow x_M - 0$), затем

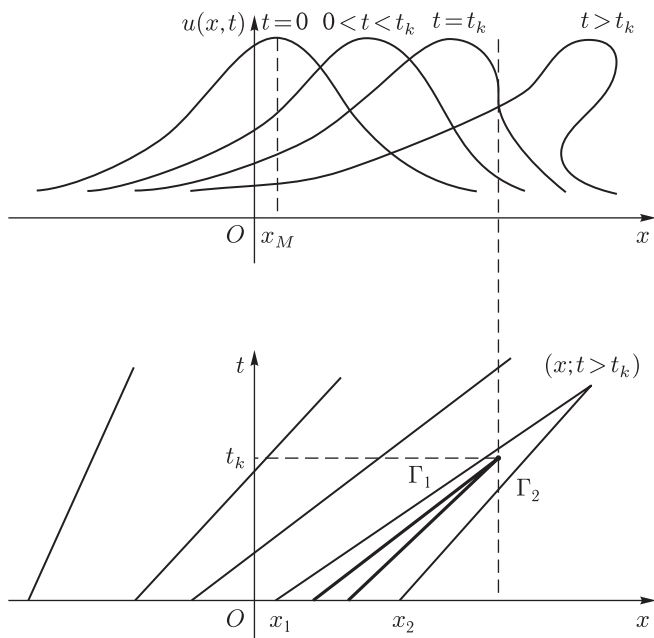


Рис. 8.7

убывает. Поэтому при некотором $t = t_k$ характеристики пересекаются. В точке $(x, t > t_k)$ их пересечения решение неоднозначно, так как $u(x, t) = u_0(x_1)$ и $u(x, t) = u_0(x_2)$, а $u_0(x_1) \neq u_0(x_2)$. В момент времени t_k возникновения неоднозначности $|\nabla u| = \infty$.

8.384. Определить время существования однозначного решения задачи Коши

$$u_t + u u_x = 0, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \quad u(x, 0) = u_0(x),$$

где:

$$1) u_0(x) = 1 + (1 - x^2)\eta(1 - |x|); \quad 2) u_0(x) = 1 + \eta\left(\frac{\pi}{2} - |x|\right) \cos x.$$

8.385. При начальных условиях 1) и 2) предыдущей задачи найти время существования однозначного решения задачи Коши для уравнения

$$u_t + u^2 u_x = 0.$$

8.386. Решить задачу Коши

$$u_t + u u_x = 0, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) = u_0(x).$$

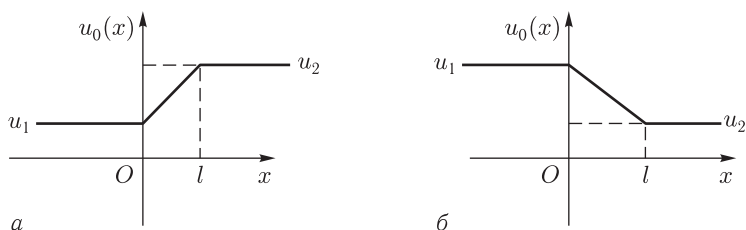


Рис. 8.8

График функции $u_0(x)$ дан на рис. 8.8. Показать, что в случае б) решение становится неоднозначным. Определить время существования однозначного решения.

8.387. Решить задачу Коши

$$u_t + uu_x = 0, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = \begin{cases} u_1, & x < 0, \\ u_2, & x > 0. \end{cases}$$

Найти время t_k существования однозначного решения; построить диаграмму характеристик на плоскости xOt .

8.388. Решить задачу Коши

$$u_t + f(u)u_x = 0, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = \begin{cases} u_1, & x < 0, \\ u_2, & x > 0, \end{cases}$$

$$u_1 < u_2,$$

где $f(u) > 0$, $f'(u)$ — знакоопределенная функция.

8.389. Транспортная задача. По шоссе без въездов и съездов движутся машины; плотность потока машин $q(x, t)$, а их число на единицу длины шоссе $u(x, t)$. Для описания движения нужно задать зависимость между q и u . Пусть $q = \frac{\alpha}{2}u^2$, $\alpha > 0$. Найти плотность машин, если $u(x, 0) = u_0(x)$ (рис. 8.9). Показать также, что в некоторый момент t_k возникает скачок плотности.

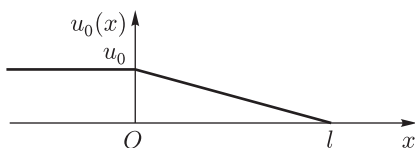


Рис. 8.9

8.390. По длинной тонкой трубке с пористой стенкой течет газ (см. задачу 1.236, т. 1.), плотность потока которого $q = \frac{\alpha}{2}u^2$, $\alpha > 0$. При каком условии возникает скачок плотности газа?

8.391. Найти плотность газа в трубке (задача 8.390), если начальная плотность $u_0(x)$ задана графически на рис. 8.9. При условии $\alpha u_0 > \beta l$ определить момент t_k возникновения скачка плотности и построить график функции $u = u(x, t_k)$.

8.392. Решить смешанную задачу

$$\begin{aligned} u_t + uu_x &= 0, \quad Vt < x, \quad 0 < t, \\ u(Vt, t) &= u_1, \\ u(x, 0) &= u_2, \\ \text{где } V &\leq u_1 < u_2. \end{aligned}$$

8.393. Решить смешанную задачу (см. [54])

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(u)}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} &= 0, \quad 0 < x, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) &= 0, \quad u(0, t) = u_0(t), \\ f(u) \in C^2, \quad u_0(t) \in C^1(t \geq 0), \quad u_0(t) &= u'(0) = 0. \end{aligned}$$

Найти расстояние, на котором возникает неоднозначное решение, и время его возникновения.

8.394. Решить смешанную задачу (см. [73])

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(u)}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} &= 0, \quad 0 < x, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) &= 0, \quad u(0, t) = u_0(t), \\ f(u) &= u + k \frac{u^2}{2}, \quad k > 0, \quad u_0(t) = \eta(t). \end{aligned}$$

8.395. Решить задачу

$$\begin{aligned} u_t + (ku + m)u_x &= 0, \quad Vt < x, \quad 0 < t, \\ u(Vt, t) &= u_1, \\ u(x, 0) &= u_2, \end{aligned}$$

где $k > 0$, m , u_1 , u_2 — постоянные величины; указать условия, при которых решение непрерывно при любом $t \geq 0$.

8.396. Решить задачу

$$\begin{aligned} u_x + f(u)u_y &= 0, & x \leq 0, & y > x, \\ & & x > 0, & y > -kx, \\ u(x, 0) &= u_1, & x \leq 0, \\ u(x, -kx) &= u_2, & x > 0, \end{aligned}$$

где $k > 0$, $u_1 > u_2$ — константы, $f(u) > 0$, $f'(u) > 0$.

8.397. Напряжение $\sigma(x, t)$ в цилиндрическом стержне с постоянной плотностью является решением нелинейного интегрального уравнения (1.14) (см. задачу 1.38, т. 1). Найти $\sigma(x, t)$ в стержне ($0 < x < \infty$), если $\sigma(x, 0) = 0$, $\sigma(0, t) = \mu(t)$, $\mu(0) = \mu'(0) = 0$, $\mu(t) \in C^1(0 \leq t)$. Определить время t_k возникновения ударной волны.

8.398. Решить предыдущую задачу в приближении малых колебаний (см. задачу 1.39, т. 1).

8.399. На однородный полуограниченный цилиндрический стержень ($0 < x < \infty$) с момента $t = 0$ действует продольная сила, объемная плотность которой $F(t)\mathbf{e}_u$. Смещение $u(x, t)$ сечения с координатой x из положения равновесия удовлетворяет нелинейному дифференциальному уравнению (1.13), т. 1. Решить задачу о движении стержня, если: $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$, $u(0, t) = \mu(t)$, $\mu(0) = \mu'(0) = 0$, $\mu(t) \in C^1(t \geq 0)$.

8.3. Гиперболические системы квазилинейных уравнений

Пример 8.14. Изучение ряда физических процессов сводится к решению систем квазилинейных уравнений вида

$$\sum_{j=1}^2 p_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial t} + q_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x} = c_j, \quad i = 1, 2, \quad (8.73)$$

где $p_{ij}(x, t, u_1, u_2)$, $q_{ij}(x, t, u_1, u_2) \in C^1$, $c_j(x, t, u_1, u_2) \in C$ в некоторой области переменных x, t, u_1, u_2 , а $u_1(x, t)$ и $u_2(x, t)$ — неизвестные функции. Другая форма записи системы (8.73)

$$Pu_t + Qu_x = c, \quad (8.74)$$

где $P = (p_{ij})$, $Q = (q_{ij})$ — матрицы 2×2 , c и u — векторы-столбцы с компонентами c_1, c_2 и u_1, u_2 соответственно.

Если $\det P \neq 0$, то посредством умножения на P^{-1} слева система (8.74) приводится к нормальной форме

$$u_t + Au_x = b, \quad (8.75)$$

или

$$\begin{cases} u_{1t} + a_{11}u_{1x} + a_{12}u_{2x} = b_1, \\ u_{2t} + a_{21}u_{1x} + a_{22}u_{2x} = b_2. \end{cases} \quad (8.76)$$

Пусть $a^2 + b^2 = N^2 \neq 0$, тогда выражение

$$a u_t + b u_x = N \left(\frac{a}{N} u_t + \frac{b}{N} u_x \right) = N(\mathbf{l} \nabla u)$$

представляет собой производную функции $u(x, t)$ по направлению вектора $\mathbf{l}$, компоненты которого $l_x = b/N$, $l_t = a/N$. С этой точки зрения конструкция уравнений (8.76) такова, что в каждом из них, например в первом, функции u_1 и u_2 дифференцируются по разным направлениям. Однако можно образовать такую линейную комбинацию этих уравнений, что в результирующем уравнении дифференцирование обеих функций будет производиться по единому направлению. Действительно, пусть $h = (h_1 \ h_2)$ — вектор-строка, тогда линейная комбинация уравнений (8.76)

$$h u_t + h A u_x = h b$$

будет обладать указанным свойством, если $hA = \lambda h$, т. е. h — левый собственный вектор матрицы A , соответствующий собственному значению λ . Если в каждой точке (x, t, u_1, u_2) некоторой области оба собственных значения вещественны и различны, то система (8.75) называется гиперболической в этой области. Пусть в этом случае λ_k — собственные значения, $h^k = (h_1^k, h_2^k)$, $k = 1, 2$ — соответствующие собственные векторы матрицы A , тогда гиперболическую систему можно записать в характеристической форме

$$\sum_{j=1}^2 h_j^k \left(\frac{\partial u_j}{\partial t} + \lambda_k \frac{\partial u_j}{\partial x} \right) = f_k, \quad k = 1, 2. \quad (8.77)$$

В каждом из уравнений обе функции дифференцируются по направлению

$$\mathbf{l}_k = \left\{ \frac{\lambda_k}{\sqrt{\lambda_k^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{\lambda_k^2 + 1}} \right\}, \quad k = 1, 2.$$

Направление l_k называется характеристическим направлением системы (8.74), а линия Γ_k , касательная к которой в каждой точке (x, t) совпадает с характеристическим направлением в этой точке, называется характеристикой системы. Отсюда следует, что характеристики определяются уравнениями

$$\frac{dx}{d\tau} = \lambda_k, \quad \frac{dt}{dx} = 1, \quad k = 1, 2,$$

либо (при $\tau = t$)

$$\frac{dx}{dt} = \lambda_k, \quad k = 1, 2.$$

Применяется еще одна форма записи системы (8.77)

$$\sum_{j=1}^2 h_j^k \left(\frac{du_j}{dt} \right)_k = f_k, \quad k = 1, 2, \quad (8.78)$$

где $\left(\frac{du}{dt} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} + \lambda \frac{\partial u}{\partial x}$ — производная по t функции $u(x, t)$ в направлении $\frac{dx}{dt} = \lambda$.

Из характеристической формы посредством замены зависимых переменных получается более простая система, в каждом уравнении которой содержатся производные только одной функции. Решение этой задачи дано в [73]. Здесь приводятся два частных случая.

1. Элементы матрицы A системы (8.75) не зависят от переменной u : $A = A(x, t)$. Преобразование переменных

$$r_k = \sum_{j=1}^2 h_j^k u_j, \quad k = 1, 2, \quad (8.79)$$

является взаимно однозначным, так как якобиан преобразования $J = \det H$ не равен нулю ($H = (h_j^k)$ — неособая матрица). Замена переменных (8.79) в системе (8.78), записанной в форме

$$\left(\frac{d}{dt} \sum_{j=1}^2 h_j^k u_j \right)_k - \sum_{j=1}^2 \left(\frac{dh_j^k}{dt} \right)_k = f_k(x, t, u_1, u_2), \quad k = 1, 2,$$

приводит к следующему результату:

$$\left(\frac{dr_k}{dt} \right)_k = g_k(x, t, r_1, r_2), \quad k = 1, 2. \quad (8.80)$$

Переменные r_1 и r_2 называются инвариантами Римана, а система (8.80) — системой в инвариантах.

2. Элементы матрицы A не зависят от x, t : $A = A(u)$. Для дифференциальной формы $h_1^k du_1 + h_2^k du_2$ существует интегрирующий множитель $\mu_k(u)$, умножение на который превращает эту форму в полный дифференциал

$$\mu_k \sum_{j=1}^2 h_j^k du_j = dr_k, \quad k = 1, 2. \quad (8.81)$$

Так как

$$\frac{D(r_1, r_2)}{D(u_1, u_2)} = \det H \neq 0,$$

то соотношения (8.81) устанавливают взаимно однозначное соответствие между u_1, u_2 и r_1, r_2 . Если теперь умножить уравнения (8.78) на соответствующие интегрирующие множители μ_1 и μ_2 и перейти от u_1, u_2 к r_1, r_2 , то получится система в инвариантах

$$\left(\frac{dr_k}{dt} \right)_k = g_k(x, t, r_1, r_2), \quad k = 1, 2. \quad (8.82)$$

Частным случаем системы (8.75) является линейная система

$$\begin{cases} \operatorname{sh} 2x \cdot u_t + \operatorname{sh}(x+t) \cdot u_x - \operatorname{sh}(x-t) \cdot v_x = 0, \\ \operatorname{sh} 2x \cdot v_t - \operatorname{sh}(x-t) \cdot u_x + \operatorname{sh}(x+t) \cdot v_x = 0. \end{cases} \quad (8.83)$$

Задача на собственные значения для матрицы A сводится к решению алгебраической системы уравнений

$$(h_1, h_2) \cdot \begin{pmatrix} \frac{\operatorname{sh}(x+t)}{\operatorname{sh} 2x} - \lambda & -\frac{\operatorname{sh}(x-t)}{\operatorname{sh} 2x} \\ -\frac{\operatorname{sh}(x-t)}{\operatorname{sh} 2x} & \frac{\operatorname{sh}(x+t)}{\operatorname{sh} 2x} - \lambda \end{pmatrix} = 0.$$

Если $\lambda_1 = \operatorname{sh} t \operatorname{cosech} x$, $\lambda_2 = \operatorname{ch} t \operatorname{sech} x$, то определитель системы равен нулю; собственным значениям $\lambda_{1,2}$ соответствуют собственные векторы $h^1 = (1, 1)$, $h^2 = (1, -1)$. Следовательно, система является гиперболической, характеристическая форма которой имеет вид

$$\begin{cases} u_t + \lambda_1 u_x + v_t + \lambda_1 v_x = 0, \\ u_t + \lambda_2 u_x - (v_t + \lambda_2 v_x) = 0. \end{cases}$$

Замена переменных $r_1 = u + v$, $r_2 = u - v$ по формуле (8.79) приводит к системе в инвариантах

$$\begin{cases} \frac{\partial r_1}{\partial t} + \lambda_1 \frac{\partial r_1}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial r_2}{\partial t} + \lambda_2 \frac{\partial r_2}{\partial x} = 0. \end{cases} \quad (8.84)$$

8.400. Показать, что волновое уравнение $u_{tt} = a^2 u_{xx}$ приводится к системе

$$\begin{cases} u_t - a v_x = 0, \\ v_t - a u_x = 0. \end{cases}$$

Доказать, что эта система является гиперболической и преобразовать ее: 1) к характеристической форме; 2) к инвариантам.

8.401. Одномерное плоское изэнтропическое движение идеального газа характеризуется функциями $v(x, t)$ (скорость газа) и $c(x, t)$ (скорость звука в газе), которые удовлетворяют системе квазилинейных уравнений (задача 1.329, т. 1)

$$\begin{cases} v_t + v v_x + \frac{2}{\gamma - 1} c c_x = 0, \\ c_t + \frac{\gamma - 1}{2} c v_x + v c_x = 0. \end{cases} \quad (8.85)$$

Доказать, что это — гиперболическая система, характеристическая форма которой

$$\begin{cases} v_t + (v + c) v_x + \frac{2}{\gamma - 1} (c_t + (v + c) c_x) = 0, \\ v_t + (v - c) v_x - \frac{2}{\gamma - 1} (c_t + (v - c) c_x) = 0. \end{cases}$$

8.402. Доказать, что система (8.85), записанная в инвариантах Римана r , s , имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial r}{\partial t} + (\alpha r + \beta s) \frac{\partial r}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial s}{\partial t} + (\beta r + \alpha s) \frac{\partial s}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (8.86)$$

где

$$\begin{aligned} r &= v + \frac{2}{\gamma - 1} c, & \alpha r + \beta s &= v + c, & \alpha &= \frac{1}{2} + \frac{\gamma - 1}{4}, \\ s &= v - \frac{2}{\gamma - 1} c, & \beta r + \alpha s &= v - c, & \beta &= \frac{1}{2} - \frac{\gamma - 1}{4}. \end{aligned}$$

Показать, что все газодинамические величины (v , c , ρ , P) выражаются через r и s .

8.403. Изэнтропическое движение идеального газа, при котором один из инвариантов постоянен, называется бегущей волной или волной Римана: r -волна при $s = s_0$, s -волна при $r = r_0$.

1. Показать, что в акустическом приближении волны Римана — это бегущие линейные волны, профиль и скорость которых постоянны: $r = f_1(x - c_0 t)$, $s = f_2(x + c_0 t)$, $c_0 = P_0 \gamma / \rho_0$.

2. Волна Римана, в которой плотность ρ выделенного элемента газа, перемещающегося в пространстве, увеличивается со временем, называется волной сжатия, в противном случае — волной разрежения. Доказать, что критерием волны сжатия является условие $\frac{\partial r}{\partial x} < 0$ для r -волны, $\frac{\partial s}{\partial x} < 0$ для s -волны, а волны разрежения — $\frac{\partial r}{\partial x} > 0$ для r -волны, $\frac{\partial s}{\partial x} > 0$ для s -волны.

3. Если в некоторый момент времени $t > 0$ градиент давления (или другой газодинамической величины) становится неограниченным, то в этот момент в газе образуется ударная волна (скачок давления). Показать, что ударная волна возникает в бегущей волне сжатия и не возникает в волне разрежения.

8.404. При некоторых условиях стационарное течение идеального газа описывается системой уравнений (см. задачу 1.331, т. 1)

$$\begin{cases} (v_x^2 - c^2) \frac{\partial v_x}{\partial x} + 2v_x v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + (v_y^2 - c^2) \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (8.87)$$

где

$$c^2 = c_0^2 - \frac{\gamma - 1}{2}(v^2 - v_0^2). \quad (8.88)$$

1. Показать, что при $v > c$ (сверхзвуковое течение) система является гиперболической.

2. Преобразовать систему к характеристической форме.

3. Доказать, что каждая из двух характеристик Γ_1 и Γ_2 , пересекающих линию тока L в некоторой точке M , образует с этой линией один и тот же острый угол $\alpha = \arcsin \frac{c}{v}$ (рис. 8.10).

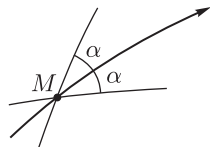


Рис. 8.10

4. Перейти к новым зависимым переменным θ и φ по следующим формулам:

$$v_x = v \cos \theta, \quad v_y = v \sin \theta, \quad c = v \sin \varphi, \quad (8.89)$$

и записать систему (8.87) в инвариантах

$$\begin{cases} \frac{\partial r_1}{\partial x} + \lambda_1 \frac{\partial r_1}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial r_2}{\partial x} + \lambda_2 \frac{\partial r_2}{\partial y} = 0, \end{cases} \quad (8.90)$$

где $\lambda_{1,2} = \operatorname{tg}(\theta \pm \varphi)$, $r_{1,2} = F(\varphi) \pm \theta$,

$$F(\varphi) = \sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \operatorname{tg} \varphi \right) - \varphi.$$

8.405. Движение одномерных гравитационных волн на мелкой воде (задача 1.328, т. 1) описывается системой квазилинейных уравнений

$$\begin{cases} h_t + u h_x + h u_x = 0, \\ u_t + g h_x + u u_x = 0. \end{cases} \quad (8.91)$$

Доказать, что это гиперболическая система и привести ее к инвариантам Римана.

8.406. Показать, что система уравнений, описывающих ионно-акустические колебания в локально нейтральной плазме (см. задачу 1.465, п. 3), является гиперболической и записать ее в инвариантах Римана.

8.407. В одномерной изотропной среде распространяется (вдоль оси Ox) электромагнитная волна, электрическое и магнитное поле которой $\mathbf{E} = \mathcal{E}(x, t) \mathbf{e}_y$, $\mathbf{H} = \mathcal{H}(x, t) \mathbf{e}_z$. Диэлектрическая проницаемость среды зависит от E и равна (по определению) $\varepsilon(E) = \frac{dD}{dE}$, где индукция D есть некоторая функция E (см. [49]). Показать, что: 1) функции E и H удовлетворяют системе квазилинейных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{c}{\varepsilon(E)} \frac{\partial H}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial H}{\partial t} + c \frac{\partial E}{\partial x} &= 0; \end{aligned}$$

2) эта система является гиперболической; 3) если H есть функция E (или наоборот), то возможно возникновение ударной электромагнитной волны.

Пример 8.15. Постановка задачи Коши для гиперболической системы квазилинейных уравнений: в некоторой окрестности

дуги $L = \{x, t: x = x(\tau), y = y(\tau), \tau_1 < \tau < \tau_2\}$ найти решение системы

$$\begin{aligned} u_t + \mathcal{A}u_x &= b, \\ u|_L &= u_0(\tau). \end{aligned}$$

Решить задачу Коши

$$\begin{cases} \operatorname{sh} 2x u_t + \operatorname{sh}(x+t) u_x - \operatorname{sh}(x-t) v_x = 0, \\ \operatorname{sh} 2x v_t - \operatorname{sh}(x-t) u_x + \operatorname{sh}(x+t) v_x = 0, \\ -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) = e^x - 1, \quad v(x, 0) = e^{-x} - 1. \end{cases}$$

Преобразование системы к инвариантам (пример 8.14) сводит задачу к двум независимым задачам Коши

$$\begin{aligned} \operatorname{sh} x r_{1t} + \operatorname{sh} t r_{1x} &= 0, & \operatorname{ch} x r_{2t} + \operatorname{ch} t r_{2x} &= 0, \\ -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, & & -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ r_1(x, 0) &= 2 \operatorname{ch} x - 2, & r_2(x, 0) &= 2 \operatorname{sh} x. \end{aligned}$$

Отсюда $r_1(x, t) = 2(\operatorname{ch} x - \operatorname{ch} t)$, $r_2(x, t) = 2(\operatorname{sh} x - \operatorname{sh} t)$, следовательно,

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{1}{2}(r_1 + r_2) = e^x - e^t, \\ v(x, t) &= \frac{1}{2}(r_1 - r_2) = e^{-x} - e^{-t}. \end{aligned}$$

8.408. Решить задачу 8.123, преобразовав ее в эквивалентную задачу для гиперболической системы (см. задачу 8.400).

Решить задачи Коши 8.409–8.448 для систем уравнений в области $\Omega = \{x, t: -\infty < x < \infty, t_0 < t\}$.

$$\mathbf{8.409.} \quad \begin{cases} u_t + 7u_x - 8v_x = 0, \\ v_t + 2u_x - 3v_x = 0, \\ u(x, 0) = 2x, \quad v(x, 0) = x + 1, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$\mathbf{8.410.} \quad \begin{cases} u_t + 11u_x + v_x = 0, \\ v_t - 8u_x + 2v_x = 0, \\ u(x, 1) = -2x + 13, \quad v(x, 1) = x^2 - 4x - 4, \quad t_0 = 1. \end{cases}$$

$$\mathbf{8.411.} \quad \begin{cases} u_t + 17u_x + 2v_x = 0, \\ v_t + 13u_x + 6v_x = 0, \\ u(x, 0) = 2x^2 + x, \quad v(x, 0) = -13x^2 + x, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$\mathbf{8.412.} \quad \begin{cases} 24u_t - 13u_x - 7v_x = 0, \\ 24v_t - 245u_x + v_x = 0, \\ u(x, 0) = 1, \quad v(x, 0) = -48x^2, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.413. \begin{cases} u_t + 5u_x + 21v_x = 0, \\ v_t + 2u_x + 4v_x - u = 0, \\ u(x, 0) = x, \quad v(x, 0) = -\frac{8}{3}(x + 5), \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.414. \begin{cases} u_t + u_x + 2tv_x - v = 0, \\ v_t + 2tu_x + v_x - u = 0, \\ u(x, 0) = \operatorname{sh} x, \quad v(x, 0) = \operatorname{ch} x, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.415. \begin{cases} 11xu_t - tu_x + 2tv_x = 0, \\ 11xv_t + 60tu_x + tv_x = 0, \\ u(x, 0) = 11x^2, \quad v(x, 0) = -11x^4, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.416. \begin{cases} 21tu_t - (15x - 2t)u_x + (3x + t)v_x = 0, \\ 21tv_t + 10(3x + t)u_x - (6x - 5t)v_x = 0, \\ u(x, 2) = x, \quad v(x, 2) = 2x, \quad t_0 = 2. \end{cases}$$

$$8.417. \begin{cases} u_t + \left(\frac{3}{2}t - 1\right)u_x - \left(\frac{3}{2}t + 1\right)v_x = 0, \\ v_t - \left(\frac{3}{2}t + 1\right)u_x + \left(\frac{3}{2}t - 1\right)v_x = 0, \\ u(x, 1) = 3x^2 + 20x, \quad v(x, 0) = 3x^2 + 4x + 24, \quad t_0 = 1. \end{cases}$$

$$8.418. \begin{cases} 2xtu_t - (x^2 + t^2)u_x + (x^2 - t^2)v_x - v = 0, \\ 2xtv_t + (x^2 - t^2)u_x - (x^2 + t^2)v_x - u = 0, \\ u(x, 1) = 2x^2, \quad v(x, 1) = 2, \quad t_0 = 1. \end{cases}$$

$$8.419. \begin{cases} 5tu_t + (4t^2 + 3x)u_x + (x - 2t^2)v_x = 0, \\ 5tv_t + 6(x - 2t^2)u_x + 2(x + 3t^2)v_x = 0, \\ u(x, 1) = 5x, \quad v(x, 1) = 5x^2, \quad t_0 = 1. \end{cases}$$

$$8.420. \begin{cases} u_t + \frac{1}{2}\left(t - \frac{x}{t+1}\right)u_x - \left(t + \frac{x}{1+t}\right)v_x = 0, \\ v_t - \frac{1}{4}\left(t + \frac{x}{t+1}\right)u_x + \frac{1}{2}\left(t - \frac{x}{1+t}\right)v_x = 0, \\ u(x, 0) = 1, \quad v(x, 0) = x, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.421. \begin{cases} u_t + \operatorname{sh} x u_x - \operatorname{ch} x v_x = 0, \\ v_t - \operatorname{ch} x u_x + \operatorname{sh} x v_x = 0, \\ u(x, 0) = 1, \quad v(x, 0) = x, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.422. \begin{cases} 7u_t + \left(x + \frac{6}{1+t}\right)u_x - 3\left(x - \frac{1}{1+t}\right)v_x = 0, \\ 7v_t - 2\left(x - \frac{1}{1+t}\right)u_x + \left(6x + \frac{1}{1+t}\right)v_x = 0, \\ u(x, 0) = 4x, \quad v(x, 0) = -x, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.423. \begin{cases} \operatorname{sh} 2x u_t + \operatorname{ch}(x-t)u_x + \operatorname{ch}(x+t)v_x = 0, \\ \operatorname{sh} 2x v_t + \operatorname{ch}(x+t)u_x + \operatorname{ch}(x-t)v_x = 0, \\ u(x, 0) = \operatorname{sh}^2 x, \quad v(x, 0) = 1, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.424. \begin{cases} 2x^2 t u_t - (x^3 - t^3)u_x + (x^3 + t^3)v_x = 0, \\ 2x^2 t v_t + (x^3 + t^3)u_x - (x^3 - t^3)v_x = 0, \\ u(x, 0) = \operatorname{sh}^2 x^3, \quad v(x, 0) = \operatorname{ch}^2 x^3, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.425. \begin{cases} \operatorname{sh} x u_t - 2 \operatorname{sh} t v_x = 2 \operatorname{sh}(x+t), \\ 2 \operatorname{sh} x v_t - \operatorname{sh} t u_x = 0, \\ u(x, 0) = \operatorname{ch}^2 x, \quad v(x, 0) = e^{-x}, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.426. \begin{cases} u_t + t u_x - x v_x = 0, \\ v_t - x u_x + t v_x = 0, \\ u(x, 0) = x + 1, \quad v(x, 0) = 1, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.427. \begin{cases} u_t + 2x u_x + 6x^2 v_x = 0, \\ v_t + u_x + 3x v_x = 0, \\ u(x, 0) = 2x, \quad v(x, 0) = 1 - x, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.428. \begin{cases} u_t + 2t u_x + t v_x = 0, \\ v_t + 6u_x + 3v_x = 0, \\ u(x, 0) = x^2, \quad v(x, 0) = 2x(1-x), \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.429. \begin{cases} 3u_t - 2v_t - 12u_x + 8v_x = 0, \\ 2u_t - 2v_t + 69u_x - 47v_x = 0, \\ u(x, 0) = 3x, \quad v(x, 0) = 5x, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.430. \begin{cases} 5xtu_t + 10xtv_t - (21x^2 - 16t^2)u_x + 2(7x^2 - 12t^2)v_x = 0, \\ 5xtu_t - 10xtv_t + (3x^2 - 8t^2)u_x - 2(x^2 - 6t^2)v_x = 0, \\ u(x, 1) = x^2 + 3x + 1, \quad v(x, 1) = -(x-1)^2, \quad t_0 = 1. \end{cases}$$

$$8.431. \begin{cases} (t+2)u_t + t v_t - 2(x-t)u_x - 2t v_x = 0, \\ t u_t + (t+2)v_t - 2t u_x - 2(x-t)v_x = 0, \\ u(x, 1) = \frac{3x}{2} - 1, \quad v(x, 1) = 1 - \frac{x}{2}, \quad t_0 = 1. \end{cases}$$

$$8.432. \begin{cases} 2xtu_t - 4xtv_t + (3x^2 - 14t^2)u_x - (3x^2 + 14t^2)v_x = 0, \\ 3xtu_t - 5xtv_t + (4x^2 - 19t^2)u_x - (4x^2 + 19t^2)v_x = 0, \\ u(x, 1) = \frac{x^4 - 5(x^2 + 1)}{x^2 + 1}, \quad v(x, 1) = \frac{(x^2 + 10)x^2}{x^2 + 1}, \quad t_0 = 1. \end{cases}$$

$$8.433. \begin{cases} u_t + vu_x = 0, \\ v_t + uv_x = 0, \\ u(x, 0) = 1, \quad v(x, 0) = x^3, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.434. \begin{cases} u_t + uu_x + v_x = 0, \\ v_t + vu_x + uv_x = 0, \\ u(x, 0) = \frac{2x + 3}{3}, \quad v(x, 0) = \frac{x^2}{9}, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.435. \begin{cases} u_t + vu_x + uv_x = 0, \\ v_t + 4uu_x + vv_x = 0, \\ u(x, 0) = \frac{1 - x}{4}, \quad v(x, 0) = \frac{3x - 1}{2}, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.436. \begin{cases} u_t + vu_x + \left(v - \frac{1}{4}\right)v_x = 0, \\ v_t + \left(u - \frac{1}{4}\right)u_x + uv_x = 0, \\ u(x, 0) = \cos^2 x, \quad v(x, 0) = \sin^2 x, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.437. \begin{cases} u_t + vu_x + uv_x = 0, \\ v_t + \frac{1}{u}u_x + vv_x = 0, \\ u(x, 0) = e^{2x}, \quad v(x, 0) = 2(x + 1), \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.438. \begin{cases} u_t + vu_x + vv_x = 0, \\ vv_t + u_x + v_x = 0, \\ u(x, 0) = x + \frac{1}{3}, \quad v(x, 0) = 1, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.439. \begin{cases} 3u_t + (7u + 2v)u_x + 2(u - v)v_x = 0, \\ 3v_t - 2(u - v)u_x + (2u + 7v)v_x = 0, \\ u(x, 0) = \frac{2}{3}(x - 3), \quad v(x, 0) = \frac{2}{3}(x + 3), \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.440. \begin{cases} u_t + t(u + v)u_x + t(u - v)v_x = 0, \\ v_t + t(u - v)u_x + t(u + v)v_x = 0, \\ u(x, 0) = x + 1, \quad v(x, 0) = x, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.441. \begin{cases} 2u_t + (tu - v)u_x + (tv - u)v_x = 0, \\ 2v_t + (tv - u)u_x + (tu - v)v_x = 0, \\ u(x, 0) = 2x, \quad v(x, 0) = 1, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.442. \begin{cases} 2u_t + [(t+2)u + tv]u_x + [tu + (t+2)v]v_x = 0, \\ 2v_t + [tu + (t+2)v]u_x + [(t+2)u + tv]v_x = 0, \\ u(x, 0) = 3x + 2, \quad v(x, 0) = x, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.443. \begin{cases} u_t + (u \cos^2 t - v \sin^2 t)u_x - (u \sin^2 t - v \cos^2 t)v_x = 0, \\ vt - (u \sin^2 t - v \cos^2 t)u_x + (u \cos^2 t - v \sin^2 t)v_x = 0, \\ u(x, 0) = 3x + 1, \quad v(x, 0) = -x + 1, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.444. \begin{cases} 2u_t + 3v_t + (7u + 8v)u_x + (8u + 7u)v_x = 0, \\ 3u_t - 4v_t + (2u - 5v)u_x - (5u - 2v)v_x = 0, \\ u(x, 0) = 2(x + 1), \quad v(x, 0) = x + 3, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.445. \begin{cases} 2u_t + 5v_t + (7u - 3v)u_x + (7u + 3u)v_x = 0, \\ 3u_t - 7v_t - 2(2u - 5v)u_x - 2(2u + 5v)v_x = 0, \\ u(x, 0) = x, \quad v(x, 0) = x - 3, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.446. \begin{cases} 10tu_t - 6tv_t + (5u - 3v)u_x - (3u - 5v)v_x = 0, \\ 4tu_t - 2tv_t + (2u - v)u_x - (u - 2v)v_x = 0, \\ u(x, 1) = 2x, \quad v(x, 1) = 0, \quad t_0 = 1. \end{cases}$$

$$8.447. \begin{cases} 10u_t + 8v_t - (2u + v)u_x - 4(u - v)v_x = 0, \\ 4u_t + 10v_t - (2u - 3v)u_x - 4uv_x = 0, \\ u(x, 0) = x + 6, \quad v(x, 0) = x, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.448. \begin{cases} (t+1)u_t + (t-1)v_t + uu_x + vv_x = 0, \\ (t-1)u_t + (t+1)v_t + vu_x + uv_x = 0, \\ u(x, 1) = 2x, \quad v(x, 1) = 0, \quad t_0 = 1. \end{cases}$$

$$8.449. \begin{cases} tu_t - (2t+1)v_t + t(2v-u)u_x + t(2u-5v)v_x = 0, \\ tu_t - (2t-1)v_t + t(2v-u)u_x + t(2u-3v)v_x = 0, \\ u(x, 0) = x, \quad v(x, 0) = x + 1, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.450. \begin{cases} u_t + v_t + t(3u - 2v)u_x - (2tu - 2tv - 3)v_x = 0, \\ 7u_t - 2v_t + (11tu - 6tv + 6)u_x + 2t(3u - 2v)v_x = 0, \\ u(x, 0) = 4x, \quad v(x, 0) = 5x, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.451. \begin{cases} 12u_t - 15v_t + 2e^t(u+v)u_x + ((2u-7v)e^t - 9)v_x = 0, \\ 15u_t - 12v_t - ((7u-2v)e^t - 9)u_x + 2e^t(u+v)v_x = 0, \\ u(x, 0) = 3x + 2, \quad v(x, 0) = 3x + 1, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.452. \quad \begin{cases} 3u_t - 5v_t + 4(u+v)u_x + 2(u-7v-16\sin t)v_x = 0, \\ 5u_t - 3v_t + 2(7u-v-16\sin t)u_x - 4(u+v)v_x = 0, \\ u(x,0) = \frac{4x+2}{8}, \quad v(x,0) = \frac{4x+1}{8}, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

$$8.453. \quad \begin{cases} 3u_t + v_t + (4u \operatorname{sh} t + 1)u_x + (4v \operatorname{sh} t + 3)v_x = 0, \\ u_t + 3v_t + (4v \operatorname{sh} t + 3)u_x + (4u \operatorname{sh} t + 1)v_x = 0, \\ u(x,0) = \frac{3x}{2}, \quad v(x,0) = \frac{x}{2}, \quad t_0 = 0. \end{cases}$$

Пример 8.16. Идеальный газ заполняет полубесконечную трубу с поршнем, который начиная с момента времени $t = 0$ движется по заданному закону. Нужно определить движение газа в трубе. Состояние газа определяется системой уравнений (см. задачу 1.329, т. 1)

$$\begin{cases} v_t + v v_x + \frac{2}{\gamma-1} c c_x = 0, \\ c_t + \frac{\gamma-1}{2} c v_x + v c_x = 0, \\ \mu(t) < x, \quad 0 < t, \\ v(\mu(t), t) = \mu'(t), \quad v(x, 0) = 0, \quad c(x, 0) = c_0, \end{cases}$$

где $\mu(t) \in C^1(t \geq 0)$. В инвариантах Римана $r(x, t)$, $s(x, t)$ эта задача ставится следующим образом (см. (8.86)):

$$\begin{cases} r_t + (\alpha r + \beta s)r_x = 0, \\ s_t + (\beta r + \alpha s)s_x = 0, \\ \mu(t) < x, \quad 0 < t, \\ r(x, 0) = \frac{2c_0}{\gamma-1}, \quad s(x, 0) = -\frac{2c_0}{\gamma-1}, \\ (r(x, t) + s(x, t))|_L = 2\mu'(t), \quad L = \{x, t: x = \mu(t), 0 \leq t\}. \end{cases}$$

Начальная скорость газа равна нулю, и в течение некоторого времени $v < c$, т. е. тангенс угла наклона характеристики Γ_s к оси Ox отрицателен. Поэтому характеристика с началом в точке x_0 оси Ox пересекает линию L (рис. 8.11). Инвариант $s(x, t) = s_0$ на Γ_s ; так как $s_0 = s(x_0, 0)$ не зависит от x_0 , то $s(x, t) \equiv s_0$, т. е.

$$v - \frac{2c}{\gamma-1} = -\frac{2c_0}{\gamma-1}. \quad (8.92)$$

Таким образом, в газе возникает r -волна Римана (см. задачу 8.403) и уравнение для $s(x, t)$ становится тождеством,

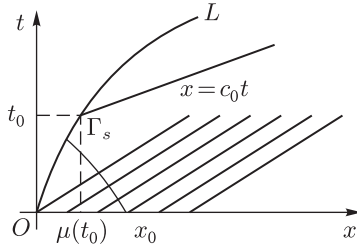


Рис. 8.11

а $r(x, t)$ — решением задачи

$$\begin{aligned} r_t + (\alpha r + \beta s_0) r_x &= 0, \quad \mu(t) < x, \quad 0 < t, \\ r(x, 0) &= \frac{2c_0}{\gamma - 1}, \\ r(\mu(t), t) &= 2\mu'(t) + \frac{2c_0}{\gamma - 1}. \end{aligned} \quad (8.93)$$

На характеристике Γ_r инвариант $r(x, t) = r_0$, следовательно, Γ_r — прямая линия. Пусть (x, t) — точка области, ограниченной положительной частью оси Ox и линией L , а Γ_r — характеристика, проходящая через эту точку. Если Γ_r пересекает ось Ox в точке x_0 , то $r(x, t) = r(x_0, 0)$, а угловой коэффициент характеристики

$$\frac{dx}{dt} = v(x_0, 0) + c(x_0, 0) = c_0.$$

Следовательно,

$$r(x, t) = \frac{2c_0}{\gamma - 1}, \quad x = c_0 t + x_0, \quad x \geq 0,$$

т. е.

$$r(x, t) = \frac{2c_0}{\gamma - 1}, \quad 0 \leq c_0 t \leq x.$$

Если Γ_r пересекает линию L в точке $(\mu(t_0), t_0)$, то с учетом (8.92) угловой коэффициент характеристики

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= v(\mu(t_0), t_0) + c(\mu(t_0), t_0) = \mu'(t_0) + \frac{\gamma - 1}{2} \mu'(t_0) + c_0 = \\ &= \frac{\gamma + 1}{2} \mu'(t_0) + c_0, \end{aligned}$$

поэтому при $\mu(t) \leq x \leq c_0 t$

$$r(x, t) = 2\mu'(t_0) + \frac{2c_0}{\gamma - 1}, \quad x = \mu(t_0) + \left(c_0 + \frac{\gamma + 1}{2} \mu'(t_0) \right) (t - t_0).$$

Решение исходной задачи можно найти либо по формулам

$$v + \frac{r+s}{2}, \quad c = \frac{\gamma-1}{4}(r-s),$$

либо, заметив, что на характеристиках каждая из функций v и c сохраняет постоянное значение. В итоге

$$\begin{aligned} v(x, t) &= 0, \\ c(x, t) &= c_0, \quad 0 \leq c_0 t \leq x, \\ v(x, t) &= \mu'(t_0), \\ c(x, t) &= c_0 + \frac{\gamma-1}{2} \mu'(t_0), \quad \mu(t) \leq x \leq c_0 t, \\ x &= \mu(t_0) + \left(c_0 + \frac{\gamma+1}{2} \mu'(t_0) \right) (t - t_0). \end{aligned} \tag{8.94}$$

8.454. Идеальный газ заполняет часть ($x > 0$) трубки ($-\infty < x < \infty$) и отделен от вакуума ($x < 0$) перегородкой. С какой скоростью будет двигаться газ, если перегородку убрать?

8.455. Идеальный газ находится в трубке ($-\infty < x < \infty$) с поршнем по одну сторону ($0 < x$) от поршня. Доказать, что: 1) при движении поршня по закону $x = -at^2/2$, $a > 0$, в газе возникает бегущая волна разрежения (см. задачу 8.403); 2) в момент $t_k = \frac{2c_0}{a(\gamma-1)}$ поршень отрывается от газа. Построить график зависимости от времени скорости элемента газа с начальной координатой $x = 0$.

8.456. Найти скорость газа в трубке (задача 8.455), если поршень движется по закону $x = -Vt\eta(t)$, $V > 0$.

8.457. Найти скорость газа в трубке (задача 8.455), если поршень движется по закону $x = at^2/2$, $a > 0$. Определить момент времени t_k образования ударной волны и ее положение x_k в этот момент.

8.458. Поршень в трубке с газом (задача 8.455) движется по закону $x = at^3$, $a > 0$. Определить момент времени t_k образования ударной волны и ее положение x_k в этот момент.

8.459. Показать, что скорость $v(x, t)$ газа в r -волне Римана является решением дифференциального уравнения

$$v_t + \left(c_0 + \frac{\gamma+1}{2} v \right) = 0. \tag{8.95}$$

8.460. Бесконечная трубка ($-\infty < x < \infty$) заполнена идеальным газом, начальная скорость которого равна нулю. Решить задачу о движении газа при $x > 0$, если его скорость в сечении $x = 0$ задана и равна $\mu(t)$.

8.461. В условиях предыдущей задачи определить время и место возникновения ударной волны, если:

$$1) \mu(t) = v_0 (1 - e^{-\alpha t}), \alpha > 0; \quad 2) \mu(t) = kt^n, \quad 0 \leq n.$$

8.462. Показать, что при целочисленном значении $\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)} = k$ общее решение системы уравнений газодинамики (8.85) может быть представлено в виде (см. [85])

$$x = \frac{1}{2}(r + s)t - \frac{k - 1}{2(2k - 1)} \frac{\partial^{2k-3}}{\partial r^{k-2} \partial s^{k-2}} \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial s} \right) \frac{f(r) - g(s)}{r - s},$$

$$t = \frac{\partial^{2k-2}}{\partial r^{k-1} \partial s^{k-1}} \frac{f(r) - g(s)}{r - s},$$

где r и s — инварианты Римана, $f(r)$ и $g(s)$ — произвольные достаточно гладкие функции, а k принимает значения 2, 3, 4.

8.463. Идеальная несжимаемая жидкость заполняет неглубокий канал с прямоугольным поперечным сечением, дно которого горизонтально. В жидкости возбуждается бегущая волна Римана, распространяющаяся в положительном направлении оси Ox (задача 8.405) в невозмущенную область, глубина жидкости в которой h_0 . Определить высоту $h(x, t)$ и скорость $u(x, t)$ жидкости, если $h(x, 0) = H(x) \geq h_0$, $H(x) \in C^1$. Определить время t_k существования непрерывного решения.

8.464. Задача о разрушении плотины. По одну сторону от вертикальной перегородки находится идеальная несжимаемая жидкость, высота которой h_0 (рис. 8.12). В момент времени $t = 0$ перегородка разрушается. Применяя уравнения мелкой воды (8.91), найти высоту $h(x, t)$ и скорость $v(x, t)$ жидкости, пренебрегая трением о поверхность дна. Каковы высота и скорость жидкости в сечении $x = 0$?

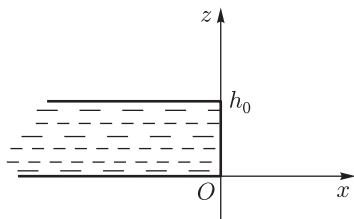


Рис. 8.12

8.465. Потенциальное обтекание цилиндрической поверхности $y = f(x)$ сверхзвуковым потоком идеального газа не зависит

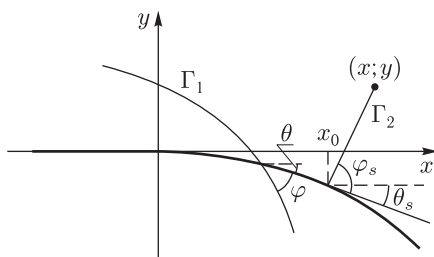


Рис. 8.13

от времени (рис. 8.13). На бесконечности (вверх по течению) скорость газа равна v_0 и направлена по оси Ox , плотность и давление ρ_0 и P_0 соответственно. 1) Найти кинематические параметры течения $\theta(x, y)$ и $\varphi(x, y)$ (задача 8.404), давление P на поверхности, если: а) S — выпуклая поверхность ($f(x) = 0$ при $x \leq 0$, $f'(x) < 0$, $f''(x) \leq 0$), $f \in C^2$, б) S — угол:

$$y = \begin{cases} 0, & x \leq 0, \\ -kx, & x > 0, \quad k > 0. \end{cases}$$

2) Доказать, что при обтекании вогнутой поверхности в газе возникает ударная волна.

8.466. В локально нейтральной плазме возбуждаются ионно-акустические волны (задачи 1.465, 2.406, т. 1). Возможно ли возникновение ударных волн?

Пример 8.17. Ударная волна в газе представляет собой перемещающуюся в пространстве сравнительно небольшую область, в которой происходит существенное изменение гидродинамических величин. При моделировании движения газа размерами указанной области пренебрегают и заменяют ее поверхностью, на которой гидродинамические величины изменяются скачком. Иными словами, ударная волна моделируется разрывными решениями системы уравнений гидродинамики. Для построения таких решений необходимо задать дополнительные граничные условия — соотношения между величинами скачков на поверхности разрыва, которые определяются законами сохранения (в случае газа сохраняются масса, импульс, энергия).

Пусть $u(x, t) \in C^1$ — объемная плотность, $q(x, t)$ — плотность потока некоторой физической величины. Закон сохранения (1.34) при отсутствии источников принимает форму

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0. \quad (8.96)$$

Если на поверхности $x = x(t)$, которая перемещается со скоростью $U = \dot{x}(t)$, функции $u(x, t)$ и $q(x, t)$ имеют скачки $[u]$ и $[q]$, где $[u] = u_1 - u_2$, $u_{1,2} = u(x(t) \pm 0, t)$ и т. д., то закон сохранения величины $u(x, t)$ в элементе объема $S\Delta x = SU\Delta t$ запишется в виде

$$u_2 S\Delta x - u_1 S\Delta x = q_2 S\Delta t - q_1 S\Delta t.$$

Вытекающая отсюда (при $\Delta t \rightarrow 0$) локальная форма закона сохранения устанавливает зависимость между величинами скачков

$$U[u] - [q] = 0. \quad (8.97)$$

Закон сохранения массы, плотность которой ρ , плотность потока ρV , задает граничное условие $U[\rho] - [\rho V] = 0$, или $[\rho v] = 0$, где $v = U - v$ — скорость поверхности разрыва относительно газа.

Чтобы представить закон сохранения импульса в форме (8.97), нужно найти выражение для плотности потока импульса. Оно получается преобразованием производной $(\rho V)_t$ с помощью уравнений (1.76), (1.77):

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} = V \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial v}{\partial t} = -V \frac{\partial(\rho V)}{\partial x} - \rho V \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x}(P + \rho V^2).$$

Это соотношение имеет вид (8.96)

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(P + \rho V^2) = 0,$$

так что плотность потока импульса равна $P + \rho V^2$. Соответствующее граничное условие $U[\rho V] - [P + \rho V^2] = 0$ принимает форму $[P + \rho v^2] = 0$.

Вывод третьего граничного условия проводится аналогично. Плотность энергии газа $\rho V^2/2 + \rho E$ складывается из кинетической и внутренней энергий. Скорость изменения плотности энергии преобразуется с помощью уравнений (1.76), (1.77) и соотношения (1.167), взятого в виде $\rho dw = dP$, где $w = E + P/\rho$ — энтальпия, или в виде $dE = P d\rho/\rho^2$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) &= \frac{V^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho V \frac{\partial V}{\partial t} = \\ &= -\frac{V^2}{2} \frac{\partial}{\partial x}(\rho V) - \rho V^2 \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho V \frac{V^2}{2} \right) - \rho V \frac{\partial w}{\partial x}, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) &= E \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial E}{\partial t} = \left(E + \frac{P}{\rho} \right) \frac{\partial \rho}{\partial t} = -w \frac{\partial}{\partial x}(\rho V). \end{aligned}$$

В результате получается уравнение непрерывности

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho V^2}{2} + \rho E \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho V \left(\frac{V^2}{2} + w \right) \right] = 0$$

и граничное условие $[v^2/2 + w] = 0$.

Таким образом, на поверхности разрыва выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} \rho_1 v_1 &= \rho_2 v_2, \\ P_1 + \rho_1 v_1^2 &= P_2 + \rho_2 v_2^2, \\ w_1 + \frac{v_1^2}{2} &= w_2 + \frac{v_2^2}{2}. \end{aligned} \quad (8.98)$$

8.467. Построить разрывное решение задачи 8.389 для $t > t_k$.

8.468. Пусть $u(x, t)$ — объемная плотность, $q(u)$ — плотность потока некоторой физической величины. Применяя закон сохранения для $u(x, t)$, построить разрывное решение смешанной задачи

$$\begin{aligned} u_t + f(u)u_x &= 0, \quad 0 < x, \quad t < 0, \\ u(x, 0) &= u_1, \quad u(0, t) = u_2, \\ f(u) &= q'(u) > 0, \quad q'(u_2) > q'(u_1). \end{aligned}$$

8.469. Установить следующие свойства ударной волны, возникающей при одномерном плоском движении идеального газа с постоянными теплоемкостями c_V , c_P :

1) давления P_1 , P_2 и плотности ρ_1 , ρ_2 связаны соотношением

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{(\gamma + 1)\rho_2 - (\gamma - 1)\rho_1}{(\gamma + 1)\rho_1 - (\gamma - 1)\rho_2}, \quad (8.99)$$

которое называется ударной адиабатой, или адиабатой Гюгонио;

2) на поверхности разрыва энтропия меняется скачком

$$S_2 - S_1 = c_V \ln \left[\frac{1 + \frac{\gamma+1}{2}z}{1 - \frac{\gamma-1}{2}z} (1+z)^{-\gamma} \right], \quad z = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1};$$

3) ударная волна является волной сжатия и перемещается из области с бóльшим давлением в область с меньшим давлением (теорема Цемплена), при этом отношение P_2/P_1 не ограничено сверху, а отношение ρ_2/ρ_1 ограничено;

4) относительно газа ударная волна движется со сверхзвуковой скоростью перед поверхностью разрыва и с дозвуковой скоростью — за ней.

8.470. Полуограниченная трубка ($0 < x$) с поршнем на конце заполнена идеальным газом, давление которого P_1 , плотность ρ_1 . Поршень начинает двигаться со скоростью $V > 0$. Найти положение ударной волны и распределение давления в газе.

8.471. При условиях, сформулированных в задаче 8.463, в жидкости возникают ударные волны и ее движение описывается разрывными решениями системы (8.91). Пусть $x(t)$ — положение поверхности разрыва, $U = \dot{x}(t)$ — ее скорость. Показать, что:

1) на поверхности разрыва выполняются граничные условия, выражающие законы сохранения массы и импульса,

$$\begin{cases} v_1 h_1 = v_2 h_2 = j, \\ v_1^2 h_1 + \frac{gh_1^2}{2} = v_2^2 h_2 + \frac{gh_2^2}{2}, \end{cases} \quad (8.100)$$

где $v = U - u$, $v_{1,2} = v(x(t) \pm 0, t)$ и т. д.;

2) закон сохранения энергии в форме (8.76) не выполняется из-за диссипации на разрыве

$$T_2 - T_1 = U[w] - [q_w] = \frac{gj}{4h_1 h_2} (h_2 - h_1)^3 \neq 0,$$

q_w — поток энергии через вертикальную полосу единичной ширины и высоты h ;

3) при переходе жидкости через поверхность разрыва (из области 1 в область 2 уровень повышается ($h_2 > h_1$), т. е. жидкость перемещается в область с большей высотой (это явление называется «прыжком» воды);

4) $v_1 > c_1 = \sqrt{gh_1}$, $v_2 < c_2 = \sqrt{gh_2}$ (см. задачу 8.469).

8.4. Ответы

8.1. $\xi = 4x + y$, $\eta = y$, $u_{\eta\eta} + 2u_{\xi} + u_{\eta} = 0$.

У к а з а н и е. Так как $b^2 - ac = 0$, то уравнение принадлежит параболическому типу. Существует лишь одно характеристическое уравнение $dy = 4dx$, общий интеграл которого $y = 4x + C$. Отображение T определяется формулами $\xi = 4x + y$, $\eta = \varphi_2(x, y)$, где $\varphi_2(x, y)$ — произвольная функция класса $C^2(\Omega(x, y))$, такая что якобиан $J(\varphi_1, \varphi_2) \neq 0$ в Ω . Здесь взята функция $\varphi_2 = y$.

8.2. $\xi = \frac{y}{x}$, $\eta = y$, $u_{\eta\eta} - \frac{\xi^2}{\eta^2} u_{\xi} = 0$.

8.3. $\xi = x^2 + y^2$, $\eta = x$, $u_{\eta\eta} + 2u_{\xi} = 0$.

8.4. $\xi = x - e^y$, $\eta = x$, $u_{\eta\eta} + \frac{u_{\xi} - u_{\eta}}{(\xi - \eta)^2} = 0$.

8.5. $\xi = x^2 \operatorname{ctg} y$, $\eta = x$, $u_{\eta\eta} - \frac{2\xi}{\eta^2} u_{\xi} = 0$.

$$8.6. \xi = x + y, \quad \eta = y - 5x, \quad u_{\xi\eta} - u_{\xi} - 2u_{\eta} = 0.$$

$$8.7. \xi = x^2 + y^2, \quad \eta = x, \quad u_{\xi\eta} + 4u_{\xi} - \frac{\eta}{\xi - \eta^2} u_{\eta} = 0.$$

$$8.8. \xi = x^2 + y^2, \quad \eta = x^2 - y^2, \quad u_{\xi\eta} + \frac{u_{\xi}}{2(\xi + \eta)} + \frac{u_{\eta}}{2(\xi - \eta)} = 0.$$

$$8.9. \xi = x^2 - 2\cos y, \quad \eta = x^2 + 2\cos y, \quad u_{\xi\eta} - \frac{\xi + \eta + 2}{8(\xi + \eta)}(u_{\xi} + u_{\eta}) = 0.$$

$$8.10. \xi = x + 4\sqrt{\operatorname{ch} y}, \quad \eta = x, \quad u_{\xi\eta} - \frac{u_{\eta}}{\xi - \eta} = 0.$$

$$8.11. \xi = \ln|y| - \operatorname{arctg} x, \quad \eta = y, \quad u_{\xi\eta} + \frac{1}{\eta} u_{\xi} = 0.$$

$$8.12. \xi = \frac{x^2}{2} - y - \frac{y^3}{3}, \quad \eta = y, \quad u_{\xi\eta} + \frac{u_{\eta}}{2(\xi + \eta^2 + \frac{1}{3}\eta^3)} = 0.$$

$$8.13. \xi = x^2 - y^2 - 2y, \quad \eta = y, \quad u_{\xi\eta} + \frac{u_{\eta}}{2(\xi + \eta^2 + 2\eta)} = 0.$$

$$8.14. \xi = y + \frac{1}{\sqrt{2}} \ln \left| \operatorname{tg} \frac{x}{2} \right|, \quad \eta = y - \frac{1}{\sqrt{2}} \ln \left| \operatorname{tg} \frac{x}{2} \right|, \\ u_{\xi\eta} + \frac{\xi + \eta}{8}(u_{\xi} + u_{\eta}) - \frac{1}{4}u = 0.$$

$$8.15. \xi = y + \sqrt{y^2 - x^2}, \quad \eta = y + \sqrt{y^2 - x^2}, \quad u_{\xi\eta} + \frac{\alpha u_{\xi} + \beta u_{\eta}}{\xi - \eta} = 0.$$

$$8.16. \xi = y - x, \quad \eta = y + x, \quad u_{\xi\eta} - \frac{\alpha u_{\xi} + \beta u_{\eta}}{\xi - \eta} = 0.$$

$$8.17. \xi = 5y - 3x, \quad \eta = 9x, \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} - u_{\xi} + u_{\eta} = 0.$$

$$8.18. \xi = x - y, \quad \eta = x, \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + \xi u_{\xi} + \eta u_{\eta} + u = 0.$$

$$8.19. \xi = 2x^3 - 3y^2, \quad \eta = 2x^3, \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} = 0.$$

$$8.20. \xi = x - \sin y, \quad \eta = \cos y, \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} = 0.$$

$$8.21. \xi = \ln|y|, \quad \eta = 2x, \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + u_{\xi} + u_{\eta} = 0.$$

$$8.22. \xi = \frac{x}{y} \cos \ln|y|, \quad \eta = \frac{x}{y} \sin \ln|y|, \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + \frac{2\xi - \eta}{\xi^2 + \eta^2} u_{\xi} + \frac{\xi + 2\eta}{\xi^2 + \eta^2} u_{\eta} = 0.$$

$$8.23. \xi = y - \operatorname{arctg} x, \quad \eta = \frac{1}{2} \ln(1 + x^2), \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + \frac{u_{\xi} + u_{\eta}}{\operatorname{sh} \eta} e^{\eta} = 0.$$

$$8.24. \xi = \sin x - y \cos x, \quad \eta = \cos x + y \sin x, \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + \frac{\xi u_{\xi} + \eta u_{\eta}}{\xi^2 + \eta^2 - 1} = 0$$

$$\text{или } \xi = x - \operatorname{arctg} y, \quad \eta = \frac{1}{2} \ln(1 + y^2), \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + (1 + \operatorname{cth} \eta) u_{\eta} = 0.$$

$$8.25. \xi = \sin x - y, \quad \eta = \cos x, \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + \frac{\xi u_{\xi} + \eta u_{\eta}}{\eta^2 - 1} = 0.$$

$$8.26. \xi = x - y, \quad \eta = \operatorname{ch} y, \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + \frac{\eta}{\eta^2 - 1}(u_{\xi} + u_{\eta}) = 0.$$

$$8.27. |x| < |y|, \quad \xi = y + \sqrt{y^2 - x^2}, \quad \eta = y - \sqrt{y^2 - x^2}, \quad u_{\xi,\eta} = 0,$$

$$|x| > |y|, \quad \xi = \ln|x|, \quad \eta = \arcsin \frac{y}{x}, \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} = 0.$$

$$8.28. |x| < |y|, \quad \xi = y + \sqrt{y^2 - x^2}, \quad \eta = y - \sqrt{y^2 - x^2}, \quad u_{\xi\eta} + \frac{1}{4} \frac{\xi + \eta}{\xi - \eta} (u_{\xi} + u_{\eta}) = 0,$$

$$|x| > |y|, \quad \xi = \sqrt{x^2 - y^2}, \quad \eta = y, \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} - \frac{\eta}{\xi} u_{\xi} = 0.$$

- 8.29.** $|x| > |y|$, $\xi = x + \sqrt{x^2 - y^2}$, $\eta = x - \sqrt{x^2 - y^2}$, $u_{\xi\eta} - \frac{a-1}{2} \frac{u_\xi - u_\eta}{\xi - \eta} = 0$,
 $|x| < |y|$, $\xi = \sqrt{y^2 - x^2}$, $\eta = x$, $u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + \frac{a-1}{\xi} u_\xi = 0$.
- 8.30.** $\xi = x - y$, $\eta = x^2 - y^2$, $u_{\xi\eta} + \frac{u_\xi + 2\eta u_\eta}{\xi^2 - 2\eta} = 0$.
- 8.31.** $y > 0$ $\xi = 2\sqrt{y} + \operatorname{erf} x$, $\eta = 2\sqrt{y} - \operatorname{erf} x$, $u_{\xi,\eta} - \frac{u_\xi - u_\eta}{2(\xi - \eta)} = 0$,
 $y < 0$, $\xi = 2\sqrt{-y}$, $\eta = \operatorname{erf} x$, $u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} - \frac{1}{\xi} u_\xi = 0$.
- 8.32.** $x < 0$ $\xi = y + 2\sqrt{-x}$, $\eta = y - 2\sqrt{-x}$, $u_{\xi\eta} - \frac{u_\xi - u_\eta}{2(\xi - \eta)} + \frac{u}{2} = 0$,
 $x > 0$, $\xi = 2\sqrt{x}$, $\eta = y$, $u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + \frac{2}{\xi} u_\xi + 2u = 0$.
- 8.33.** $\xi = y^2 - x^3$, $\eta = y^2 + x^3$, $u_{\xi\eta} + \frac{5u_\xi}{18(\eta - \xi)} - \frac{(8\xi - \eta)u_\eta}{9(\eta^2 - \xi^2)} = 0$.
- 8.34.** $\xi = \sqrt{x} - \sqrt{y}$, $\xi = \sqrt{x} + \sqrt{y}$, $u_{\xi\eta} + \frac{u_\xi}{\xi - \eta} + \frac{(\xi - \eta - 1)u_\eta}{\xi - \eta} = 0$.
- 8.35.** $\xi = \frac{x}{\sqrt{7}}$, $\eta = \frac{x}{\sqrt{7}} - y$, $u = v e^{-\frac{\xi}{2}} v_{\xi\xi} + \frac{3}{4} v = 0$.
- 8.36.** $\xi = \frac{x}{\sqrt{2}}$, $\eta = \frac{5x - 4y}{\sqrt{2}}$, $u = v e^{-2\xi}$, $v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} = 0$.
- 8.37.** $\xi = \frac{x}{\sqrt{3}}$, $\eta = \frac{x - 3y}{4\sqrt{6}}$, $u = v e^{-\frac{3}{2}\eta}$, $v_{\xi\xi} + v_{\eta\eta} + 2v = 0$.
- 8.38.** $\xi = x$, $\eta = -x + y$, $\zeta = y + z$, $u = v e^\xi$, $v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} - 2v_\zeta = 0$;
 $q = (\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3)^2 - (\lambda_2 - \lambda_3)^2$.
- 8.39.** $\xi = x + y$, $\eta = -x + y$, $\zeta = -x - y + z$, $u = v e^{-\eta + \frac{1}{2}\zeta}$,
 $v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} - v_{\zeta\zeta} + \frac{1}{4}v = 0$; $q = \left(\frac{1}{2}\lambda_1 + \frac{1}{2}\lambda_2 + \lambda_3\right)^2 - \left(\frac{1}{2}\lambda_2 - \frac{1}{2}\lambda_1\right)^2 - \lambda_3^2$.
- 8.40.** $\xi = x$, $\eta = -x + 2y$, $\zeta = -x + y + z$,
 $u_{\xi\xi} - u_{\eta\eta} + u_\zeta + u = 0$; $q = \left(\lambda_1 + \frac{1}{2}\lambda_2 + \frac{1}{2}\lambda_3\right)^2 - \left(\frac{1}{2}\lambda_2 - \frac{1}{2}\lambda_3\right)^2$.
- 8.41.** $\xi = x$, $\eta = -x + y$, $\zeta = -y + z$, $u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + u_{\zeta\zeta} = 0$;
 $q = (\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3)^2 + (\lambda_2 + \lambda_3)^2 + \lambda_3^2$.
- 8.42.** $\xi = x$, $\eta = \frac{x + 2y}{\sqrt{2}}$, $\zeta = x + y + z$, $u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} = 0$;
 $q = \left(\lambda_1 - \frac{1}{2}\lambda_2 - \frac{1}{2}\lambda_3\right)^2 + \frac{3}{4}(\lambda_2 - \lambda_3)^2$.
- 8.43.** $\xi = \frac{2x}{3}$, $\eta = \frac{-x + y}{3}$, $\zeta = x + \frac{y}{3} + z$, $u = v e^{-\xi + \eta}$,
 $v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} = 0$; $q = (\lambda_1 - 2\lambda_2 + \lambda_3)^2 - (3\lambda_2 - \lambda_3)^2$.
- 8.44.** $\xi = x$, $\eta = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(-x + \frac{2}{3}y - z\right)$, $\zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(-y + \frac{1}{3}z\right)$,
 $u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + u_{\zeta\zeta} = 0$; $q = (\lambda_1 + 2\lambda_2 - \lambda_3)^2 + 2\left(\frac{1}{2}\lambda_2 - \lambda_3\right)^2 + \frac{9}{2}\lambda_2^2$.

$$\begin{aligned} 8.45. \quad & \xi = x, \eta = 3x + y, \zeta = \frac{1}{3}(-8x - 2y + z), \quad u_{\xi\xi} - u_{\eta\eta} - u_{\zeta\zeta} = 0; \\ & q = (\lambda_1 - 3\lambda_2 + 2\lambda_3)^2 - (\lambda_2 + 2\lambda_3)^2 - 9\lambda_3^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.46. \quad & \xi = x, \eta = -x + y, \zeta = \frac{1}{2}(-3x + y + z), \\ & u_{\xi\xi} - u_{\eta\eta} + u_{\zeta\zeta} = 0; \quad q = (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_3)^2 - (\lambda_2 - \lambda_3)^2 + 4\lambda_3^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.47. \quad & \xi = \frac{1}{2}x, \eta = \frac{3}{4}x + \frac{1}{2}y, \zeta = -\frac{5}{4}x + \frac{1}{2}y + z, \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} = 0; \\ & q = (2\lambda_1 - 3\lambda_2 + 4\lambda_3)^2 + (2\lambda_2 - \lambda_3)^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.48. \quad & \xi = x, \eta = \frac{1}{2}(3x + y), \zeta = \frac{1}{2}(-x - y + 2z), \quad u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + u_{\zeta\zeta} = 0; \\ & q = (\lambda_1 - 3\lambda_2 - \lambda_3)^2 + (2\lambda_2 + \lambda_3)^2 + \lambda_3^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.49. \quad & \xi = \frac{1}{3}x, \eta = -\frac{2}{3}x + \frac{1}{2}y, \zeta = \frac{7}{9} - \frac{1}{2}y + \frac{1}{3}z, \quad u_{\xi\xi} - u_{\eta\eta} - u_{\zeta\zeta} = 0; \\ & q = (3\lambda_1 - 4\lambda_2 - \lambda_3)^2 - (2\lambda_2 + 3\lambda_3)^2 - 9\lambda_3^2. \end{aligned}$$

$$8.50. \quad \xi = \frac{1}{3}x, \eta = \frac{4}{3}x + y, \zeta = -\frac{1}{3}x + z, \quad u_{\xi\xi} = 0.$$

$$\begin{aligned} 8.51. \quad & \xi = x, \eta = -x + \frac{1}{2}y, \zeta = z + t, \tau = -z + t, u = v e^{-\frac{1}{2}\xi - \zeta}, \\ & v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} + v_{\zeta\zeta} - v_{\tau\tau} - \frac{1}{4}v = 0; \\ & q = (\lambda_1 - 2\lambda_2)^2 - 4\lambda_2^2 + \left(\frac{\lambda_3 + \lambda_4}{2}\right)^2 - \left(\frac{\lambda_4 - \lambda_3}{2}\right)^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.52. \quad & \xi = x + y, \eta = -x + y, \zeta = -x + z, \tau = -y + t, u = v e^{-\xi}, \quad v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} = 0; \\ & q = \left(\nu_1 + \frac{1}{2}\nu_3 + \frac{1}{2}\nu_4\right)^2 - \left(\nu_2 - \frac{1}{2}\nu_3 + \frac{1}{2}\nu_4\right)^2, \\ & \lambda_1 = \nu_1 - \nu_2, \lambda_2 = \nu_1 + \nu_2, \lambda_3 = \nu_3, \lambda_4 = \nu_4. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.53. \quad & \xi = x + y, \eta = -x + y, \zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}(-x + y + z + t), \tau = \frac{1}{\sqrt{2}}(x + y - z + t), \\ & u = v e^{-\xi + \sqrt{2}\zeta + \frac{1}{\sqrt{2}}\tau}, \quad v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} + v_{\zeta\zeta} - v_{\tau\tau} - \frac{1}{2}v = 0; \\ & q = \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_4}{2}\right)^2 - \left(\frac{-\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4}{2}\right)^2 + 2\lambda_3\lambda_4. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.54. \quad & \xi = x, \eta = 2x + y, \zeta = z + t, \tau = -z + t, u = v e^{-\frac{1}{2}\xi - \tau}, \\ & v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} + v_{\zeta\zeta} - v_{\tau\tau} - \frac{1}{4}v = 0; \quad q = (\lambda_1 - 2\lambda_2)^2 - \lambda_2^2 + \lambda_3\lambda_4. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.55. \quad & \xi = x, \eta = \frac{1}{\sqrt{11}}(3x + 2y), \zeta = z, \tau = -z + 2t, u = v e^{-\xi + \zeta}, \\ & v_{\xi\xi} + v_{\eta\eta} - v_{\zeta\zeta} + v_{\tau\tau} - v = 0; \quad q = \left(\lambda_1 - \frac{3}{2}\lambda_2\right)^2 + \frac{11}{4}\lambda_2^2 - \left(\lambda_3 + \frac{1}{2}\lambda_4^2 + \frac{\lambda_4}{4}\right)^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.56. \quad & \xi = x, \eta = -x - z, \zeta = x + y + z, \tau = y + t, u = v e^{-\xi - \frac{1}{2}\eta - \zeta - \tau}, \\ & v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} + v_{\zeta\zeta} + v_{\tau\tau} + \frac{1}{4}v = 0; \\ & q = (\lambda_1 - \lambda_3)^2 - (\lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4)^2 + (\lambda_2 - \lambda_4)^2 + \lambda_4^2. \end{aligned}$$

- 8.57.** $\xi = x + y, \eta = -x + y, \zeta = -x - y + z, \tau = -x + y + z + 2t,$
 $u = v e^{-\xi - \eta + \frac{7}{2}\zeta - \frac{1}{2}\tau}, v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} + v_{\zeta\zeta} - v_{\tau\tau} - \frac{1}{4}v = 0;$
 $q = \left(\lambda_1 + \frac{1}{2}\lambda_2 - \frac{1}{2}\lambda_4\right)^2 - \left(\frac{1}{2}\lambda_2 - \lambda_3 - \frac{1}{2}\lambda_4\right)^2 + \left(\lambda_3 + \frac{1}{2}\lambda_4\right)^2 - \frac{1}{4}\lambda_4^2.$
- 8.58.** $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}(x + y), \eta = \frac{1}{\sqrt{2}}(-x + y), \zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}(-x - y + 2z),$
 $\tau = \frac{1}{\sqrt{2}}(-2x - 2y + 2z + 2t), u = v e^{-\frac{1}{2\sqrt{2}}(\xi + \eta + \zeta)},$
 $v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} - v_{\zeta\zeta} = 0; q = \frac{1}{2}(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)^2 - \frac{1}{2}(\lambda_2 - \lambda_1)^2 - \frac{1}{2}(\lambda_3 - \lambda_4)^2.$
- 8.59.** $\xi = x + y, \eta = -x + y, \zeta = -x - y + z, \tau = -x + y + z + 2t,$
 $u = v e^{-\xi + \zeta}, v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} - v_{\zeta\zeta} + v_{\tau\tau} = 0;$
 $q = \left(\nu_1 + \nu_3 - \frac{1}{2}\nu_4\right)^2 - \left(\nu_2 - \frac{1}{2}\nu_4\right)^2 - \left(\nu_3 - \frac{1}{2}\nu_4\right)^2 + \frac{1}{4}\nu_4^2,$
 $\lambda_1 = \nu_1 - \nu_2, \lambda_2 = \nu_1 + \nu_2, \lambda_3 = \nu_3, \lambda_4 = \nu_4.$
- 8.60.** $\xi = x + y, \eta = -x - y, \zeta = -x + y + z, \tau = 2y - z + 2t,$
 $u = v e^{-\xi - \eta - \frac{1}{2}\zeta + \frac{3}{2}\tau}, v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} + v_{\zeta\zeta} - v_{\tau\tau} = 0;$
 $q = \left(\nu_1 - \frac{1}{2}\nu_4\right)^2 - \left(\nu_2 - \nu_3 - \frac{1}{2}\nu_4\right)^2 + \left(\nu_3 - \frac{1}{2}\nu_4\right)^2 - \frac{1}{4}\nu_4^2, \lambda_1 = \nu_1 - \nu_2,$
 $\lambda_2 = \nu_1 + \nu_2, \lambda_3 = \nu_3, \lambda_4 = \nu_4.$
- 8.61.** $\xi = x + y, \eta = -x + y, \zeta = -x + z, \tau = y + t,$
 $u = v e^{-2\xi - \eta}, v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} - v_{\tau\tau} + v = 0;$
 $q = \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_4}{2}\right)^2 - \left(\frac{-\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4}{2}\right)^2.$
- 8.62.** $\xi = x + y, \eta = -x + y, \zeta = -x - y + z, \tau = \frac{1}{\sqrt{3}}(-x - y - z + 2t),$
 $u = v e^{-\frac{3}{2}\xi - \frac{1}{2}\eta - \zeta}, v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} - v_{\zeta\zeta} - v_{\tau\tau} - 2v = 0;$
 $q = \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} + \lambda_3 + \lambda_4\right)^2 - \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)^2 - (\lambda_3 + \frac{1}{2}\lambda_4)^2 - \frac{3}{4}\lambda_4^2.$
- 8.63.** $\xi = x, \eta = \frac{1}{\sqrt{3}}(-x + 2y), \zeta = \frac{1}{\sqrt{6}}(x - 2y + 3z),$
 $\tau = \frac{1}{\sqrt{2}}(x - z + t), u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + u_{\zeta\zeta} + u_{\tau\tau} = 0;$
 $q = \left(\lambda_1 + \frac{1}{2}\lambda_2 - \frac{1}{2}\lambda_4\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\lambda_2 + \frac{2\lambda_3}{3} + \frac{\lambda_4}{3}\right)^2 + \frac{2}{3}\left(\lambda_3 + \frac{1}{2}\lambda_4\right)^2 + \frac{1}{2}\lambda_4^2.$
- 8.64.** $\xi = x, \eta = \frac{1}{2}(-3x + y), \zeta = \frac{1}{2}(-2x - 3y + 2z - 2t), \tau = 5x - \frac{3}{2}y + z + t,$
 $u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + u_{\zeta\zeta} - u_{\tau\tau} = 0; q = (\lambda_1 + 3\lambda_2 - \lambda_4)^2 + (2\lambda_2 + 3\lambda_4)^2 - \lambda_3\lambda_4.$
- 8.65.** $\xi = x, \eta = \frac{1}{\sqrt{3}}(-x + 2y), \zeta = \frac{1}{\sqrt{6}}(x - 2y + 3z),$
 $\tau = -x + y - z + t, u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + u_{\zeta\zeta} = 0;$
 $q = \left(\lambda_1 + \frac{1}{2}\lambda_2 + \frac{1}{2}\lambda_4\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\lambda_2 + \frac{2}{3}\lambda_3 - \frac{1}{3}\lambda_4\right)^2 + \frac{2}{3}(\lambda_3 + \lambda_4)^2.$

$$\begin{aligned} 8.66. \quad & \xi = x, \eta = \frac{1}{2}(x+y), \zeta = \frac{1}{2}(-3x+y+2z+2t), \tau = \frac{1}{2}(-3x+y+2z-2t), \\ & u = v e^{-\frac{1}{2}\xi + \eta + \zeta - \tau}, v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} + v_{\zeta\zeta} - v_{\tau\tau} + \frac{3}{4}v = 0; \\ & q = (\lambda_1 - \lambda_2 + 2\lambda_3)^2 - (2\lambda_2 - \lambda_1)^2 + \lambda_3\lambda_4. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.67. \quad & \xi = x, \eta = \frac{1}{\sqrt{3}}(3x+2y), \zeta = z, \tau = 2t, \\ & u = v e^{-\frac{1}{2}\xi - \frac{3\sqrt{3}}{2}\eta + \frac{1}{2}\zeta + \tau}, v_{\xi\xi} + v_{\eta\eta} - v_{\zeta\zeta} + v_{\tau\tau} + \frac{1}{4}v = 0; \\ & q = \left(\lambda_1 - \frac{3}{2}\lambda_2\right)^2 + \frac{3}{4}\lambda_2^2 - \left(\lambda_3 + \frac{1}{2}\lambda_4\right)^2 + \frac{1}{4}\lambda_4^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.68. \quad & \xi = x, \eta = \frac{1}{\sqrt{2}}(-x+y), \zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}(x-3y+2z), \\ & \tau = -x+y-z+t, u_{\xi\xi} - u_{\eta\eta} + u_{\zeta\zeta} = 0; \\ & q = (\lambda_1 + 2\lambda_2 + 2\lambda_3 + \lambda_4)^2 - 2\left(\lambda_2 + \frac{3}{2}\lambda_3 + \frac{1}{2}\lambda_4\right)^2 + \frac{1}{2}(\lambda_3 + \lambda_4)^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.69. \quad & \xi = \frac{1}{2}x, \eta = \frac{1}{2}x+y, \zeta = y+z, \\ & \tau = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(-\frac{1}{2}x+y+z+t\right), u_{\xi\xi} - u_{\eta\eta} - u_{\zeta\zeta} + u_{\tau\tau} = 0; \\ & q = (2\lambda_1 - \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)^2 + (\lambda_2 - \lambda_3)^2 + (\lambda_3 - \lambda_4)^2 - 3\lambda_4^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.70. \quad & \xi = x, \eta = -x - \frac{1}{2}y, \zeta = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(x+2y+\frac{7}{2}z\right), \\ & \tau = \frac{1}{\sqrt{3}}(x+2y+2z+3t), u_{\xi\xi} - u_{\eta\eta} - u_{\zeta\zeta} + u_{\tau\tau} = 0; \\ & q = (\lambda_1 + 3\lambda_2 - 2\lambda_3 - \lambda_4)^2 - \left(\frac{7}{2}\lambda_2 - 2\lambda_3 - \lambda_4\right)^2 - \frac{1}{\sqrt{3}}\left(\frac{3}{2}\lambda_2 - \lambda_4\right)^2 + \frac{1}{3}\lambda_4^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.71. \quad & \xi = x, \eta = \frac{1}{\sqrt{2}}(y+z), \zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}(-y+z), \\ & \tau = -x+y+t, u = v e^{-\frac{1}{\sqrt{2}}\zeta}, v_{\xi\xi} + v_{\eta\eta} - v_{\zeta\zeta} + \frac{1}{2}v = 0; \\ & q = (\lambda_1 - \lambda_4)^2 + \frac{1}{2}(\lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_4)^2 - \frac{1}{2}(\lambda_2 - \lambda_3 + \lambda_4)^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.72. \quad & \xi = x, \eta = \frac{1}{\sqrt{3}}(-x+2y), \zeta = \frac{1}{\sqrt{6}}(x-2y+3z), \\ & \tau = x-y+z+t, u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} + u_{\zeta\zeta} = 0; \\ & q = \left(\lambda_1 + \frac{1}{2}\lambda_2 + \frac{1}{2}\lambda_4\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\lambda_2 + \frac{2}{3}\lambda_3 + \frac{1}{3}\lambda_4\right)^2 + \frac{2}{3}(\lambda_3 - \lambda_4)^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.73. \quad & \xi = x, \eta = \frac{1}{\sqrt{2}}(-2x+y), \zeta = 2z, \tau = t, u = v e^{-\frac{1}{2}\xi + \zeta - 2\tau}, v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} + \\ & + v_{\zeta\zeta} + v_{\tau\tau} - \frac{1}{4}v = 0; q = \left(\lambda_1 + 2\lambda_2 + \frac{1}{2}\lambda_3\right)^2 - 2\left(\lambda_2 + \frac{1}{2}\lambda_3\right)^2 + \frac{1}{4}\lambda_3^2 + \lambda_4^2. \end{aligned}$$

$$8.74. \quad \xi = \frac{x}{3}, \eta = \frac{x}{3} + y, \zeta = \frac{4x}{3} + z, \tau = \frac{2x}{3} + t, u_{\xi\xi} = 0.$$

$$8.75. \quad \xi_1 = \frac{x_1}{a_1}, \xi_i = -\frac{x_1}{a_i} + x_i, i = 2, 3, \dots, n, a_1 \neq 0, u_{\xi_1\xi_1} = 0.$$

$$\text{У к а з а н и е. } \sum_{i,j=1}^n a_i a_j u_{x_i x_j} = \left(\sum_{i=1}^n a_i x_i \right)^2.$$

8.76. У к а з а н и е. Для доказательства свойства 1) подставить функцию $u = (x - y)^{1-\alpha-\beta}v$ в уравнение $\mathcal{E}(\alpha, \beta)u = 0$. Для доказательства свойства 2) уравнение $\mathcal{E}(\alpha, \beta)u = 0$ записать в форме $(x - y)u_{xy} - \alpha u_x + \beta u_y = 0$ и продифференцировать по x . В результате для $v = u_x$ получится уравнение $\mathcal{E}(\alpha, 1 + \beta)u = 0$ и т. д.

$$\mathbf{8.77.} \quad 1) u = \frac{\partial^{m+n-2}}{\partial x^{n-1} \partial y^{m-1}} \left[\frac{f(x) + g(y)}{x - y} \right];$$

$$2) u = (x - y)^{m+n+1} \frac{\partial^{m+n}}{\partial x^m \partial y^n} \left[\frac{f(x) + g(y)}{x - y} \right].$$

У к а з а н и е. Если $\alpha = \beta = 1$, то из свойства 1) следует, что решения уравнений $\mathcal{E}(1, 1)u = 0$ и $\mathcal{E}(0, 0)v = 0$ связаны соотношением $(x - y)u = v$. Так как общее решение уравнения $\mathcal{E}(0, 0)v = 0$, или $v_{xy} = 0$ равно сумме $f(x) + g(y)$,

то $u = \frac{f(x) + g(y)}{x - y}$. Если $\alpha = m, \beta = n$, где $m, n \in \mathbb{N}$, то решение уравнения $\mathcal{E}(m, n)u = 0$, или $\mathcal{E}(1 + m - 1, 1 + n - 1)u = 0$, выражается через решение

уравнения $\mathcal{E}(1, 1)v = 0$ по формуле (см. свойство 2)) $u = \frac{\partial^{m+n+2}v}{\partial x^{n-1} \partial y^{m-1}}$, где $v =$

$= \frac{f(x) + g(y)}{x - y}$. Если $\alpha = -m, \beta = -n$, где $m, n \in \mathbb{N}_0$, то последовательное при-

менение свойств 1) и 2) к уравнениям $\mathcal{E}(-m, -n)u = 0$, $\mathcal{E}(1 + m, 1 + n)v = 0$, $\mathcal{E}(1, 1)w = 0$, приводит к соотношениям $u = (x - y)^{n+m+1}v$, $v = \frac{\partial^{n+m}}{\partial x^m \partial y^n}w$,

откуда $u = (x - y)^{n+m+1} \frac{\partial^{n+m}}{\partial x^m \partial y^n} \frac{f(x) + g(y)}{x - y}$.

8.78. Функция $v(x, y)$ — решение уравнения $v_{xy} - \frac{\alpha v_x - \beta v_y}{x - y} = 0$, в котором

$\alpha = a + \gamma$, $\beta = b + \gamma$, γ — корень уравнения $\gamma^2 + (a + b - 1)\gamma + c = 0$.

$$\mathbf{8.79.} \quad u(x, y) = f(4x - y)e^{-6y} + g(4x - y)e^{-2y}.$$

$$\mathbf{8.80.} \quad u(x, y) = f(\sqrt{2}x + \sqrt{3}y)e^{\frac{x}{3}} + g(\sqrt{2}x + \sqrt{3}y)e^{-2x}.$$

$$\mathbf{8.81.} \quad u(x, y) = f(y - x + \sin x) + g(y + x + \sin x).$$

$$\mathbf{8.82.} \quad u(x, y) = f(y + 4e^{-x}) + g(y - 2e^{-x}).$$

$$\mathbf{8.83.} \quad u(x, y) = f(\arctg x - \ln |y|) + g(y).$$

$$\mathbf{8.84.} \quad u(x, y) = f(x - y - \sin y) + g(x - y + \sin y).$$

$$\mathbf{8.85.} \quad u(x, y) = f(x + \sqrt{2} \cos x - y) + g(x - \sqrt{2} \cos x - y).$$

$$\mathbf{8.86.} \quad u(x, y) = f(\sqrt{x} - \ln |y|) + g(y).$$

$$\mathbf{8.87.} \quad u(x, y) = e^\xi g(\eta) + e^{-\eta} f(\xi), \quad \xi = 4e^{-x} + y, \quad \eta = 2e^{-x} - y.$$

$$\mathbf{8.88.} \quad u(x, y) = f(y^2 - x^2) + g(xy).$$

$$\mathbf{8.89.} \quad u(x, y) = f(x) + g(x - \operatorname{erf} y).$$

$$\mathbf{8.90.} \quad u(x, y) = f(y + 8x) + g(y - x)e^{-\frac{17}{18}(8x+y)}.$$

$$\mathbf{8.91.} \quad u(x, y) = f(x^2 + y^2 + y)e^{-y^2} + g(y).$$

$$\mathbf{8.92.} \quad u(x, y) = f(x + y)e^{3(x+2y)} + g(x + 2y)e^{x+y}.$$

$$\mathbf{8.93.} \quad u(x, y) = e^x \int_0^{\frac{x+1}{y}} f(s)e^{ys} ds + g(y).$$

$$8.94. u(x, y) = \int_0^y (y-s)f(s)e^{(x-y)s}ds + yg(x-y) - g'(x-y).$$

$$8.95. u(x, y) = f(x - \ln \sqrt{\operatorname{ch} y})e^{-\frac{y}{2}} + g(y).$$

$$8.96. u(x, y) = e^{\frac{\eta}{2}}f(\xi) + e^{\frac{\xi}{2}}g(\eta), \quad \xi = x + 2\sqrt{-y}, \quad \eta = x - 2\sqrt{-y}.$$

$$8.97. u(x, y) = e^{-\frac{\eta}{4}}f(\xi) + e^{-\frac{\xi}{4}}g(\eta), \quad \xi = x + \sqrt{2} \operatorname{arctg} e^y, \quad \eta = x - \sqrt{2} \operatorname{arctg} e^y.$$

$$8.98. u(x, y) = e^{\frac{\eta}{4}}f(\xi) + e^{\frac{\xi}{4}}g(\eta), \quad \xi = x + \cos y, \quad \eta = x - \cos y.$$

$$8.99. u(x, y) = \int_0^y (y-s)f(s)e^{-\frac{(x+y)^2}{2}s}ds + yg(x+y) + \frac{g'(x+y)}{x+y}.$$

У к а з а н и е. Уравнение в каноническом виде $u_{\xi\eta} + \xi\eta u_{\eta} - \xi u = 0$, $\xi = x + y$, $\eta = y$, продифференцировать по η и ввести функцию $v = u_{\eta\eta}$.

$$8.100. \text{ Если } a \neq 0, \text{ то } u(x, y) = e^{ay(x-y)} \left[\int_0^{x-y} (x-y-s)f(s)e^{ays}ds + a(x-y)g(y) - g'(y) \right];$$

если $a = 0$, то $u(x, y) = f(x-y) + g(y)$.

У к а з а н и е. Уравнение привести к каноническому виду $u_{\xi\eta} - a\eta u_{\eta} - 2a\xi u_{\xi} + 2a^2\xi\eta u = 0$, $\xi = x - y$, $\eta = y$, и представить в форме $(u_{\xi} - a\eta)_{\eta} + au - 2a\xi(u_{\xi} - a\eta) = 0$. Затем получить систему уравнений $v = u_{\xi} - a\eta u$, $au = 2a\xi v - v_{\eta}$, исключить u и решать уравнение для v .

$$8.101. u(x, y) = (\xi - \eta)^{2m+1} \frac{\partial^{2m}}{\partial \xi^m \partial \eta^m} \left[\frac{f(\xi) + g(\eta)}{\xi - \eta} \right],$$

$$\xi = x + \sqrt{x^2 - y^2}, \quad \eta = x - \sqrt{x^2 - y^2}.$$

$$8.102. u(x, y) = \frac{\partial^{2m-2}}{\partial \xi^{m-1} \partial \eta^{m-1}} \left[\frac{f(\xi) + g(\eta)}{\xi - \eta} \right],$$

$$\xi = x + \sqrt{x^2 - y^2}, \quad \eta = x - \sqrt{x^2 - y^2}.$$

$$8.103. \text{ Если } a = n \in \mathbb{N}, \text{ то } u(x, y) = \frac{\partial^{2n-2}}{\partial \xi^{n-1} \partial \eta^{n-1}} \left[\frac{f(\xi) + g(\eta)}{\xi - \eta} \right];$$

$$\text{если } -a = n \in \mathbb{N}_0, \text{ то } u(x, y) = (\xi - \eta)^{2n+1} \frac{\partial^{2n}}{\partial \xi^n \partial \eta^n} \left[\frac{f(\xi) + g(\eta)}{\xi - \eta} \right],$$

где $\xi = y + 2\sqrt{-x}$, $\eta = y - 2\sqrt{-x}$.

$$8.104. u(x, y) = \sqrt[4]{x} [f'(y + \sqrt{x}) - g'(y - \sqrt{x})] - \frac{f(y + \sqrt{x}) + g(y - \sqrt{x})}{\sqrt[4]{x}}.$$

У к а з а н и е. Привести уравнение к каноническому виду и обратиться к задаче 8.78.

$$8.105. u(x, y) = \int_0^1 f(y - (x-y)\tau) \tau^{-\alpha} (1-\tau)^{\alpha-1} d\tau + \int_0^1 g(y - (x-y)\tau) \tau^{-\alpha} (1-\tau)^{\alpha-1} \ln[\tau(1-\tau)(x-y)] d\tau.$$

У к а з а н и е. Если $\alpha + \beta = 1$, то решения $u_1(x, y)$ и $u_2(x, y)$, полученные в примере 8.4, одинаковы. В качестве второго решения можно взять $\lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{u_1(x, y, \beta) - u_2(x, y, \beta)}{\Delta}$, где $u_{1,2}(x, y, \beta)$ — решения, в которых $\beta = 1 - \alpha - \Delta$.

$$\begin{aligned} \mathbf{8.106.} \quad u(x, y) &= \frac{\partial v(x, y)}{\partial y}, \quad v(x, y) = \int_0^1 f(y - (y - x)\tau) \tau^{-\frac{1}{2}} (1 - \tau)^{-\frac{1}{2}} d\tau + \\ &+ \int_0^1 g(y - (y - x)\tau) \tau^{-\frac{1}{2}} (1 - \tau)^{-\frac{1}{2}} \ln[\tau(1 - \tau)(x - y)] d\tau. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{8.107.} \quad u(x, y) &= \frac{\partial v(x, y)}{\partial x}, \quad v(x, y) = (x - y)^{-\frac{1}{8}} \int_0^1 f(y - (y - x)\tau) \tau^{-\frac{7}{8}} (1 - \tau)^{-\frac{1}{4}} d\tau + \\ &+ \int_0^1 g(y - (y - x)\tau) \tau^{-\frac{3}{4}} (1 - \tau)^{-\frac{1}{8}} d\tau. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{8.108.} \quad u(x, y) &= (x - y)^{\frac{7}{12}} \frac{\partial v(x, y)}{\partial x}, \\ v(x, y) &= (x - y)^{-\frac{7}{12}} \int_0^1 f(y - (y - x)\tau) \tau^{-\frac{1}{3}} (1 - \tau)^{-\frac{1}{4}} d\tau + \\ &+ \int_0^1 g(y - (y - x)\tau) \tau^{-\frac{3}{4}} (1 - \tau)^{-\frac{2}{3}} d\tau. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{8.109.} \quad u(x, y) &= \frac{\partial}{\partial y} (x - y)^{\frac{37}{30}} \frac{\partial v(x, y)}{\partial y}, \\ v(x, y) &= (x - y)^{-\frac{7}{30}} \int_0^1 f(y - (y - x)\tau) \tau^{-\frac{2}{5}} (1 - \tau)^{-\frac{5}{6}} d\tau + \\ &+ \int_0^1 g(y - (y - x)\tau) \tau^{-\frac{1}{6}} (1 - \tau)^{-\frac{3}{5}} d\tau. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{8.110.} \quad u(x, y) &= (x - y)^{\frac{65}{12}} \frac{\partial^5 v}{\partial y} (x - y)^{\frac{37}{30}} \frac{\partial v(x, y)}{\partial x^3 \partial y^2}, \\ v(x, y) &= (x - y)^{-\frac{5}{12}} \int_0^1 f(y - (y - x)\tau) \tau^{-\frac{3}{4}} (1 - \tau)^{-\frac{2}{3}} d\tau + \\ &+ \int_0^1 g(y - (y - x)\tau) \tau^{-\frac{1}{3}} (1 - \tau)^{-\frac{1}{4}} d\tau. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{8.111.} \quad u(x, y) &= \int_0^1 f(y - \sqrt{y^2 - x^2} + 2\sqrt{y^2 - x^2} \tau) \tau^{-\frac{1}{3}} (1 - \tau)^{-\frac{2}{3}} d\tau + \\ &+ \int_0^1 g(y - \sqrt{y^2 - x^2} + 2\sqrt{y^2 - x^2} \tau) \tau^{-\frac{1}{3}} (1 - \tau)^{-\frac{2}{3}} \ln[\tau(1 - \tau)\sqrt{y^2 - x^2}] d\tau. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{8.112.} \quad u(x, y) &= \sqrt[8]{x} \int_0^1 f(y - 2x + 4\sqrt{x} \tau) \tau^{-\frac{1}{2}} (1 - \tau)^{-\frac{1}{4}} d\tau + \\ &+ \int_0^1 g(y - 2x + 4\sqrt{x} \tau) \tau^{-\frac{3}{4}} (1 - \tau)^{-\frac{1}{2}} d\tau. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{8.113.} \quad u(x, y) &= v(x, y) \sqrt{x^2 - y^2}, \\ v(x, y) &= \int_0^1 f(x - \sqrt{x^2 - y^2} + 2\sqrt{x^2 - y^2} \tau) \tau^{-\frac{1}{5}} (1 - \tau)^{-\frac{4}{5}} d\tau + \\ &+ \int_0^1 g(x - \sqrt{x^2 - y^2} + 2\sqrt{x^2 - y^2} \tau) \tau^{-\frac{1}{5}} (1 - \tau)^{-\frac{4}{5}} \ln[\tau(1 - \tau)\sqrt{x^2 - y^2}] d\tau. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.114. \quad u(x, y) = & \frac{1}{\sqrt[6]{\ln x}} \int_0^1 f(y - \ln x + 2 \ln x \tau) \tau^{-\frac{5}{6}} (1 - \tau)^{-\frac{1}{3}} d\tau + \\ & + \int_0^1 g(y - \ln x + 2 \ln x \tau) \tau^{-\frac{2}{3}} (1 - \tau)^{-\frac{1}{6}} d\tau. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.115. \quad u(x, y) = & e^x \int_0^1 f(y - e^x + 2e^{2x} \tau) \tau^{-\frac{1}{3}} (1 - \tau)^{-\frac{2}{3}} d\tau + \\ & + \int_0^1 g(y - e^x + 2e^{2x} \tau) \tau^{-\frac{1}{3}} (1 - \tau)^{-\frac{2}{3}} \ln[\tau(1 - \tau)e^x] d\tau. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.116. \quad u(x, y) = & \left[\frac{y}{x} (x^2 - 1) \right]^{\frac{3}{5}} v(x, y), \\ v(x, y) = & \left[\frac{y}{x} (x^2 - 1) \right]^{-\frac{1}{5}} \int_0^1 f\left(\frac{y}{x} + \frac{y}{x} (x^2 - 1) \tau\right) \tau^{-\frac{3}{5}} (1 - \tau)^{-\frac{3}{5}} d\tau + \\ & + \int_0^1 g\left(\frac{y}{x} + \frac{y}{x} (x^2 - 1) \tau\right) \tau^{-\frac{2}{5}} (1 - \tau)^{-\frac{2}{5}} d\tau. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.117. \quad u(x, y) = & y^{\frac{2}{3}} \int_0^1 f\left(\frac{x}{y} - y + 2y\tau\right) \tau^{-\frac{1}{6}} (1 - \tau)^{-\frac{1}{6}} d\tau + \\ & + \int_0^1 g\left(\frac{x}{y} - y + 2y\tau\right) \tau^{-\frac{5}{6}} (1 - \tau)^{-\frac{5}{6}} d\tau. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8.118. \quad u(x, y) = & y^{\frac{1}{4}} \int_0^1 f(\operatorname{erf} x - 2\sqrt{y} + 4\sqrt{y} \tau) \tau^{-\frac{1}{4}} (1 - \tau)^{-\frac{1}{4}} d\tau + \\ & + \int_0^1 g(\operatorname{erf} x - 2\sqrt{y} + 4\sqrt{y} \tau) \tau^{-\frac{3}{4}} (1 - \tau)^{-\frac{3}{4}} d\tau. \end{aligned}$$

$$8.119. \quad u(x, y) = \frac{1}{28} (5y^2 - 8x).$$

$$8.120. \quad u(x, y) = \frac{1}{260} (73x^2 + 153y^2 + 34xy).$$

$$8.121. \quad u(x, y) = \frac{1}{16} (7x^4 - 12x^2y + 60y^2).$$

8.122. Решение. Пусть $u(x, t)$ — решение задачи Коши, $L \in \Omega$ — кусочно-гладкая линия, на которой заданы функции u , $\frac{\partial u}{\partial l}$ и параметрические уравнения которой $x = x(\tau)$, $y = y(\tau)$. На линии L определены и притом однозначно производные $u_x = p$, $u_y = q$. В самом деле, производные по направлениям $\mathbf{l} = \cos \alpha \mathbf{i} + \sin \alpha \mathbf{j}$ и $\tau = \cos \beta \mathbf{i} + \sin \beta \mathbf{j}$, где τ — вектор, касательный к L , формируют систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial l} = p \cos \alpha + q \sin \alpha, \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} = p \cos \beta - q \sin \beta \end{cases}$$

относительно p и q , определитель которой $\sin(\beta - \alpha) \neq 0$. Вторые производные $u_{xx} = r$, $u_{xy} = s$, $u_{yy} = t$ (на L) удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{cases} ar + 2bs + ct = -\Phi, \\ \dot{x}r + \dot{y}s = \dot{p}, \\ \dot{x}s + \dot{y}t = \dot{q}, \end{cases}$$

где два последних уравнения получаются дифференцированием по τ (обозначено точкой) тождеств $p = p(x(\tau), y(\tau))$, $q = q(x(\tau), y(\tau))$. Если определитель Δ системы отличен от нуля, то система имеет единственное решение (r, s, t) . При $\Delta \neq 0$ и при условии дифференцируемости функций a, b, c, Φ можно однозначно определить на L производные третьего порядка решения $u(x, t)$ и т. д. Например, система для r_x, s_x, t_x получается дифференцированием исходного уравнения (точнее тождества) по x , тождеств $r = r(x(\tau), y(\tau))$, $s = s(x(\tau), y(\tau))$, $t = t(x(\tau), y(\tau))$ — по τ и (с учетом соотношений $r_y = s_x$, $s_y = t_x$):

$$\begin{cases} ar_x + 2bs_x + ct_x = H, \\ \dot{x}r_x + \dot{y}s_x = \dot{r}, \\ \dot{x}s_x + \dot{y}t_x = \dot{s}. \end{cases}$$

Отсюда следует, что можно построить, по крайней мере, приближенное решение (с помощью формулы Тейлора) задачи Коши в окрестности линии L . В противном случае, т. е. при $\Delta = 0$, система имеет бесконечное множество решений (она совместна, так как по предположению существует решение $u(x, t)$ задачи Коши). Линия Γ , обладающая подобным свойством, описывается уравнением

$$\Delta = ay^2 - 2d\dot{x}\dot{y} + c\dot{x}^2 = 0,$$

которое эквивалентно уравнению (8.2).

8.123. У к а з а н и е. Волновому уравнению $u_{tt} - a^2 u_{xx} = 0$ соответствуют два характеристические уравнения $dx/dt = \pm a$, общие интегралы которых $x \pm at = C_{1,2}$. Замена переменных $\xi = x - at$, $\eta = x + at$ преобразует волновое уравнение к каноническому виду $u_{\xi\eta} = 0$, откуда в результате последовательного интегрирования $u_\eta = h(\xi)$ и $u = f(\xi) + g(\eta)$, так что общее решение волнового уравнения $u(x, t) = f(x - at) + g(x + at)$.

8.124. Области зависимости решения, области влияния и определенности решения отрезка (они не заштрихованы) показаны на рис. 8.14, а, 8.14, б, 8.14, в в случае 1); на рис. 8.17, а, 8.17, б — в случае 2). Наклонные прямые — характеристики семейств $x - at = C_1$, $x + at = C_2$. У к а з а н и е. Множество точек области зависимости является дополнением до $\mathbb{R}$ множества точек, изменение начальных данных в которых не влияет на решение $u(x, t)$ в точке $M(x; t)$; область влияния состоит из точек, области зависимости решения в которых пересекаются с отрезком $[A; B]$.

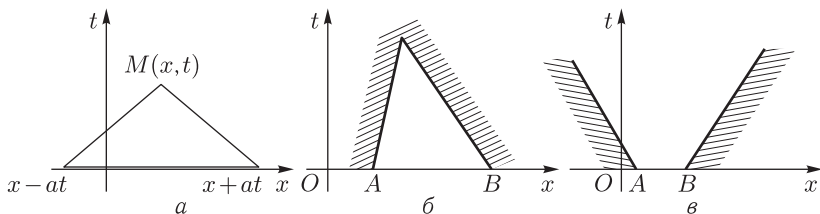


Рис. 8.14

$$\mathbf{8.125.} \quad u(x, t) = \frac{u_0}{2} \left[\cos \frac{\pi|x-at|}{l} \eta(l - |x-at|) + \cos \frac{\pi|x+at|}{l} \eta(l + |x-at|) \right].$$

$$\mathbf{8.126.} \quad u(x, t) = \frac{\sqrt{\pi} u_1}{4a} [\operatorname{erf}(x-at) - \operatorname{erf}(x+at)].$$

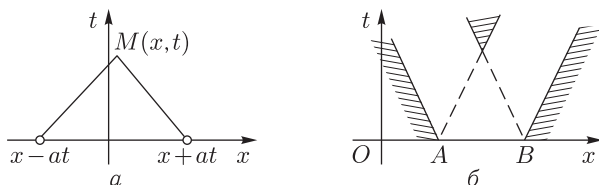


Рис. 8.15

8.127. $u(x, t) = e^{-\gamma t} v(x, t)$, $v(x, t)$ — решение задачи 8.123.

8.128. 1) $u(x, y) = (x - y) e^{x+y}$; 2) $u(x, y) = x e^{x+y}$.

8.129. 1) $(2x^2 + 3y^2) e^{-\frac{x}{\sqrt{3}}}$; 2) $u(x, y) = \sqrt{10} \left(2xy + \frac{x^2}{3} \right) e^{-\frac{x}{\sqrt{3}}}$.

8.130. 1) $u(x, y) = (y + 5x) e^{\frac{y+5x}{3}}$; 2) $u(x, y) = x(x - y) e^{\frac{5x+y}{3}}$.

8.131. $u(x, y) = (y + 5x) e^{\frac{y+5x}{3}}$.

8.132. $u(x, y) = xy(y - x)^4 (x^2 + y^2)$.

8.133. $u(x, y) = x(x + y)^3 (x^2 + 3y^2)$.

8.134. $u(x, y) = (y - x)^2 (x^2 + y^2)$.

8.135. $u(x, y) = (3x^2 + \ln^2 y) \ln y$.

8.136. 1) $u(x, y) = \frac{1}{2} \left[u_0(xy) + u_0\left(\frac{x}{y}\right) \right] + \frac{1}{2} \int_{\frac{x}{y}}^{xy} u_1(\xi) \frac{d\xi}{\xi}$;

2) $u(x, y) = \operatorname{ch} \frac{x(y^2 - 1)}{2y} \operatorname{ch} \frac{x(y^2 + 1)}{2y} + \sqrt{\frac{x}{y}} (y - 1)$.

У к а з а н и е. В переменных $\xi = \frac{x}{y}$, $\eta = xy$ уравнение принимает вид $u_{\xi\eta} = 0$.

8.137. $u(x, y) = 2e^{-\sqrt{x}} \operatorname{sh} \frac{y}{2}$.

8.138. 1) $u(x, y) = 2 \cos(\sqrt{x} - 1) \cos \sqrt{y} e^{\sqrt{x} - \sqrt{y}}$;

2) $u(x, y) = 2(\sqrt{y} - 1)[3x + (\sqrt{y} - 1)^2] + e^{-\sqrt{x}} \operatorname{ch}(\sqrt{y} - 1)$.

8.139. $u(x, y) = 1 + 2e^y \operatorname{sh}(\operatorname{ch} x)$.

8.140. 1) $u(x, y) = \operatorname{sh} y - x$; 2) $u(x, y) = 2x \operatorname{ch} y + \operatorname{sh} 2y$.

8.141. $u(x, y) = 2y \operatorname{sh} x - \operatorname{sh} 2x + 1$.

8.142. $u(x, y) = 1 + (1 - \ln |x| + y)^2 - \frac{2(1 + \ln |x| + y)}{x^2}$.

У к а з а н и е. Канонический вид уравнения $u_{\xi\eta} - u_{\eta} = 0$, $\xi = \ln |x| - y$, $\eta = \ln |x| + y$.

8.143. $u(x, y) = e^{\sin x + y}$.

8.144. 1) $u(x, y) = \operatorname{sh}(1 - \sqrt{x} + \sqrt{y}) + \frac{1}{4} e^{1 - \sqrt{x} - \sqrt{y}} \operatorname{sh} 2(\sqrt{x} - 1) +$
 $+ \frac{\sqrt{x} - 1}{2} e^{\sqrt{y} - \sqrt{x} + 1}$;

2) $u(x, y) = e^{2\sqrt{y}} \operatorname{sh}(\sqrt{y} + \sqrt{x})$.

$$8.145. u(x, y) = \frac{(x-y)y^4}{x^4 + y^4}.$$

$$8.146. u(x, y) = \frac{x^2 + 1}{\sqrt{-xy}}.$$

$$8.147. u(x, y) = (x+y)(\sqrt{x-y} + \sqrt{x+y}).$$

$$8.148. u(x, y) = (y^2 + 4x)e^{2y}.$$

$$8.149. u(x, y) = xe^{-\frac{x^2+y^2}{4}}.$$

$$8.150. u(x, y) = 4x + y - y^2.$$

$$8.151. u(x, y) = x^2 + 8x\sqrt{\operatorname{ch} y} + 8 \operatorname{ch} y.$$

$$8.152. u(x, y) = 3x(x^2 - y^2) - (x^2 - y^2)^{\frac{3}{2}}.$$

$$8.153. u(x, y) = \frac{y^2}{\sqrt{x}} + 4\sqrt{x}.$$

У к а з а н и е. Посредством замены $\xi = y + 2\sqrt{x}$, $\eta = y - 2\sqrt{x}$ уравнение преобразуется к каноническому виду $u_{\xi\eta} - \frac{u_{\xi} - u_{\eta}}{\xi - \eta} = 0$, откуда (см. задачу 8.77)

$$\text{общее решение } u(x, y) = \frac{f(y + 2\sqrt{x}) + g(y - 2\sqrt{x})}{\sqrt{x}}.$$

$$8.154. 1) u(x, y) = x\left(y^2 - \frac{2}{3}x^2\right); 2) u(x, y) = \frac{x}{2}(x^2 - y^2)^{\frac{3}{2}};$$

$$3) u(x, y) = 8x^4 - 12x^2y^2 + 3y^4.$$

$$8.155. u(x, y) = e^x \left(\frac{x \operatorname{sh} \sqrt{x^2 - y^2}}{\sqrt{x^2 - y^2}} + \operatorname{ch} \sqrt{x^2 - y^2} \right).$$

$$8.156. u(x, y) = x^2 - 4y^2 + 2y\sqrt{y^2 - x^2}.$$

$$8.157. u(x, y) = (x^2 - y^2)^{\frac{3}{4}}.$$

$$8.158. u(x, y) = 3y \operatorname{ch} x - \frac{y^3}{\operatorname{ch} x} + 1.$$

$$8.159. 1) u(x, y) = x^2 + 2y^2 + 2y\sqrt{y^2 - x^2}; 2) u(x, y) = x^2(y + \sqrt{y^2 - x^2}).$$

У к а з а н и е. Привести уравнение к каноническому виду и обратиться к задаче 8.77.

$$8.160. 1) u(x, y) = x\left(y - \frac{x^2}{18}\right) + 7; u(x, y) = x\left(y^2 - \frac{1}{9}x^2y + \frac{11x^4}{108}\right) + 3.$$

У к а з а н и е. Привести уравнение к каноническому виду и обратиться к задаче 8.105.

$$8.161. 1) u(x, y) = 4xy^{\frac{5}{4}}; 2) u(x, y) = y^{\frac{5}{4}}(5x^2 + y).$$

$$8.162. u(x, y) = \sqrt[4]{x}(y^2 + x - 1).$$

$$8.163. u(x, y) = 3x \operatorname{ch} y - \frac{x^3}{\operatorname{ch} y}.$$

$$8.164. 1) u(x, y) = y^2 + 4x^{\frac{1}{4}}y - \frac{2}{3}xy - \frac{4}{5}x^{\frac{5}{4}} + \frac{23}{21}x^2.$$

$$8.165. u(x, y) = 3x^{\frac{1}{3}} + \operatorname{erf} y.$$

$$8.166. \quad u(x, t) = \frac{F_0}{2a\rho} \left[\left(t - \frac{|x|}{a} \right) \eta \left(t - \frac{|x|}{a} \right) - \left(t - t_0 - \frac{|x|}{a} \right) \eta \left(t - t_0 - \frac{|x|}{a} \right) \right].$$

$$u(x, t_1) = \frac{F_0}{2a\rho} \cdot \begin{cases} t_1 - \frac{|x|}{a}, & |x| < at_1, \\ 0, & at_1 < |x|, \end{cases}$$

$$u(x, t_2) = \frac{F_0}{2a\rho} \cdot \begin{cases} t_0, & |x| < a(t_2 - t_0), \\ t_2 - \frac{|x|}{a}, & a(t_2 - t_0) < |x| < at_2, \\ 0, & at_2 < |x|. \end{cases}$$

$$u(0, t) = \frac{F_0}{2a\rho} \cdot \begin{cases} t, & 0 \leq t < t_0, \\ t_0, & t_0 \leq t, \end{cases}$$

Графики функций приведены на рисунках 8.16, а, б, в.

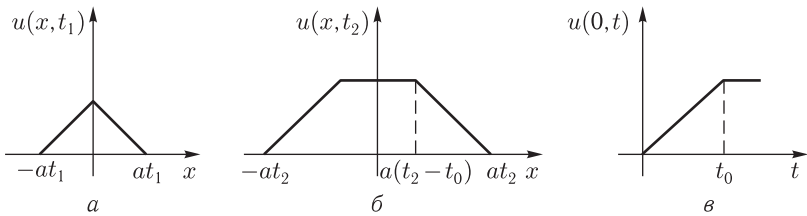


Рис. 8.16

$$8.167. \quad u(x, t) = \frac{F_0}{2a\rho\omega} \left[1 - \cos \omega \left(t - \frac{|x|}{a} \right) \right] \cdot \left[\eta \left(t - \frac{|x|}{a} \right) - \eta \left(t - t_0 - \frac{|x|}{a} \right) \right].$$

$$u(x, \frac{\pi}{\omega}) = \frac{F_0}{2a\rho\omega} \cdot \begin{cases} 1 + \cos \frac{\omega x}{a}, & |x| < \frac{\pi}{\omega}, \\ 0, & \frac{\pi a}{\omega} < |x|, \end{cases}$$

$$u(x, \frac{3\pi}{\omega}) = \frac{F_0}{2a\rho\omega} \cdot \begin{cases} 0, & |x| < \frac{\pi a}{\omega}, \\ 1 + \cos \frac{\omega x}{a}, & \frac{\pi a}{\omega} < |x| < \frac{3\pi a}{\omega}, \\ 0, & \frac{3\pi a}{\omega} < |x|, \end{cases}$$

$$u(0, t) = \frac{F_0}{2a\rho\omega} \cdot \begin{cases} 1 - \cos \omega t, & 0 \leq t < \frac{2\pi}{\omega}, \\ 0, & \frac{2\pi}{\omega} < t. \end{cases}$$

$$8.168. \quad u(x, t) = \frac{1}{2a\rho} \left[\int_{\frac{at+x}{a+v_0}}^{\frac{at-x}{a-v_0}} F(\tau) d\tau \cdot \eta(x - v_0 t) + \int_0^{\frac{at+x}{a+v_0}} F(\tau) d\tau \cdot \eta(x + at) \right] - \\ - \frac{1}{2a\rho} \int_0^{\frac{at-x}{a-v_0}} F(\tau) d\tau \cdot \eta(x - at).$$

Решение. На единицу длины струны действует сила $F(t)\delta(x-vt)\mathbf{e}_u$. Функция $u(x, t)$ является решением задачи Коши

$$u_{tt} = a^2 u_{xx} + \frac{F(t)}{\rho} \delta(x-vt), \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t,$$

$$u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0,$$

рассмотренной в примере 8.6. В силу формулы (8.23)

$$u(x, t) = \frac{1}{2a\rho} \int_0^t F(\tau) d\tau \int_{x-a(t-\tau)}^{x+a(t-\tau)} \delta(\xi - v\tau) d\xi.$$

Замена переменной $\eta = \xi - v\tau$ (во внутреннем интеграле) преобразует интеграл к виду

$$u(x, t) = \frac{1}{2a\rho} \int_0^t F(\tau) d\tau \int_{x-a(t-\tau)-v\tau}^{x+a(t-\tau)-v\tau} \delta(\eta) d\eta.$$

Область интегрирования на плоскости $\eta O\tau$ — треугольник, ограниченный прямыми $\eta = 0$, $\eta = x - at + (a - v)\tau$, $\eta = x + at - (a + v)\tau$; координаты вершины, не лежащей на оси $O\eta$, равны $\eta = x - vt$, $\tau = t$, а две другие вершины треугольника расположены на оси $O\eta$; их абсциссы равны $x - at$, $x + at$. Если $x - at > 0$ (рис. 8.17, а), то носитель δ -функции не принадлежит промежутку $(x - a(t - \tau) - v\tau, x + a(t - \tau) - v\tau)$, поэтому $u(x, t) = 0$. Если $x - at < 0$, а $x - vt > 0$ (рис. 8.17, б), то внутренний интеграл равен нулю при $\tau > \tau_1 = \frac{at-x}{a-v}$, следовательно,

$$u(x, t) = \frac{1}{2a\rho} \int_0^{\tau_1} F(\tau) d\tau.$$

Вычисление интеграла в остальных случаях проводится аналогично.

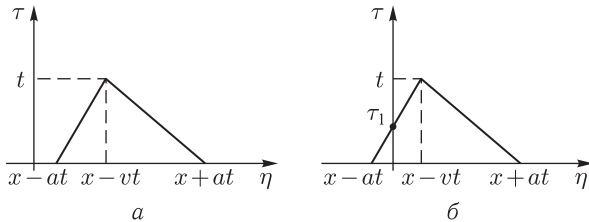


Рис. 8.17

$$8.169. \quad u(x, t) = \frac{F_0}{2a\rho} \cdot \begin{cases} 1 - e^{-\alpha \frac{at-x}{a-v_0}}, & v_0 t \leq x \leq at, \\ 1 - e^{-\alpha \frac{at+x}{a+v_0}}, & -at \leq x \leq v_0 t, \\ 0, & at \leq |x|. \end{cases}$$

$$8.170. \quad u(x, t) = \frac{F_0}{2a\rho\omega} \cdot \begin{cases} 1 - \cos \omega \frac{at-x}{a-v_0}, & v_0 t \leq x \leq at, \\ 1 - \cos \omega \frac{at+x}{a+v_0}, & -at \leq x \leq v_0 t, \\ 0, & at \leq |x|, \end{cases}$$

$$\text{где } \omega_{1,2} = \frac{a\omega}{a \mp v_0}.$$

$$8.171. \quad \psi(x, t) = -\frac{a}{2\rho_0} \cdot \begin{cases} \frac{at-x}{a-v_0} \int_0^{\frac{at-x}{a-v_0}} q(\tau) d\tau, & v_0 t \leq x \leq at, \\ \frac{at+x}{a+v_0} \int_0^{\frac{at+x}{a+v_0}} q(\tau) d\tau, & -at \leq x \leq v_0 t, \\ 0, & at \leq |x|, \end{cases}$$

где $a^2 = \frac{\gamma P_0}{\rho_0}$.

$$8.172. \quad \psi(x, t) = u_0 a \sin \omega \left(t - \frac{x}{a} \right) \eta \left(t - \frac{x}{a} \right), \quad a^2 = \frac{\gamma P_0}{\rho_0}.$$

$$8.173. \quad u(x, t) = e^{-\sqrt{\frac{C}{L}} R x} E(t - x\sqrt{LC}) \eta(t - x\sqrt{LC}).$$

$$8.174. \quad Q(t) = Q_0 e^{-\frac{1}{C_0} \sqrt{\frac{C}{L}} t}.$$

$$8.175. \quad u(x, t) = \frac{1}{\sqrt{GJK}} \int_0^{t-\frac{x}{a}} M(\tau) d\tau \eta \left(t - \frac{x}{a} \right).$$

У к а з а н и е. См. пример 1.4.

$$8.176. \quad u(x, t) = \frac{\hbar \omega u_0}{a^2 h^2 + \omega^2} \left[\omega e^{-ha(t-\frac{x}{a})} - \omega \cos \omega(t - \frac{x}{a}) + ha \sin \omega(t - \frac{x}{a}) \right].$$

У к а з а н и е. См. пример 1.4, т. 1.

$$8.177. \quad u(x, t) = \frac{Mv_0}{\rho a S} \left(1 - e^{-\frac{\rho S}{M}(at-x)} \right) \eta(at-x), \quad u_t(0, t) = v_0 e^{-\frac{\rho a S t}{M}}.$$

Отрыва не будет, так как натяжение $T(0, t) = -\frac{ESv_0}{a} e^{-\frac{\rho a S t}{M}} < 0$.

$$8.178. \quad \text{Отраженной волны нет при } \alpha = \sqrt{E\rho}.$$

$$8.179. \quad u(x, t) = \frac{k \eta \left(t - \frac{x}{a} \right)}{ma^2} \cdot \begin{cases} \frac{1}{\alpha} \int_0^{x-at} \mu \left(t - \frac{x-\xi}{a} \right) \sin \alpha \xi e^{-\frac{\rho S}{2M} \xi} d\xi, \\ \int_0^{x-at} \mu \left(t - \frac{x-\xi}{a} \right) \xi e^{-\frac{\rho S}{2V} \xi} d\xi, \\ \frac{1}{\alpha} \int_0^{x-at} \mu \left(t - \frac{x-\xi}{a} \right) sh \beta \xi e^{-\frac{\rho S}{2M} \xi} d\xi, \end{cases}$$

где $k = \frac{E^2 S^2}{4Ma^2}$, $\alpha = \sqrt{\frac{k}{Ma^2} - \left(\frac{ES}{2Ma^2} \right)^2}$ и $\beta = \sqrt{\left(\frac{ES}{2Ma^2} \right)^2 - \frac{k}{Ma^2}}$ — вещественные величины.

$$8.180. \quad u(x, t) = \cos x - \begin{cases} \cos x \cos t, & x-t \geq 0, \\ 1 - \sin(t-x) - \sin x \sin t, & x-t \leq 0. \end{cases}$$

$$8.181. \quad u(x, t) = \sin x(1 - \cos t) + (1 - e^{x-t})\eta(t-x).$$

$$8.182. \quad u(x, t) = e^{-x} - \begin{cases} e^{-x} \operatorname{ch} t, & x-t \geq 0, \\ \cos(t-x) - e^{-t} \operatorname{sh} x, & x-t \leq 0. \end{cases}$$

$$8.183. \quad u(x, t) = -2 \sin^2 \frac{x-t}{2} \eta(t-x).$$

$$8.184. \quad u(x, t) = [e^{x-t}(1-x+t) - 1] \eta(t-x).$$

$$8.185. u(x, t) = \cos x - \begin{cases} \cos x \cos t, & x - t \geq 0, \\ 1 - \sin x \sin t, & x - t \leq 0. \end{cases}$$

$$8.186. u(x, t) = e^{-t} + t - 1 + (e^{x-t} - 1)\eta(t - x).$$

$$8.187. u(x, t) = \begin{cases} \sin x \sin t, & x - t \geq 0, \\ 1 - \cos x \cos t, & x - t \leq 0. \end{cases}$$

$$8.188. u(x, t) = (e^{x-t} - 1)\eta(t - x).$$

$$8.189. u(x, t) = \begin{cases} \sin x \sin t, & x - t \geq 0, \\ e^{x-t} - \cos x \cos t, & x - t \leq 0. \end{cases}$$

$$8.190. u(x, t) = \cos x \cos t + 4 \sin^2 \frac{x-t}{2} \eta(t - x).$$

$$8.191. u(x, t) = \sin(x + t).$$

$$8.192. u(x, t) = \sin(|x - t|).$$

$$8.193. u(x, t) = \frac{1}{2} \eta(\pi - |x - t|) \sin(|x - t|) + \frac{1}{2} \eta(\pi - (x + t)) \sin(x + t).$$

$$1) u\left(\frac{\pi}{2}, t\right) = 0; \quad 2) u(x, t) = 0.$$

$$8.194. u(x, t) = \frac{1}{2} [\arctg(x + t) - \arctg(|x - t|)] + (t - x)^3 \eta(t - x).$$

$$8.195. u(x, t) = \frac{1}{2} \arctg \frac{4xt}{1 + (x^2 - t^2)^2} + (t - x)e^{x-t} \eta(t - x).$$

$$8.196. u(x, t) = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + x + t}{1 + |x - t|} + e^{x-t} \operatorname{sh}(t - x) \eta(t - x).$$

$$8.197. u(x, t) = \frac{1}{2} [e^{t-x} \sin(x - t) + e^{t+x} \sin(x + t)] + (t - x)e^{x-t} \eta(t - x).$$

$$8.198. u(x, t) = e^{-x-t} \sin(x + t) + 2e^{x-t} \sin(x - t) \eta(t - x).$$

$$8.199. u(x, t) = \frac{1}{2} [J_0(x - t) - J_0(x + t)] + (1 - e^{t-x}) \eta(t - x).$$

$$8.200. u(x, t) = J_0(x - t) \eta(x - t) + \cos(t - x) \eta(t - x).$$

$$8.201. u(x, t) = \begin{cases} 1 - \cos(x + t), & x - t \geq 0, \\ \cos(x - t) - \cos(x + t) - J_1(x - t), & x - t < 0. \end{cases}$$

$$8.202. u(x, t) = \frac{1}{2} [(x+t)^2 Y_2(x+t) - (x-t)^2 Y_2(|x-t|)] + (t-x) Y_0(t-x) \eta(t-x).$$

$$8.203. u(x, t) = \frac{1}{2} [e^{-|x-t|} I_1(x-t) + e^{-x-t} I_1(x+t)] - (x-t) K_0(t-x) \eta(t-x).$$

$$8.204. u(x, t) = \frac{1}{2} x^2 + \begin{cases} t(2x + 1), & x - t \geq 0, \\ x(2t + 1) + (t - x)e^{x-t}, & x - t < 0. \end{cases}$$

$$8.205. u(x, t) = -\frac{1}{6} xt^3 + (x - t)^2 \eta(t - x).$$

$$8.206. u(x, t) = \frac{1}{2} (x + t) \cos(x - t) + \frac{1}{2} \cdot \begin{cases} t \sin x \sin t - x \cos x \cos t - \\ - \sin t \cos x, & x - t \geq 0, \\ x \sin x \sin t - t \cos x \cos t - \\ - \sin x \cos t, & x - t < 0. \end{cases}$$

$$8.207. u(x, t) = t \operatorname{ch} t \operatorname{ch} x - x \operatorname{sh} x \operatorname{sh} t - \begin{cases} \operatorname{ch} x \operatorname{sh} t, & x - t \geq 0, \\ \operatorname{sh} x \operatorname{ch} t, & x - t < 0. \end{cases}$$

- 8.208.** $u(x, t) = \begin{cases} \sin x \cos t, & x - t \geq 0, \\ \sin t \cos x + \cos(x - t) - 1, & x - t < 0. \end{cases}$
- 8.209.** $u(x, t) = \sin(x + t) - \sin(t - x)\eta(t - x).$
- 8.210.** $u(x, t) = \frac{1}{2} \left[\sin(x + t)\eta\left(\frac{\pi}{2} - x - t\right) + \eta\left(x + t - \frac{\pi}{2}\right) \right] + \frac{1}{2} \operatorname{sign}(t - x) \left[\sin(|x - t|)\eta\left(\frac{\pi}{2} - |x - t|\right) + \eta\left(|x - t| - \frac{\pi}{2}\right) \right].$
- 8.211.** $u(x, t) = \begin{cases} (x + t)Y_1(x + t), & x - t \geq 0, \\ (t - x)Y_1(t - x) + (x + t)Y_1(x + t) + \arctg(x - t) - 1, & x - t < 0. \end{cases}$
- 8.212.** $u(x, t) = \frac{1}{2} [J_0(x - t) - J_0(x + t)].$
- 8.213.** $u(x, t) = \frac{1}{2} [(x + t)Y_0(x + t) + \operatorname{sign}(x - t)(x - t)Y_0(|x - t|)] + [(t - x)K_1(t - x) - 1]\eta(t - x).$
- 8.214.** $u(x, t) = xe^{-t} + \begin{cases} xt, & x - t \geq 0, \\ \frac{1}{2}(x^2 + t^2) - e^{x-t} + \cos(x - t), & x - t < 0. \end{cases}$
- 8.215.** $u(x, t) = \begin{cases} e^{-\frac{x}{2}} \operatorname{ch} \frac{t}{2}, & x - t \geq 0, \\ \frac{5}{6}e^{-t} - \frac{1}{3}e^{-x} \operatorname{ch} \frac{x - t}{2} + \frac{1}{2}e^{\frac{t - x}{2}}, & x - t < 0. \end{cases}$
- 8.216.** $u(x, t) = x \operatorname{erf} x - \frac{1}{\sqrt{\pi}}(1 - e^{-x^2}) - \frac{1}{\sqrt{\pi}}(e^{-x^2 - t^2} \operatorname{ch} 2xt - 1).$
- 8.217.** $u(x, t) = \begin{cases} e^{-x-t} \operatorname{ch} t, & x - t \geq 0, \\ e^{-2t} \operatorname{ch} x + (x - t)e^{-t}, & x - t < 0. \end{cases}$
- 8.218.** $u(x, t) = e^{-x}(e^t - t) + \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}}(1 - e^{-(x-t)^2}) - (x - t) \operatorname{erf}(x - t) - e^{t-x} + \frac{1}{2}(x - t)^2 \right] \eta(t - x).$
- 8.219.** $u(x, t) = \operatorname{erf} x + \frac{1}{2} [\operatorname{erf}(x + t) - \operatorname{erf}(x - t)] - \frac{2(x - t)}{\sqrt{\pi}} \eta(t - x).$
- 8.220.** $u(x, t) = -\frac{1}{2} [(x - t)^2 J_2(x - t) + (x + t)^2 J_2(x + t)] - [1 - J_0(x - t)] \eta(t - x).$
- 8.221.** $u(x, t) = \begin{cases} x + \frac{1}{6}(3x + t)t^2, & x - t \geq 0, \\ t - \frac{1}{2}(x - t)^2 + \frac{1}{6}(2t^3 + 3tx^2 - x^3), & x - t < 0. \end{cases}$
- 8.222.** $u(x, t) = t \sin x + t + \cos(x + t) + \frac{1}{2}(x - t)^2 \eta(t - x).$
- 8.223.** $u(x, t) = \begin{cases} e^x \operatorname{ch} t - \operatorname{sh} x, & x - t \geq 0, \\ e^x \operatorname{sh} t + x - t + 1 - \operatorname{sh} x, & x - t < 0. \end{cases}$
- 8.224.** $u(x, t) = \begin{cases} t \sin x \sin t, & x - t \geq 0, \\ x \sin x \sin t + (x - t) \cos x \cos t - 2 \sin(x - t), & x - t < 0. \end{cases}$
- 8.225.** $u(x, t) = \begin{cases} e^{-x}(e^t - 1), & x - t \geq 0, \\ e^{x-t} - e^{-x} - x + t, & x - t < 0. \end{cases}$

$$8.226. u(x, t) = x^2 K_2(x) -$$

$$-\frac{1}{2}(x+t)^2 K_2(x+t) - \begin{cases} \frac{1}{2}(x-t)^2 K_2(x-t), & x-t \geq 0, \\ 2 - \frac{1}{2}(x-t)^2 K_2(t-x), & x-t < 0. \end{cases}$$

$$8.227. u(x, t) = \begin{cases} \sin(x+t), & x-t \geq 0, \\ \frac{3}{2} \cos(x-t) + \frac{1}{2} \sin(x-t) + \sin(x+t) - \frac{3}{2} e^{x-t}, & x-t < 0. \end{cases}$$

$$8.228. u(x, t) = \operatorname{erf} x + \frac{1}{2} [\operatorname{erf}(x+t) - \operatorname{erf}(x-t)] + \frac{2}{\sqrt{\pi}} (1 - e^{x-t}) \eta(t-x).$$

$$8.229. u(x, t) = \begin{cases} (x+t)e^{x-t} - e^x \operatorname{sh} t, & x-t \geq 0, \\ (x+t - \frac{1}{2})e^{x+t} + \frac{8}{3} e^{\frac{x-t}{2}} - 2e^{x-t} - \frac{1}{6} e^{t-x}, & x-t < 0. \end{cases}$$

$$8.230. u(x, t) = \begin{cases} \frac{1}{2}(e^t - \cos t) \operatorname{sh} x, & x-t \geq 0, \\ \frac{1}{2} e^x \operatorname{ch} t - \frac{1}{2} \cos t \operatorname{sh} x + \frac{1}{2} [\sin(x-t) - \cos(x-t)], & x-t < 0. \end{cases}$$

$$8.231. u(x, t) = \begin{cases} \frac{1}{2}(x-t)e^{-x} \operatorname{sh} t, & x-t \geq 0, \\ \frac{1}{4}(x-t)e^{-x-t}, & x-t < 0. \end{cases}$$

$$8.232. u(x, t) = \begin{cases} \frac{2}{3} x t^3, & x-t \geq 0, \\ \frac{1}{3} x t(t^2 - x^2) + \frac{1}{144} [\frac{1}{2304} (1 - e^{-24(t-x)}) - (t-x)^3 + \\ + \frac{1}{8}(t-x)^2 - \frac{1}{96}(t-x)] + \frac{1}{24}(x+t)^4, & x-t < 0. \end{cases}$$

$$8.233. u(x, t) = \begin{cases} 2 \sin x + x - t - 2 \sin x \cos t, & x-t \geq 0, \\ 2 \sin x - \frac{1}{2} e^{x-t} + \frac{1}{2} \cos(x-t) - \frac{1}{2} \sin(x-t) - \\ - \sin(x+t), & x-t < 0. \end{cases}$$

$$8.234. u(x, t) = e^{-t} \sin x + \begin{cases} \sin x \sin t, & x-t \geq 0, \\ \frac{2}{3} - \frac{1}{2} \cos(x+t) - \frac{1}{6} \cos(x-t), & x-t < 0. \end{cases}$$

$$8.235. u(x, t) = x \sin t + \begin{cases} \sin x \sin t, & x-t \geq 0, \\ \frac{4}{7} - \frac{1}{14} \cos(x-t) - \frac{1}{2} \cos(x+t), & x-t < 0. \end{cases}$$

$$8.236. u(x, t) = (t-x) \operatorname{sh}(x+t) + \begin{cases} 1 - \operatorname{sh} x \operatorname{sh} x + x \operatorname{sh} x \operatorname{ch} t + t \operatorname{ch} x \operatorname{sh} t, & x-t \geq 0, \\ \frac{13}{5} + \frac{1}{2}(x+t) \operatorname{sh}(x+t) + \frac{1}{10}(x-t) \operatorname{sh}(x-t) - \\ - \frac{11}{10} \operatorname{ch}(x-t) - \frac{1}{2} \operatorname{ch}(x+t), & x-t < 0. \end{cases}$$

$$8.237. u(x, t) = \begin{cases} \frac{1}{2}(x-t) \cos 2x \cos 2t + \frac{1}{8} \cos 2x \sin 2t, & x-t \geq 0, \\ \frac{1}{8} \sin 2(x-t) + \frac{1}{16} \sin 2(x+t) + \\ + \frac{1}{4}(x-t) \cos 2(x+t), & x-t < 0. \end{cases}$$

$$8.238. \quad u(x, t) = \frac{(H - x + at)u_0(x - at) + (H - x - at)u_0(H - |H - x - at|)}{2(H - x)} + \\ + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{H-|H-x-at|} \frac{H-\xi}{H-x} u_1(\xi) d\xi.$$

У к а з а н и е. Ввести функцию $v = \frac{u}{H-x}$.

$$8.239. \quad u(r, t) = \begin{cases} \frac{(r-at)u_0(r-at) + (r+at)u_0(r+at)}{2r} + \\ + \frac{1}{2ar} \int_{r-at}^{r+at} \xi u_1(\xi) d\xi, & r-at \geq 0, \\ \frac{(at+r)u_0(at+r) + (r-at)u_0(at-r)}{2r} + \\ + \frac{1}{2ar} \int_{at-r}^{at+r} \xi u_1(\xi) d\xi, & r-at < 0. \end{cases}$$

$$\text{Частный случай: } u(r, t) = \begin{cases} \frac{e^{-\alpha r}}{r} (\operatorname{ch} \alpha at - at \operatorname{sh} \alpha at), & r-at \geq 0, \\ \frac{e^{\alpha t}}{r} (\operatorname{ch} \alpha r + at \operatorname{sh} \alpha r), & r-at < 0. \end{cases}$$

$$8.240. \quad \begin{aligned} \text{Отраженная волна} & \frac{a_2 - a_1}{a_2 + a_1} f\left(t + \frac{x}{a_1}\right) \eta\left(t + \frac{x}{a_1}\right), \\ \text{прошедшая волна} & \frac{2a_2}{a_2 + a_1} f\left(t - \frac{x}{a_2}\right) \eta\left(t - \frac{x}{a_2}\right). \end{aligned}$$

$$8.241. \quad r = \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \right)^2.$$

У к а з а н и е. Потенциал скоростей газа $u(x, t)$ является решением однородного волнового уравнения $u_{tt} = a^2 u_{xx}$ при $x \neq 0$, откуда

$$u(x, t) = \begin{cases} f_1(x - at) + g_1(x + at), & x < 0, \\ f_2(x - at) + g_2(x + at), & x > 0. \end{cases}$$

Функция $u(x, t)$ удовлетворяет начальным условиям $u(x, 0) = f(x)$ и $u_t(x, 0) = af'(x)$ и граничным условиям (условиям «сшивки»): в сечении $x = 0$ давление и поток газа непрерывны. Плотность потока энергии в плоской звуковой волне равна ρV^3 , где V — скорость элемента газа (см. [45]).

$$8.242. \quad r = \frac{b_1 \sqrt{h_1} - b_2 \sqrt{h_2}}{b_1 \sqrt{h_1} + b_2 \sqrt{h_2}}.$$

$$8.243. \quad u(0, t) = h e^{-hat} \int_0^t f(\xi) e^{h\xi} d\xi, \quad h = \frac{2\rho}{m}.$$

$$8.244. \quad u(x, t) = \begin{cases} \alpha e^{-\alpha(x+at)} \int_0^{x+at} f(\xi) e^{\alpha\xi} d\xi \cdot \eta(x + at), \\ f(x + at) + \left[-f(at - x) + \alpha e^{-\alpha(at-x)} \int_0^{at-x} f(\xi) e^{\alpha\xi} d\xi \right] \eta(at - x), \end{cases}$$

$\alpha = \frac{\rho S}{M}$, первая строка соответствует $x > 0$, вторая — $x < 0$.

$$8.245. \quad u(x, t) = \frac{Ia^2}{2T_0 + \alpha a} \left(1 - e^{-\frac{2T_0 + \alpha a}{Ma^2}(at - |x|)} \right) \eta(at - |x|).$$

$$8.246. u(r, t) = \frac{V_0 r_0^2}{r} \left[\frac{\omega r_0}{a} e^{-\frac{r_0 - r + at}{a}} - \sin \frac{\omega(r_0 - r + at)}{a} + \frac{\omega r_0}{a} \cos \frac{\omega(r_0 - r + at)}{a} \right] \frac{\eta(r_0 - r + at)}{1 + \frac{\omega^2 r_0^2}{a^2}}.$$

$$8.247. u(x, t) = \frac{U_0(x - at) + U_0(x + at)}{2}, \quad u_0(x + 2l) = U_0(x), \quad x \in \mathbb{R},$$

$$U_0(x) = \begin{cases} u_0(x), & 0 \leq x \leq l, \\ -u_0(-x), & -l \leq x \leq 0, \end{cases} \quad u_0(x) = \frac{F_0}{2T} \left(\frac{l}{2} - \left| x - \frac{l}{2} \right| \right), \quad x \in [-l; l].$$

$$1, a. u\left(\frac{l}{4}, t\right) = \frac{F_0}{2T} \cdot \begin{cases} \frac{l}{4}, & 0 \leq at \leq \frac{l}{4}, \\ \frac{l}{2} - at, & \frac{l}{4} \leq at \leq \frac{3l}{4}, \\ -\frac{l}{4}, & \frac{3l}{4} \leq at \leq \frac{5l}{4}, \\ at - \frac{3l}{2}, & \frac{5l}{4} \leq at \leq \frac{7l}{4}, \\ \frac{l}{4}, & \frac{7l}{4} \leq at \leq 2l. \end{cases}$$

$$u\left(\frac{l}{4}, t + \frac{2l}{a}\right) = u\left(\frac{l}{4}, t\right), \quad 0 \leq t,$$

$$1, b. u\left(\frac{l}{2}, t\right) = \frac{F_0}{2T} \cdot \begin{cases} \frac{l}{2} - at, & 0 \leq at \leq l, \\ at - \frac{3l}{2}, & l \leq at \leq 2l \end{cases}$$

$$u\left(\frac{l}{2}, t + \frac{2l}{a}\right) = u\left(\frac{l}{2}, t\right), \quad 0 \leq t,$$

$$2, a. u\left(x, \frac{l}{8a}\right) = \frac{F_0}{2T} \cdot \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq \frac{3l}{8}, \\ \frac{3l}{8}, & \frac{3l}{8} \leq x \leq \frac{5l}{8}, \\ -\frac{l}{4}, & \frac{3l}{4} \leq at \leq \frac{5l}{4}, \\ l - x, & \frac{5l}{8} \leq x \leq l. \end{cases}$$

$$2, b. u\left(x, \frac{l}{2}\right) = 0.$$

$$8.248. u(x, t) = \frac{U_0(x - at) + U_0(x + at)}{2}, \quad U_0(x + 2l) = U_0(x), \quad x \in \mathbb{R},$$

$$U_0(x) = \frac{4h^2}{l^2} x(l - |x|), \quad x \in [-l; l],$$

$$1, a. u\left(\frac{l}{2}, t\right) = \frac{4h^2}{l^2} \cdot \begin{cases} \frac{l^2}{4} - a^2 t^2, & 0 \leq at \leq \frac{l}{2}, \\ \left(\frac{l}{2} - at\right) \left(\frac{3l}{2} - at\right), & \frac{l}{2} \leq at \leq \frac{3l}{2}, \\ \left(at - \frac{3l}{2}\right) \left(\frac{5l}{2} - at\right), & \frac{3l}{2} \leq at \leq \frac{5l}{2}, \end{cases}$$

$$u\left(\frac{l}{2}, t + \frac{2l}{a}\right) = u\left(\frac{l}{2}, t\right), \quad 0 \leq t.$$

$$1, 6. u\left(\frac{3l}{4}, t\right) = \frac{2h}{l^2} \cdot \begin{cases} \frac{3l^2}{8} - 2a^2t^2, & 0 \leq at \leq \frac{l}{4}, \\ \frac{l^2}{2} - lat, & \frac{l}{4} \leq at \leq \frac{3l}{4}, \\ \frac{13l^2}{8} - 4lat + 2a^2t^2, & \frac{3l}{4} \leq at \leq \frac{5l}{4}, \\ lat - \frac{3l^2}{2}, & \frac{5l}{4} \leq at \leq \frac{7l}{4}, \\ -2a^2t^2 + 8lat - \frac{61l^2}{8}, & \frac{7l}{4} \leq at \leq 2l, \end{cases}$$

$$u\left(\frac{3l}{4}, t + \frac{2l}{a}\right) = u\left(\frac{3l}{4}, t\right), \quad 0 \leq t.$$

$$2, a. u\left(x, \frac{l}{4a}\right) = \frac{2h}{l^2} \cdot \begin{cases} lx, & 0 \leq x \leq \frac{l}{4}, \\ -2x^2 + 2lx - \frac{l^2}{8}, & \frac{l}{4} \leq x \leq \frac{3l}{4}, \\ l^2 - lx, & \frac{3l}{4} \leq x \leq l. \end{cases} \quad 2, 6. u\left(x, \frac{l}{2a}\right) = 0.$$

$$8.249. u(x, t) = h \sin \frac{\pi x}{l} \sin \frac{\pi at}{l}, \quad 0 \leq x \leq l.$$

$$8.250. u(x, t) = U_0(x + at) - U_0(x - at), \quad U_0(x + 2l) = U_0(x), \quad x \in \mathbb{R},$$

$$U_0(x) = \frac{1}{2} \int_0^{|x|} u_1(\xi) d\xi, \quad |x| \leq l.$$

$$8.251. u(x, t) = \frac{v_0 l}{2\pi a} \sin \frac{2\pi x}{l} \sin \frac{2\pi at}{l}, \quad 0 \leq x \leq l.$$

$$8.252. u(x, t) = \frac{U_0(x - at) + U_0(x + at)}{2}, \quad U_0(x + 4l) = U_0(x), \quad x \in \mathbb{R},$$

$$U_0(x) = \begin{cases} \tilde{u}_0(x), & 0 \leq x \leq 2l, \\ -\tilde{u}_0(-x), & -2l \leq x \leq 0, \end{cases} \quad \tilde{u}_0(x) = \frac{F_0}{T} \cdot \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq \frac{l}{2}, \\ \frac{l}{2}, & \frac{l}{2} \leq x \leq \frac{3l}{2}, \\ 2l - x, & \frac{3l}{2} \leq x \leq 2l. \end{cases}$$

$$1, a. u\left(\frac{l}{2}, t\right) = \frac{F_0}{2T} \cdot \begin{cases} l - at, & 0 \leq at \leq 2l, \\ at - 3l, & 2l \leq at \leq 4l, \end{cases}$$

$$u\left(\frac{l}{2}, t + \frac{4l}{a}\right) = u\left(\frac{l}{2}, t\right), \quad 0 \leq t.$$

$$1, 6. u\left(\frac{l}{2}, t\right) = \frac{F_0}{2T} \begin{cases} l, & 0 \leq at \leq \frac{l}{2}, \\ 2(l - at), & \frac{l}{2} \leq at \leq \frac{3l}{2}, \\ -l, & \frac{3l}{2} \leq at \leq \frac{5l}{2}, \\ 2(at - 3l), & \frac{5l}{2} \leq at \leq \frac{7l}{2}, \\ l, & \frac{7l}{2} \leq at \leq 4l. \end{cases}$$

$$u\left(\frac{l}{2}, t + \frac{4l}{a}\right) = u\left(\frac{l}{2}, t\right), \quad 0 \leq t.$$

$$2, \text{ а. } u\left(x, \frac{l}{2a}\right) = \frac{F_0 x}{2T}. \quad 2, \text{ б. } u\left(x, \frac{3l}{4a}\right) = \frac{F_0}{2T} \cdot \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq \frac{l}{2}, \\ x - \frac{l}{4}, & \frac{l}{4} \leq x \leq \frac{3l}{4}, \\ \frac{l}{2}, & \frac{3l}{4} \leq x \leq l. \end{cases}$$

$$8.253. \quad u(x, t) = U_0(x + at) - U_0(x - at), \quad U_0(x + 4l) = U_0(x), \quad x \in \mathbb{R},$$

$$U_0(x) = \frac{1}{2a} \int_0^{|x|} u_1(\xi) d\xi, \quad |x| \leq 2l, \quad u_1(x) = \begin{cases} u_1(x), & 0 \leq x \leq l, \\ u_1(2l - x), & l \leq x \leq 2l. \end{cases}$$

$$8.254. \quad u(x, t) = \frac{U_0(x - at) + U_0(x + at)}{2}, \quad U_0(x + 4l) = U_0(x), \quad x \in \mathbb{R},$$

$$U_0(x) = \begin{cases} \tilde{u}_0(x), & 0 \leq x \leq 2l, \\ -\tilde{u}_0(-x), & -2l \leq x \leq 0, \end{cases} \quad \tilde{u}_0(x) = \begin{cases} u_0(x), & 0 \leq x \leq 2, \\ u_0(l - 2x), & l \leq x \leq 2l. \end{cases}$$

$$8.255. \quad u(x, t) = h \sin \frac{\pi x}{2l} \sin \frac{\pi at}{2l}, \quad 0 \leq x \leq l.$$

$$8.256. \quad u(x, t) = \frac{2lv_0}{3\pi a} \sin \frac{3\pi x}{2l} \sin \frac{3\pi at}{2l}, \quad 0 \leq x \leq l.$$

$$8.257. \quad u(x, t) = \frac{U_0(x - at) + U_0(x + at)}{2} - \frac{gx(l - x)}{2a^2}, \quad U_0(x + 4l) = U_0(x), \quad x \in \mathbb{R},$$

$$U_0(x) = \frac{gx(l - |x|)}{2a^2}, \quad |x| \leq l.$$

$$1, \text{ а. } u\left(\frac{l}{2}, t\right) = -\frac{g}{2a^2} \cdot \begin{cases} a^2 t^2, & 0 \leq at \leq \frac{l}{4}, \\ -a^2 t^2 + 2lat - \frac{l^2}{2}, & \frac{l}{4} \leq at \leq \frac{3l}{2}, \\ a^2 t^2 - 4atl + 4l^2, & \frac{3l}{2} \leq at \leq 2l, \end{cases}$$

$$u\left(\frac{l}{2}, t + \frac{2l}{a}\right) = u\left(\frac{l}{2}, t\right), \quad 0 \leq t.$$

$$1, \text{ б. } u\left(\frac{3l}{4}, t\right) = -\frac{g}{2a^2} \cdot \begin{cases} a^2 t^2, & 0 \leq at \leq \frac{l}{4}, \\ \frac{l}{2}\left(at - \frac{l}{8}\right), & \frac{l}{4} \leq at \leq \frac{3l}{4}, \\ -a^2 t^2 + 2lat - \frac{5l^2}{8}, & \frac{3l}{4} \leq at \leq \frac{5l}{4}, \\ \frac{l}{2}\left(\frac{15l}{8} - at\right), & \frac{5l}{4} \leq at \leq \frac{7l}{4}, \\ a^2 t^2 - 4lat + 4l^2, & \frac{7l}{4} \leq at \leq 2l, \end{cases}$$

$$u\left(\frac{l}{2}, t + \frac{2l}{a}\right) = u\left(\frac{l}{2}, t\right), \quad 0 \leq t;$$

$$2, \text{ а. } u\left(x, \frac{l}{4a}\right) = \frac{g}{2a^2} \cdot \begin{cases} x\left(x - \frac{l}{2}\right), & 0 \leq x \leq \frac{l}{4}, \\ -\frac{l^2}{16}, & \frac{l}{4} \leq x \leq \frac{3l}{4}, \\ x^2 - \frac{3lx}{2} + \frac{l^2}{2}, & \frac{3l}{4} \leq x \leq 2l. \end{cases}$$

$$2, \text{ б. } u\left(x, \frac{3l}{2a}\right) = -\frac{g}{2a^2} x(l - x), \quad 0 \leq x \leq l.$$

$$8.258. \quad u\left(\frac{l}{2}, t\right) = \frac{F_0 l}{2\pi T} \left[(-1)^k - (2k+1) \cos \frac{\pi a t}{l} \right], \quad \frac{kl}{q} \leq t \leq \frac{k+1}{a}, \quad k \in \mathbb{N}.$$

$$2, a. \quad u\left(x, \frac{l}{2a}\right) = \frac{F_0 l}{\pi T} \left(1 - \left| \cos \frac{\pi x}{l} \right| \right), \quad 0 \leq x \leq l.$$

$$2, б. \quad u\left(x, \frac{l}{a}\right) = \frac{F_0 L}{\pi T} \sin \frac{\pi x}{l}, \quad 0 \leq x \leq l.$$

$$8.259. \quad u(x, t) = \frac{F_0}{\rho} \sin \frac{2\pi x}{l} \cdot \begin{cases} \frac{\omega \sin \omega_1 t - \omega_1 \sin \omega t}{\omega^2 - \omega_1^2}, & \omega \neq \omega_1 = \frac{2\pi a}{l}, \\ \frac{\sin \omega t - \omega t \cos \omega t}{2\omega}, & \omega = \omega_1. \end{cases}$$

$$8.260. \quad u(x, t) = \frac{F_0}{\rho} \sin \frac{\pi x}{2l} \cdot \begin{cases} \frac{\omega \sin \omega_1 t - \omega_1 \sin \omega t}{\omega^2 - \omega_1^2}, & \omega \neq \omega_1 = \frac{\pi a}{2l}, \\ \frac{\sin \omega t - \omega t \cos \omega t}{2\omega}, & \omega = \omega_1. \end{cases}$$

$$8.261. \quad 1) \quad u\left(\frac{l}{2}, t\right) = \frac{F_0 l}{\pi T} \left[(-1)^k - (2k+1) \cos \frac{\pi a t}{2l} \right], \quad 2kl \leq at \leq 2(k+1)l, \quad k \in \mathbb{N};$$

$$2) \quad u\left(x, \frac{l}{4a}\right) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq \frac{l}{4}, \\ 1 - \cos\left(\frac{\pi}{8} - \frac{\pi}{2l} \left| \frac{l}{2} - x \right| \right), & \frac{l}{4} \leq x \leq \frac{3l}{4}, \\ 0, & \frac{3l}{4} \leq x \leq l. \end{cases}$$

$$8.262. \quad u(x, t) = v(x, t) - \frac{gx}{a^2} \left(l - \frac{x}{2} \right), \quad v(x, t) = \frac{V_0(x-at) + V_0(x+at)}{2},$$

$$V_0(x+4l, t) = V_0(x, t), \quad V_0(x, t) = \frac{gx}{a^2} \left(l - \frac{|x|}{2} \right), \quad |x| \leq 2l.$$

$$8.263. \quad u\left(x, \frac{l}{3a}\right) = A \cdot \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq \frac{2l}{3}, \\ x - \left(l + \frac{1}{h} \right) \left(1 - e^{-h\left(x - \frac{2l}{3}\right)} \right), & \frac{2l}{3} \leq x \leq l. \end{cases}$$

$$8.264. \quad u\left(x, \frac{3l}{4a}\right) = \frac{v_0}{a} \cdot \begin{cases} \frac{l}{4} + \frac{1}{h} \left(1 - e^{-h\left(\frac{3l}{4} - x\right)} \right), & 0 \leq x \leq \frac{3l}{4}, \\ l - x, & \frac{3}{4} \leq x \leq l. \end{cases}$$

$$8.265. \quad u\left(x, \frac{l}{2a}\right) = \frac{g}{2a^2} \cdot \begin{cases} x(l-x), & 0 \leq x \leq \frac{l}{2}, \quad p=hl, \\ x\left(\frac{p+2}{h} - x\right) - \frac{p+2}{h^2} + \frac{2}{h^2} e^{-h\left(x - \frac{l}{2}\right)}, & \frac{l}{2} \leq x \leq l, \quad h = \frac{k}{T_0}. \end{cases}$$

Решение (фрагменты). Задача для неоднородного уравнения

$$\begin{aligned} u_{tt} &= a^2 u_{xx} + g, \quad 0 < x < l, \quad 0 < t, \\ u(0, t) &= 0, \quad u_x(l, t) + hu(l, t) = 0, \\ u(x, 0) &= 0, \quad u_t(x, 0) = 0 \end{aligned}$$

заменой $u(x, t) = v(x, t) + w(x)$ сводится к задаче для однородного уравнения

$$\begin{aligned} v_{tt} &= a^2 v_{xx}, \quad 0 < x < l, \quad 0 < t, \\ v(0, t) &= 0, \quad v_x(l, t) + hv(l, t) = 0, \\ v(x, 0) &= -w(x), \quad v_t(x, 0) = 0, \end{aligned}$$

где $w(x) = \frac{glx}{2a^2} \left(\frac{p+2}{p+1} - \frac{x}{l} \right)$. Решение задачи для $v(x, t)$, удовлетворяющее условию при $x = 0$, имеет вид

$$v(x, t) = f(at - x) - f(at + x).$$

Начальные условия выполняются, если

$$f(x) = \begin{cases} -\frac{1}{2}w(-x), & -l \leq x < 0, \\ \frac{1}{2}w(x), & 0 \leq x < l, \end{cases}$$

где константа интегрирования, не влияющая на результат, принята равной нулю. Для решения данной задачи нужно продолжить $f(x)$ на промежуток $[l; 2l]$; закон продолжения определяется граничным условием при $x = l$

$$f'(z) + hf(z) = -f'(z - 2l) + hf(z - 2l), \quad l \leq z \leq 2l,$$

откуда

$$f(z) = \frac{g}{4a^2} \left[(z - 2l)^2 + \frac{p^2 - p - 4}{h(p + 1)}(z - 2l) - \frac{2(p^2 - 2)}{h^2(p + 1)} - \frac{4}{h^2}e^{-h(z-l)} \right], \quad l \leq z \leq 2l.$$

Для определения постоянной интегрирования (в приведенном выражении для $f(z)$ эта константа уже определена) нужно использовать непрерывность $f(z)$ при $z = l$.

$$\begin{aligned} \text{8.266. } 1) u(x, \frac{3l}{5a}) &= A \cdot \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq \frac{2l}{5}, \\ \frac{5\alpha ax + 2lT_0}{5(\alpha a + T_0)}, & \frac{2l}{5} \leq x \leq l. \end{cases} \\ 2) u(x, \frac{5l}{7a}) &= \frac{v_0}{a} \cdot \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq \frac{2l}{7}, \\ \frac{7\alpha ax + 2lT_0}{7(\alpha a + T_0)}, & \frac{2l}{7} \leq x \leq l. \end{cases} \end{aligned}$$

Решение (фрагменты). 1) Постановка задачи:

$$\begin{aligned} u_{tt} &= a^2 u_{xx}, \quad 0 < x < l, \quad 0 < t, \\ u(0, t) &= 0, \quad -T_0 u_x(l, t) - \alpha u_t(l, t) = 0, \\ u(x, 0) &= Ax, \quad u_t(x, 0) = 0. \end{aligned}$$

Условию $u(0, t) = 0$ удовлетворяет функция $u(x, t) = f(at - x) - f(at + x)$, а из начальных условий следует, что $f(x) = -\frac{Ax}{2}$, $|x| \leq l$, где константа интегрирования, не влияющая на результат, принята равной нулю. Условие при $x = l$ запишется в виде $f'(l) = \frac{\alpha a - T_0}{\alpha a + T_0} f'(z - 2l)$, $l \leq z \leq 2l$, откуда

$$f(z) = \frac{\alpha a - T_0}{\alpha a + T_0} f(z - 2l) + C, \quad l \leq z \leq 2l.$$

Константа C определяется из условия непрерывности функции $f(z)$ при $z = l$. В итоге

$$f(z) = -\frac{A}{2} \cdot \begin{cases} z, & |z| \leq l, \\ \frac{\alpha a - T_0}{\alpha a + T_0}(z - 2l) + \frac{2\alpha al}{\alpha a + T_0}, & l \leq z \leq 2l. \end{cases}$$

2) Как и в предыдущем пункте с помощью аналогичных выкладок получаются выражения $u(x, t) = f(at - x) - f(at + x)$,

$$f(z) = -\frac{v_0}{2a} \cdot \begin{cases} z, & |z| \leq l, \\ \frac{\alpha a - T_0}{\alpha a + T_0}(z - 2l) + \frac{2\alpha a l v_0}{\alpha a + T_0}, & l \leq z \leq 2l. \end{cases}$$

$$\mathbf{8.267.} \quad u\left(x, \frac{4l}{5a}\right) = A \cdot \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq \frac{l}{5}, \\ \frac{l}{5} - \frac{1}{\alpha} \left(1 - e^{\alpha(\frac{l}{5} - x)}\right), & \frac{l}{5} \leq x \leq l, \end{cases}$$

$$\alpha = \frac{\rho}{M},$$

Р е ш е н и е (фрагменты). Постановка задачи:

$$\begin{aligned} u_{tt} &= a^2 u_{xx}, \quad 0 < x < l, \quad 0 < t, \\ u(0, t) &= 0, \quad -T_0 u_x(l, t) = M u_{tt}(l, t), \\ u(x, 0) &= Ax, \quad u_t(x, 0) = 0. \end{aligned}$$

Условию $u(0, t) = 0$ удовлетворяет функция $u(x, t) = f(at - x) - f(at + x)$, а из начальных условий следует, что $f(x) = -\frac{Ax}{2}$, $|x| \leq l$, где константа интегрирования, не влияющая на результат, принята равной нулю. Условие при $x = l$ запишется в виде $f''(z) + \alpha f'(z) = f''(z - 2l) - \alpha f'(z - 2l)$, $l \leq z \leq 2l$, откуда

$$f(z) = C_1 + C_2 e^{-\alpha z} + \frac{Az}{2}, \quad l \leq z \leq 2l.$$

Непрерывность смещения струны при $x = l$: $C_1 + C_2 e^{-\alpha l} + \frac{Al}{2} = -\frac{Al}{2}$; непрерывность скорости $u_t(x, 0) = af'(-x) - af'(x)$ при $x = l$; $f'(-l) = f'(l)$, или $-\alpha C_2 e^{-\alpha l} + \frac{A}{2} = -\frac{A}{2}$. В результате

$$f(z) = \begin{cases} -\frac{Az}{2}, & |z| \leq l, \\ \frac{A}{2}(z - 2l) - \frac{A}{\alpha}(1 - e^{-\alpha(z-l)}), & l \leq z \leq 2l. \end{cases}$$

$$\mathbf{8.268.} \quad u\left(x, \frac{5l}{6a}\right) = \frac{v_0}{a} \cdot \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq \frac{l}{6}, \\ \frac{l}{6a} - \frac{1}{\alpha} \left(1 - e^{-\alpha(x - \frac{l}{6})}\right), & \frac{l}{6} \leq x \leq l, \end{cases}$$

$$\alpha = \frac{\rho}{M}.$$

У к а з а н и е. Так же, как и в предыдущей задаче, получаются соотношения $u(x, t) = f(at - x) - f(at + x)$,

$$f(z) = \begin{cases} -\frac{v_0|z|}{2a}, & |z| \leq l, \\ -\frac{v_0 z}{2a} + \frac{v_0}{\alpha a} \left(1 - e^{-\alpha(z-l)}\right), & l \leq z \leq 2l, \end{cases}$$

$$\alpha = \frac{\rho}{M}.$$

$$\mathbf{8.269.} \quad u(x, t) = u_0 \left[\eta(at - x) + \sum_{n=1}^{\infty} \eta(at + x - 2nl) + \eta(at - x - 2nl) \right], \quad u_0 = \frac{lI}{ma}.$$

График дан на рис. 8.18.

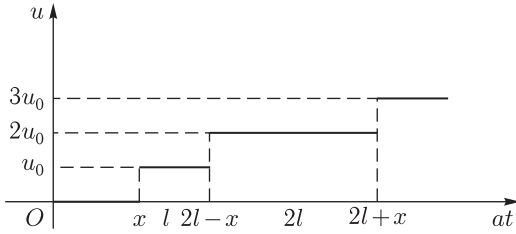


Рис. 8.18

$$\mathbf{8.270.} \quad u(x, t) = \frac{I}{a\rho S} \left\{ \eta(at-x) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n [\eta(x+at-2nl) + \eta(at-x-2nl)] \right\}.$$

8.271. Решение. Постановка задачи:

$$u_{tt} = a^2 u_{xx}, \quad 0 < x < l, \quad 0 < t,$$

$$u_{tt}(0, t) = \frac{\mu a^2}{l} u_x(0, t), \quad u_x(l, t) = 0,$$

$$u(x, 0) = 0, \quad u_t(x, 0) = \begin{cases} v, & x = 0, \\ 0, & 0 < x < l. \end{cases}$$

Общее решение волнового уравнения $u(x, t) = f(x+at) + g(x-at)$ (пример 8.3). Если $x = l$, то $f'(l-at) + g'(l+at) = 0$, $at \geq 0$, или $f'(x) + g'(2l-x) = 0$, $x \leq l$. Отсюда $f(x) = g(2l-x) + C$, поэтому $u(x, t) = g(2l-x+at) + g(x+at)$. Если ввести функцию $h(x) = f(x) + C/2$, то $u(x, t) = h(2l-x+at) + h(x+at)$. При $t = 0$, $0 < x \leq l$

$$\begin{cases} h(2l-x) + h(x) = 0, \\ ah'(2l-x) + ah'(x) = 0, \end{cases}$$

откуда $h(x) = C_1$, $h(2l-x) = -C_1$. Так как $h(l) = C_1 = -C_1$, то $C_1 = 0$. Полученный результат можно представить в форме

$$h(x) = 0, \quad 0 < x < 2l. \quad (8.101)$$

При $x = 0$

$$h''(2l+at) + h''(at) = -\frac{\mu}{l} h'(2l+at) + \frac{\mu}{l} h'(at),$$

или

$$h''(x) + \frac{\mu}{l} h'(x) = -h''(x-2l) + \frac{\mu}{l} h'(x-2l), \quad 2l < x. \quad (8.102)$$

Если $2l < x < 4l$, то в соответствии с (8.101) правая часть уравнения (8.102) равна нулю, поэтому

$$h'(x) = e^{-\frac{\mu x}{l}}.$$

Скорость сечения в точке $x = 0$

$$u_t(0, t) = ah'(2l+at) + ah'(at). \quad (8.103)$$

При $t \rightarrow 0$ скорость $v = ah'(2l+0) + ah'(0)$. Так как согласно (8.102) $h'(0) = 0$, то $C = \frac{v}{a} \exp(2\mu)$. Таким образом,

$$h'(x) = \frac{v}{a} e^{-\frac{\mu}{l}(x-2l)}, \quad 2l \leq x < 4l. \quad (8.104)$$

Если $4l < x < 6l$, то уравнение (8.102) примет вид

$$h'' + \frac{\mu}{l} h' = \frac{2\mu v}{al} e^{-\frac{\mu}{l}(x-4l)},$$

откуда

$$h' = \frac{2\mu v}{al} x e^{-\frac{\mu}{l}(x-4l)} + C e^{-\frac{\mu}{l}x}. \quad (8.105)$$

Константа C определяется из условия непрерывности скорости (8.103) при $at = 2l$: $h'(2l-0) + h'(4l-0) = h'(2l+0) + h'(4l+0)$. В результате подстановки h' из выражений (8.101), (8.104), (8.105) для C получается выражение:

$$C = \frac{v}{a} e^{2\mu} - (1 + 8\mu) \frac{v}{a} e^{4\mu}.$$

Следовательно,

$$h' = \frac{v}{a} e^{-\frac{\mu}{l}(x-2l)} - \frac{v}{a} \left[1 - \frac{2\mu}{l}(x-4l) \right] e^{-\frac{\mu}{l}(x-4l)}, \quad 4l \leq x < 6l.$$

Деформация $ESu_x(0, t) = ES[h'(at) - h'(2l + at)]$ элемента, примыкающего к сечению $x = 0$, в момент времени τ окончания взаимодействия меняет знак с минуса на плюс. Если $at \in (0, 2l)$, то

$$u_x(0, t) = -\frac{v}{a} e^{-\frac{\mu}{l}at} < 0,$$

т. е. взаимодействие продолжается. Если $at \in (2l, 4l)$, то

$$u_x(0, t) = \frac{v}{a} e^{-\frac{\mu}{l}(at-2l)} \left[2 - e^{-2\mu} - \frac{2\mu}{l}(at-2l) \right]$$

меняет знак в точке

$$\tau = \frac{l}{2\mu a} (4\mu + 2 - e^{-2\mu})$$

при условии

$$2\frac{l}{a} < \frac{l}{2\mu a} (4\mu + 2 - e^{-2\mu}) < 4\frac{l}{a}.$$

Неравенство, связывающее два выражения слева, выполняется при любом μ , поэтому $\tau > 2l/a$. Второе неравенство удовлетворяется при $\mu \geq \mu_0$, где μ_0 — корень уравнения $2(1 - 2\mu) \exp(2\mu) = 1$ (существование и единственность корня μ_0 вытекает из монотонности левой части).

8.272. $\tau = \frac{l}{2\mu a} (4\mu + 2 + e^{-2\mu}) \in \left[\frac{2l}{a}, \frac{4l}{a} \right]$ при $\mu \geq \mu_0$, где μ_0 — корень уравнения $2 + e^{-2\mu} = 4\mu$.

8.273. $u(x, y) = x + \frac{e^{y(1-x^2)} - e^{1-x^2}}{1-x^2}.$

8.274. 1) $u(x, y) = y + \frac{e^{1-y} - e^{x(1-y)}}{y-1}$; 2) $u = \operatorname{erf} y + e^{\left(\frac{y-1}{2}\right)^2} \left[\operatorname{erf} \frac{2x+y-1}{2} - \operatorname{erf} \frac{y+1}{2} \right].$

8.275. $u(x, y) = e^{-x} \left[e^{-y^2} - \frac{\sqrt{\pi}}{2} x e^{-xy + \frac{x^2}{4}} \left(\operatorname{erf} \left(y - \frac{x}{2} \right) - \operatorname{erf} \left(1 - \frac{x}{2} \right) \right) \right].$

У к а з а н и е. Уравнение записать в виде $(u_y + xu)_x + u_y + xu = 0$.

8.276. $u(x, y) = \frac{x+2y}{5} e^{\frac{y-2x}{5}} - \frac{2x-y}{10} e^{-\frac{4x+3y}{10}}.$

8.277. $u(x, y) = \left[u_1 \left(\frac{9y-4x}{5} \right) e^{\frac{\sqrt{2}}{10}(9y-4x)} + \right. \\ \left. + u_2 \left(\frac{9(x-y)}{5} \right) e^{\frac{3\sqrt{2}}{5}(x-y)} - u_1(0) \right] e^{-\frac{\sqrt{2}}{10}(2x+3y)}.$

8.278. $u(x, y) = \operatorname{sh} \left(\ln \sqrt{x} + \frac{1}{\sqrt{y}} \right).$

$$8.279. u(x, y) = x + y - \frac{y^3}{3}.$$

$$8.280. u(x, y) = (xy)^{\frac{3}{2}}(x^3 + y^3).$$

$$8.281. u(x, y) = \frac{y}{x + y}.$$

$$8.282. u(x, y) = x(y - \cos x).$$

$$8.283. u(x, y) = y + \operatorname{cosec} x.$$

$$8.284. u(x, y) = (x + y)^2.$$

Решение. Посредством замены переменных $\xi = x^2 + y^2$, $\eta = xy$ уравнение преобразуется к каноническому виду $u_{\xi\eta} = 0$, откуда общее решение $u(x, y) = f(x^2 + y^2) + g(xy)$. Условия на характеристиках приводят к системе

$$\begin{cases} f(x) + g\left(\frac{2x}{5}\right) = \frac{9x}{5}, \\ f(x) + g\left(\frac{3x}{10}\right) = \frac{8x}{5}, \end{cases}$$

из которой следует, что

$$g(x) - g\left(\frac{3x}{4}\right) = \frac{x}{2}. \quad (8.106)$$

Правая часть уравнения (8.106) — многочлен первой степени, поэтому решение имеет вид $g(x) = Ax + h(x)$. Подстановка $g(x)$ в уравнение (8.106) превращает его в тождество, если $A = 2$, $h(x) = h\left(\frac{3x}{4}\right)$. Из уравнения для

$h(x)$ следует, что $h(x) = h\left(\frac{3}{4}x\right) = h\left(\left(\frac{3}{4}x\right)^2\right) = \dots = h\left(\left(\frac{3}{4}x\right)^n\right)$, $n \in \mathbb{N}$, откуда $h(x) = h(0)$. Итак, $g(x) = 2x + C$, $f(x) = x - C$, решение задачи $u(x, y) = x^2 + y^2 - C + 2xy + C = (x + y)^2$.

$$8.285. u(x, y) = 1 + 2e^{y-1} \operatorname{sh} \sqrt{y^2 - x^2}.$$

8.286. $u(x, y) = e^{\frac{y-x}{x}} \ln xy + \sqrt{\frac{x}{y}} - 1$. Указание. Уравнение приводится к каноническому виду $u_{\xi\eta} + u_{\xi} = 0$ посредством замены переменных $\xi = xy$, $\eta = \frac{x}{y}$. Общее решение уравнения $u(x, y) = f(xy) e^{-\frac{x}{y}} + g\left(\frac{x}{y}\right)$ получается последовательным интегрированием по переменным ξ и η .

$$8.287. u(x, y) = x + y + \frac{x - y}{x + y}.$$

$$8.288. u(x, y) = x(x + y)^2(x^2 + 3y^2).$$

$$8.289. u(x, y) = \sqrt[4]{xy}(\sqrt{xy} + 1) - \sqrt{xy} + x.$$

$$8.290. u(x, y) = u_1\left(\sqrt[5]{\frac{x^4}{y}}\right) + \frac{y}{x^4}[u_2(\sqrt[5]{xy}) - u_2(1)]; u(x, y) = 1 + \frac{y^2}{x^3}.$$

Указание. Замена переменных $\xi = \frac{y}{x^4}$, $\eta = xy$ преобразует уравнение к каноническому виду $\xi u_{\xi\eta} - u_{\eta} = 0$, общее решение которого

$$u(x, y) = f_1\left(\frac{y}{x^4}\right) + \frac{y}{x^4} f_2(xy).$$

Из условий на характеристиках получается система

$$f_1(x) = u_1\left(\frac{1}{\sqrt[5]{x}}\right) - x f_2(1),$$

$$f_2(x) = u_2(\sqrt[5]{x}) - f_1(1),$$

$$\text{при этом } f_1(1) + f_2(1) = u_1(1).$$

$$8.291. \quad u(x, y) = \frac{e^{y(x-y)} - e^{y-x}}{y+1}.$$

$$8.292. \quad u(x, y) = u_1(x-y) + u_2(y)e^{-y(x-y)} - u_2(0) + (x-y) \int_0^y u_2(s)e^{-s(x-y)} ds;$$

$$u(x, y) = \frac{e^{-y(x-y+1)} - x + y}{1 - x + y}.$$

$$8.293. \quad u(x, y) = 1 - e^{y-x} + \frac{e^{-y(1+y-x)} - e^{y-x}}{1 + y - x}.$$

$$8.294. \quad u(x, y) = x^{-20} \left[(x^{13} - 1)x^{\frac{13}{3}} + e^{\frac{13y^2}{12}} \right] e^{\frac{11y^2}{12}}.$$

У к а з а н и е. Посредством замены переменных $\xi = 16 \ln x - y^2$, $\eta = 4 \ln x - y^2$ уравнение преобразуется к каноническому виду $u_{\xi\eta} + u_{\xi} + u_{\eta} + u = 0$, или $\frac{\partial}{\partial \xi}(u_{\eta} + u) + u_{\eta} + u = 0$. Отсюда в результате последовательного интегрирования по ξ и η получаются соотношения

$$u_{\eta} + u = C(\eta)e^{-\xi}, \quad u = f(\xi) + g(\eta)e^{-\xi},$$

где $f(\xi)$ и $g(\eta)$ — произвольные дифференцируемые функции. Таким образом, общее решение уравнения запишется в виде

$$u(x, y) = f(16 \ln x - y^2)x^{-4}e^{y^2} + g(4 \ln x - y^2)x^{-16}e^{y^2}.$$

Условия на границе области определяют систему уравнений для неизвестных функций $f(x)$ и $g(x)$

$$\begin{cases} f(t) + g(t) = e^{-t}, \\ f(t) + g(1)e^{-t} = e^{\frac{t}{12}}. \end{cases}$$

$$8.295. \quad u(x, y) = e^{1-xy-\sqrt{\frac{x}{y}}}.$$

У к а з а н и е. Посредством замены переменных $\xi = \frac{y}{x}$, $\eta = xy$ уравнение преобразуется к каноническому виду

$$\xi u_{\xi\xi} + \xi u_{\xi} + u_{\eta} + u = 0.$$

В результате интегрирования уравнения, записанного в форме

$$\frac{\partial}{\partial \eta}(\xi u_{\xi} + u) + \xi u_{\xi} + u = 0,$$

где $\xi u_{\xi} + u = \frac{\partial}{\partial \xi}(\xi u)$, получается общее решение

$$u(x, y) = f\left(\frac{y}{x}\right)e^{-xy} + \frac{xg(xy)}{y}.$$

$$8.296. \quad u(x, y) = \frac{e^{-y(x-y+1)}}{(x-y+1)^2}.$$

Р е ш е н и е. С помощью замены переменных $\xi = x - y$, $\eta = y$ уравнение преобразуется к каноническому виду

$$u_{\xi\eta} + \eta u_{\eta} - u = 0. \quad (8.107)$$

После дифференцирования по η для $v = u_{\eta\eta}$ получается линейное уравнение $v_\xi + \eta v = 0$, решение которого $v = f(\eta) e^{-\xi\eta}$; последующее интегрирование полученного выражения по η дает

$$u_\eta = \int_0^\eta f(s) e^{-s\xi} ds + g(\xi).$$

Чтобы найти u , нужно подставить производные u_η и $u_{\xi\eta}$ в уравнение (8.107); в переменных x, y

$$u(x, y) = \int_0^y f(s) (y - s) e^{-s(x-y)} ds + y g(x - y) + g'(x - y). \quad (8.108)$$

$$\begin{cases} g'(x) = \frac{1}{(x+1)^2} \\ \int_0^x f(s)(x-s) ds + x g(0) + g'(0) = e^{-x}. \end{cases}$$

Решение первого уравнения $g(x) = -1/(x+1) + C$. Второе уравнение

$$\int_0^x f(s)(x-s) ds + x(C-1) + 1 = e^{-x}$$

посредством интегрального преобразования Лапласа трансформируется в $F(p) = 1/(p+1) + C$. Так как $f(x)$ непрерывна при $x = 0$, то $C = 0$, т.е. $f(x) = e^{-x}$. Решение выражается формулой (8.108), в которую надо подставить найденные f и g .

$$\mathbf{8.297.} \quad u(x, y) = \frac{y + x^2 - x}{2x^2}.$$

$$\mathbf{8.298.} \quad u(x, y) = (1 - \sqrt{y^2 - x^2}) e^{-y + \sqrt{y^2 - x^2}}.$$

У к а з а н и е. Посредством замены переменных $\xi = y + \sqrt{y^2 - x^2}$, $\eta = y - \sqrt{y^2 - x^2}$ уравнение преобразуется к каноническому виду $u_{\xi\eta} + (u_\xi - u_\eta)/(\xi - \eta) = 0$. Общее решение этого уравнения (см. задачу 8.77)

$$u(x, y) = \sqrt{y^2 - x^2} [f'(y + \sqrt{y^2 - x^2}) - g'(y - \sqrt{y^2 - x^2})] - f(y + \sqrt{y^2 - x^2}) - g(y - \sqrt{y^2 - x^2}).$$

Функция $u(x, y)$ удовлетворяет условиям на характеристиках, если выполняются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} f(x) &= -g'(0)x - g(0) - 1 + x + Ax^2, \\ g(x) &= f'(1)(1-x) - f(1) - e^{-x} + B(1-x)^2, \\ A &= -B = f'(1) - g(0) - f(1) - 1 = \frac{1}{2}[f'(1) + g'(0) - 1]. \end{aligned}$$

$$\mathbf{8.299.} \quad u(x, y) = \frac{1}{2} \sqrt[4]{x} (y^2 + x - 1).$$

$$\mathbf{8.300.} \quad u(x, y) = y - x + (x - y + 1) e^{\frac{y+x}{y-x}}.$$

$$\mathbf{8.301.} \quad u(x, y) = \frac{y^2}{\operatorname{ch} x} - \operatorname{ch} x.$$

$$\mathbf{8.302.} \quad u(x, y) = (y^2 - x^2)^{\frac{5}{4}}.$$

$$\mathbf{8.303.} \quad u(x, y) = (y - \operatorname{ch} x) \operatorname{sh}^2 x.$$

8.304. $u(x, y) = y(y^2 - x^2)^{\frac{1}{6}}$.

У к а з а н и е. Привести уравнение к каноническому виду и затем обратиться к задаче 8.78.

8.305. $u(x, y) = (x - y)^2(x + 2y)$. Р е ш е н и е. Функция $v = (x - y)^2u$ удовлетворяет уравнению $v_{xy} - (2v_x - v_y)/(x - y) = 0$, общее решение которого (задача 8.77)

$$v(x, y) = \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{f(x) + g(y)}{x - y} \right].$$

Следовательно,

$$u(x, y) = f'(x) + g(y) + g'(y)(x - y). \quad (8.109)$$

Условия для $u(x, y)$ запишутся в виде

$$\begin{cases} f(x) + g(x) = 0, \\ f(x) + g(-x) + 2xg'(-x) = -4x^3, \end{cases}$$

откуда $f(x) = -g(x)$ и

$$2xg'(x) - g(x) + g(-x) = -4x^3. \quad (8.110)$$

Конструкция уравнения (8.110), в частности, его правой части подсказывает форму решения: $g(x) = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D + h(x)$. Подстановка $g(x)$ в уравнение (8.110) превращает его в тождество, если $A = -1$, $B = 0$, т. е.:

$$2xh'(x) - h(x) + h(-x) = 0. \quad (8.111)$$

Почленная сумма уравнений, полученных из (8.111) при $x = s$ и $x = -s$ равна $2s(h'(s) - h'(-s)) = 0$, откуда $h(-s) = -h(s) + C_1$. Теперь из (8.111) следует, что $h(x)$ удовлетворяет уравнению $xh'(x) - h(x) = -C_1/2$; общее решение этого уравнения $h(x)C_2x - C_1/2$. Таким образом, $g(x) = -x^3 + C_3x + D_1$ исчерпывает множество решений уравнения (8.110). Функции f и g определены; подстановка их в (8.109) дает решение задачи.

8.306. $u(x, y) = \sqrt{y} + \frac{1}{28}(27x^2 - 18xy + 19y^2)$.

8.307 Р е ш е н и е. Замена $x = s - t$, $y = s + t$ приводит к задаче

$$\begin{aligned} v_{st} &= -f(s - t, s + t), \quad -\infty < s < \infty, \quad 0 < t, \\ v(s, 0) &= \varphi(s), \quad \lim_{s \rightarrow \infty} v(s, t) = 0, \end{aligned}$$

которая решается последовательным интегрированием уравнения по t ,

$$v_s = v_s(s, 0) - \int_0^t f(s - \beta, s + \beta) d\beta,$$

затем по s ,

$$v = \varphi(s) + \int_s^\infty d\alpha \int_0^t f(\alpha - \beta, \alpha + \beta) d\beta.$$

В переменных x, y

$$v(x, y) = \varphi\left(\frac{x+y}{2}\right) + \int_{\frac{x+y}{2}}^\infty d\alpha \int_0^{\frac{y-x}{2}} d\beta f(\alpha - \beta, \alpha + \beta).$$

Выражение (8.34) получается в результате линейной замены переменных $\alpha - \beta = \xi$, $\alpha + \beta = \eta$; якобиан преобразования переменных $J(\alpha, \beta) = 1/2$.

Доказательство единственности решения. Если существуют два решения u_1 и u_2 , то их разность $u = u_1 - u_2$ удовлетворяет однородному уравнению и нулевым дополнительным условиям

$$\begin{aligned} u_{xx} - u_{yy} &= 0, \quad -\infty < x < \infty, \\ u(x, x) &= 0, \quad \lim_{x+y \rightarrow \infty} u(x, y) = 0. \end{aligned}$$

Решение $u(x, y) = f(y - x) + g(x + y)$ при условии $u(x, x) = f(0) + g(2x) = 0$ принимает вид $u(x, y) = f(y - x) - f(0)$. Пусть $y - x = C$; если $x + y \rightarrow \infty$, то $f(s) - f(0) = 0$, откуда $f(y - x) = f(0)$, т. е. $u(x, y) = 0$.

8.309. У к а з а н и е. Ввести переменные $2\xi = x + y$, $2\eta = y - x$ и перейти к эквивалентному интегральному уравнению, которое решать методом последовательных приближений.

8.310. Общее решение

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \int_0^{x-at} I_0 \left(\frac{c}{2a} \sqrt{(x+at)(x-at-s)} \right) f'_1(s) ds + \\ &+ \int_0^{x+at} I_0 \left(\frac{c}{2a} \sqrt{(x-at)(x+at-s)} \right) f'_2(s) ds + (f_1(0) + f_2(0)) I_0 \left(\frac{c}{2a} \sqrt{x^2 - a^2 t^2} \right), \end{aligned}$$

где $f_{1,2}(s)$ — произвольные непрерывно дифференцируемые функции. Решение задачи Гурса

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \int_0^{\frac{1}{2}(x-at)} I_0 \left(\frac{c}{2a} \sqrt{(x+at)(x-at-2s)} \right) F'_1(s) ds + \\ &+ \int_0^{\frac{1}{2}(x+at)} I_0 \left(\frac{c}{2a} \sqrt{(x-at)(x+at-2s)} \right) F'_2(s) ds + F_1(0) I_0 \left(\frac{c}{2a} \sqrt{x^2 - a^2 t^2} \right). \end{aligned}$$

У к а з а н и е. Привести уравнение к каноническому виду $4a^2 u_{\xi\eta} = c^2 u$, где $\xi = x - at$, $\eta = \xi + at$, и перейти к эквивалентному интегральному уравнению

$$u(\xi\eta) = \int_0^\xi d\alpha \int_0^\eta d\beta u(\alpha, \beta) + f_1(\xi) + f_2(\eta),$$

которое решать методом последовательных приближений.

8.311. Общее решение

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \int_0^{x-at} J_0 \left(\frac{c}{2a} \sqrt{(x+at)(x-at-s)} \right) f'_1(s) ds + \\ &+ \int_0^{x+at} J_0 \left(\frac{c}{2a} \sqrt{(x-at)(x+at-s)} \right) f'_2(s) ds + (f_1(0) + f_2(0)) J_0 \left(\frac{c}{2a} \sqrt{x^2 - a^2 t^2} \right), \end{aligned}$$

где $f_{1,2}(s)$ — произвольные непрерывно дифференцируемые функции. Решением задачи Гурса будет

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \int_0^{\frac{1}{2}(x-at)} J_0 \left(\frac{c}{2a} \sqrt{(x+at)(x-at-2s)} \right) F'_1(s) ds + \\ &+ \int_0^{\frac{1}{2}(x+at)} J_0 \left(\frac{c}{2a} \sqrt{(x-at)(x+at-2s)} \right) F'_2(s) ds + F_1(0) J_0 \left(\frac{c}{2a} \sqrt{x^2 - a^2 t^2} \right). \end{aligned}$$

См. указание к предыдущей задаче.

8.312. У к а з а н и е. Перейти к системе интегральных уравнений

$$\begin{cases} u = u_0 + \mathcal{K}_{12}u, \\ v = v_0 + \mathcal{K}_{21}v, \end{cases}$$

где

$$\mathcal{K}_{12} = \mathcal{K}_1 \cdot \mathcal{K}_2, \quad \mathcal{K}_{21} = \mathcal{K}_2 \cdot \mathcal{K}_1, \quad v_0 = \mathcal{K}_2 u_0, \quad u_0 = -\frac{1}{2}q \left(\frac{x+y}{2} \right),$$

$$(\mathcal{K}_1 v)(x, y) = - \int_x^{\frac{x+y}{2}} q(\xi) v(\xi, x+y-\xi) d\xi,$$

$$(\mathcal{K}_2 u)(x, y) = - \int_x^\infty r(\eta) u(\eta, \eta-x+y) d\eta.$$

Для решения интегральных уравнений применить метод последовательных приближений.

$$8.313. \quad u(x, y) = \frac{1}{\sqrt[4]{x}} \left(\frac{\pi}{4} + \operatorname{arctg} \sqrt[4]{\frac{y}{x}} \right); \quad \mathcal{R}(\xi, \eta; x, y) = \frac{\sqrt{\xi} + \sqrt{\eta}}{\sqrt{x} + \sqrt{y}}.$$

$$8.314. \quad u(x, y) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{y(x+y)} \operatorname{erf} \frac{x+y}{\sqrt{2}}; \quad \mathcal{R}(\xi, \eta; x, y) = e^{-\eta(\xi-x) - \frac{\eta^2 - y^2}{2}}.$$

$$8.315. \quad u(x, y) = \frac{1}{x^2} (e^{x(x-y)} + xy - 1); \quad \mathcal{R}(\xi, \eta; x, y) = e^{x(\eta-y)}.$$

$$8.316. \quad u(x, y) = \frac{1}{x^3} \left[(xy^2 - 2x^2 + 2)e^{x(x-y^2)} + xy^2 - 2 \right];$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta; x, y) = [1 - (\xi - x)(\eta^2 - y^2)] e^{x(\eta^2 - y^2)}.$$

$$8.317. \quad u(x, y) = (\sqrt{x} + e^{-\frac{x}{y}}) e^y;$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = \sqrt{\frac{\xi_0}{\eta_0}} e^{-(\xi - \eta_0)}, \quad \text{где } \xi = \frac{x}{y}, \quad \eta = y.$$

$$8.318. \quad u(x, y) = (x^2 + y) e^{x - \sqrt{x^2 + y}};$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = e^{-(\xi - \xi_0) - \xi(\eta - \eta_0)}, \quad \xi = x, \quad \eta = x^2 + y.$$

$$8.319. \quad u(x, y) = e^{x^2(y-1)} + x^2 y^2 e^{-x^2 y(y-1)};$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = e^{\xi_0 \eta_0 - \xi \eta}, \quad \xi = x, \quad \eta = y(x+1).$$

$$8.320. \quad u(x, y) = 1 - (x^2 - y^2)^2; \quad \mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = e^{(\xi + \eta)^2 - (\xi + \eta_0)^2},$$

$$\xi = x^2 + y^2, \quad \eta = x^2 - y^2.$$

$$8.321. \quad u(x, y) = (\sqrt{x} - \sqrt{y})^2;$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = \sqrt{\frac{\xi + \eta}{\xi + \eta_0}}, \quad \xi = \sqrt{x} + \sqrt{y}, \quad \eta = \sqrt{x} - \sqrt{y}.$$

$$8.322. \quad u(x, y) = 1 + x^3 y^3 + x(y^3 + y^{-3});$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = \frac{\xi \eta}{\xi_0 \eta_0}, \quad \xi = xy, \quad \eta = \frac{x}{y}.$$

$$8.323. \quad u(x, y) = (e^y - x) e^{-2x};$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = \frac{\xi - \eta_0}{\xi - \eta} e^{\xi - \xi_0}, \quad \xi = x + e^y, \quad \eta = x e^y.$$

$$8.324. \quad u(x, y) = 2 \ln \frac{x}{x + \sqrt{y}};$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = \frac{\xi + \eta}{\xi_0 + \eta}, \quad \text{где } \xi = x + \sqrt{y}, \quad \eta = x - \sqrt{y}.$$

$$8.325. u(x, y) = ye^{-(x^2+y)^2};$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = e^{\xi^2 - \xi_0^2}, \quad \xi = x^2 + y, \quad \eta = x^2 - y.$$

$$8.326. u(x, y) = 2e^{xy\sqrt{xy}-1};$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = e^{-\xi_0(\eta - \eta_0)}, \quad \xi = x\sqrt{y}, \quad \eta = \sqrt{x}y.$$

$$8.327. u(x, y) = \frac{1}{x^2 y^2} e^{xy\sqrt{y}};$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = e^{\frac{\xi^2 - \xi_0^2}{\eta}}, \quad \xi = xy, \quad \eta = x\sqrt{y}.$$

$$8.328. u(x, y) = \frac{2\sqrt{x}}{3y} \left[\left(2 - \frac{2}{y^2} - \frac{x\sqrt{x}}{y\sqrt{y}} \right) e^{\frac{\sqrt{y}}{x}(y\sqrt{y} - x\sqrt{x})} + 2\frac{x}{y^2} - \frac{x\sqrt{x}}{y\sqrt{y}} \right];$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = e^{\eta_0(\xi - \xi_0)} [1 - (\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0)], \quad \xi = \frac{x}{\sqrt{y}}, \quad \eta = \frac{y}{\sqrt{x}}.$$

$$8.329. u(x, y) = \ln tg \frac{x}{2} + y \sin x;$$

$$\mathcal{R}(\xi, \eta; \xi_0, \eta_0) = \sqrt{\frac{\xi^2 + \eta^2}{\xi_0^2 + \eta_0^2}}, \quad \xi = y \cos x, \quad \eta = y \sin x.$$

$$8.330. u(x, t) = \frac{u_0(x-at) + u_0(x+at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} u_1(\xi) J_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{(\xi-x)^2 - a^2 t^2} \right) d\xi - \\ - \frac{ct}{2a} \int_{x-at}^{x+at} \frac{u_0(\xi)}{\sqrt{(\xi-x)^2 - a^2 t^2}} J_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{(\xi-x)^2 - a^2 t^2} \right) d\xi.$$

У к а з а н и е. Функцию Римана отыскивать в виде $\mathcal{R} = f(\sqrt{(\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0)})$, где $\xi = x - at$, $\eta = x + at$.

$$8.331. u(x, t) = \frac{u_0(x-at) + u_0(x+at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} u_1(\xi) I_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{(\xi-x)^2 - a^2 t^2} \right) d\xi + \\ + \frac{ct}{2a} \int_{x-at}^{x+at} \frac{u_0(\xi)}{\sqrt{(\xi-x)^2 - a^2 t^2}} I_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{(\xi-x)^2 - a^2 t^2} \right) d\xi.$$

См. указание к предыдущей задаче.

$$8.332. \text{У к а з а н и е. См решение задачи 8.122.}$$

$$8.333. u(x, y) = u_0(x - ay).$$

$$8.334. u(x, y) = e^y(x - 1) + 1.$$

$$8.335. u(x, y) = e^{\frac{2}{3}y^2 - x^2}.$$

$$8.336. u(x, y) = xe^{\frac{\pi}{4} - \arctg y}.$$

$$8.337. u(x, y) = \left(x^2 + y^2 + y + \frac{1}{2} \right)^2 e^{-4y} - \frac{1}{4}.$$

$$8.338. u(x, y) = [x^3 - 3(e^y - 1)]^{\frac{1}{3}}.$$

$$8.339. u(x, y) = \sqrt{\frac{y}{\pi}} - \operatorname{erf} x.$$

$$8.340. u(x, y) = \operatorname{sh} x - \frac{y^2}{2} + \sqrt{\frac{y^4}{4} - y^2 \operatorname{sh} x + ch^2 x}.$$

$$8.341. u(x, y) = \frac{\operatorname{sh} x}{\sqrt{y^2 + 1}}.$$

$$8.342. u(x, y) = \operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{y}}.$$

$$8.343. u(x, y) = ye^{-\frac{x}{y}}.$$

$$8.344. u(x, y) = \frac{x^2}{y^2} - 2 \ln y.$$

$$8.345. u(x, y) = x(y^2 + 3)^{\frac{3}{2}}.$$

$$8.346. u(x, y) = e^{-y^2} \sin(x - y).$$

$$8.347. u(x, y) = e^{-xy} \cos(x - t).$$

$$8.348. u(x, y) = e^{\frac{y^3}{3} - \frac{x^2 y^2}{2} - x^2 + 2y}.$$

$$8.349. u(x, y) = \left(x + \frac{y}{2}\right)^2 e^{-y} + \frac{y-1}{2}.$$

$$8.350. u(x, y) = (x - 2y)^2 e^y - 2y - x - xy - 4.$$

$$8.351. u(x, y) = y \operatorname{sh} x + \operatorname{ch} x.$$

$$8.352. u(x, y) = \frac{e^{\frac{7y}{3}}}{x^2 + e^{2y}}.$$

$$8.353. u(x, y) = x\sqrt{y} e^{x - \sqrt{y}}.$$

$$8.354. u(x, y) = \left(x - \frac{y^2}{2}\right)^3 e^{xy - \frac{y^3}{3}}.$$

$$8.355. u(x, y) = (x^2 + y^2) \left(\operatorname{arctg} \frac{y}{x} - \frac{\pi}{4} \right) - xy.$$

$$8.356. u(x, y) = \cos \sqrt{x^2 + y^2} + \operatorname{arctg} y.$$

$$8.357. u(x, y) = x^2 y^2 + xy + x \ln y + x + 1.$$

$$8.358. u(x, y) = \frac{(4x^2 - y^2)^2}{16}.$$

$$8.359. u(x, y) = \frac{2y}{y + x^2}.$$

$$8.360. u(x, y) = y - \operatorname{erf} \frac{x}{y}.$$

$$8.361. u(x, y) = 1 + \sqrt[3]{x + y^2} - e^y.$$

$$8.362. u(x, y) = 1 - \frac{x^2}{2} + y.$$

$$8.363. u(x, y) = (x + y^2) e^{xy}.$$

$$8.364. u(x, y) = e^{x^2 y^2}.$$

$$8.365. u(x, y) = 2\sqrt{\sqrt{y}(x + \sqrt{y})}.$$

$$8.366. u(x, y) = \ln(1 + x + \sqrt{y}).$$

$$8.367. u(x, y) = \frac{x^2 + 1}{y^2 + 1}.$$

$$8.368. u(x, y) = \frac{2e^y}{1 + e^{2x}}.$$

$$8.369. u(x, y) = \frac{2x}{1 + e^y}.$$

$$8.370. u(x, y) = \frac{x}{\sqrt{1 + \ln y}}.$$

$$8.371. u(x, y) = 3x - 2y.$$

$$8.372. u(x, y) = \sqrt{x^2 + \sqrt{y^2 + 1}}.$$

$$8.373. u(x, y) = 1 + \sqrt{x^2 + y^2}.$$

$$8.374. u(x, y) = \frac{(1 + x^2)e^{2\sqrt{y}}}{2(1 + e^{2\sqrt{y}})}.$$

$$8.375. u(x, y) = \frac{2 + x^2}{2(1 + e^{x-y})}.$$

$$8.376. u(x, y) = \frac{x^2 y + 1}{x^2 + 1}.$$

$$8.377. u(x, y) = \frac{y(y - \sqrt{y^2 - 4x^2})}{2}.$$

$$8.378. u(x, y) = x\sqrt{y^2 + 16}.$$

$$8.379. u(x, y) = \sqrt{\frac{y}{x^2 + 1}}.$$

$$8.380. u(x, y) = \frac{6x^2 - 3y^2 + 4y^3}{6(2y + 1)}.$$

$$8.381. u(x, y) = \frac{1 - x^2 + 4y}{4(1 + y)}.$$

$$8.382. u(x, y) = \frac{y}{\sqrt{x^2 + 1}}.$$

$$8.383. u(x, t) = \frac{f\left(t - \frac{3\sqrt{k}(C_1 x + C_2)^{\frac{1}{3}}}{C_1}\right) + g\left(t + \frac{3\sqrt{k}(C_1 x + C_2)^{\frac{1}{3}}}{C_1}\right)}{(C_1 + C_2)^{\frac{1}{3}}}, \text{ где } f \text{ и } g$$

суть произвольные дифференцируемые функции.

У к а з а н и е. В результате факторизации

$$\left[\sqrt{x} \frac{\partial}{\partial x} \mp \frac{\partial}{\partial x} \left((C_1 x + C_2)^{\frac{2}{3}} - \frac{1}{3} C_1 (C_1 x + C_2)^{-\frac{1}{3}} \right) \right] \times \\ \times \left[\sqrt{x} \frac{\partial}{\partial x} \pm \frac{\partial}{\partial x} (C_1 x + C_2)^{\frac{2}{3}} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{3} C_1 (C_1 x + C_2)^{-\frac{1}{3}} \right] \sigma = 0$$

нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка распадается на два квазилинейных уравнения первого порядка; общее решение каждого из них можно найти методом характеристик, а линейная комбинация общих решений представляет собой общее решение исходного уравнения.

$$8.384. 1) t_k = \frac{1}{2}; 2) t_k = 1.$$

$$8.385. 1) t_k = \frac{3\sqrt{3}}{8}; 2) t_k = \frac{2\sqrt{3}}{9}.$$

$$8.386. u(x, t) = \begin{cases} u_1, & x \leq u_1 t, \\ \frac{u_1 l + (u_2 - u_1)x}{l + (u_2 - u_1)t}, & u_1 t \leq x \leq l + u_2 t, \\ u_2, & l + u_2 t \leq x; \end{cases}$$

$$t_k = \frac{l}{u_1 - u_2}.$$

8.387. Если $u_1 > u_2$, то $t_k = 0$. Если $u_1 < u_2$, то

$$u(x, t) = \begin{cases} u_1, & x \leq u_1 t, \\ \frac{x}{t}, & u_1 t \leq x \leq l + u_2 t, \\ u_2, & u_2 t \leq x; \end{cases}$$

$$t_k = \infty.$$

У к а з а н и е. При $u_1 < u_2$ решение можно получить предельным переходом при $l \rightarrow 0$ в решении предыдущей задачи.

На рис. 8.19 дана (x, t) -диаграмма характеристик.

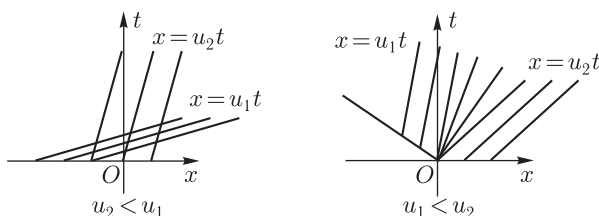


Рис. 8.19

8.388. Если $f'(u) > 0$, то

$$u(x, t) = \begin{cases} u_1, & x \leq f(u_1)t, \\ f^{-1}\left(\frac{x}{t}\right), & f(u_1)t \leq x \leq f(u_2)t, \\ u_2, & x \leq f(u_2)t, \end{cases}$$

где $f^{-1}(x)$ — обратная функция для $f(x)$. Если $f'(u) < 0$, то непрерывного решения нет.

$$\mathbf{8.389.} \quad u(x, t) = \begin{cases} 0, & l \leq x, \\ \frac{u_0(l-x)}{l - \alpha u_0 t}, & \alpha u_0 t \leq x < l, \\ u_0, & x < \alpha u_0 t. \end{cases}$$

8.390. $u'_0(x) < -\beta$.

$$\mathbf{8.391.} \quad u(x, t) = \begin{cases} 0, & l \leq x, \\ \frac{\beta u_0(l-x)e^{-\beta t}}{\beta l - u_0(1-e^{-\beta t})}, & l(1-\beta e^{-\beta t}) \leq x < l, \\ u_0 e^{-\beta t}, & x < l(1-e^{-\beta t}); \end{cases}$$

$$t_k = \frac{1}{\beta} \ln \frac{u_0}{u_0 - \beta k}.$$

График функции $u(x, t) = u(x, t_k)$ изображен на рис. 8.20.

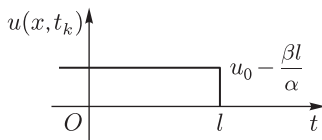


Рис. 8.20

$$8.392. \quad u(x, t) = \begin{cases} u_2, & u_2 t < x, \\ \frac{x}{t}, & u_1 t < x \leq u_2 t, \\ u_1, & \forall t < x \leq u_1 t. \end{cases}$$

$$8.393. \quad \begin{cases} u(x, t) = \mu(\tau), \\ t = f'(\mu(\tau))x + \tau, \\ x_k = \min \left(-\frac{1}{\mu'(\tau)} \right) = -\frac{1}{\mu'(\tau^*)}, \\ t_k = f'(\mu(\tau^*))x_k + \tau^*. \end{cases}$$

$$8.394. \quad u(x, t) = \begin{cases} 1, & (k+1)x < t, \\ \frac{1}{k} \left(\frac{t}{x} - 1 \right), & x < t \leq (k+1)x, \\ 0, & t \leq x. \end{cases}$$

$$8.395. \quad u(x, t) = \begin{cases} u_2, & (ku_2 + m)t \leq x, \\ \frac{1}{k} \left(\frac{x}{t} - \right), & (ku_1 + m)t \leq x < (ku_2 + m)t, \\ u_1, & \forall t \leq x < (ku_1 + m)t; \end{cases}$$

решение непрерывно при любом t , если $\frac{V-m}{k} \leq u_1 < u_2$.

$$8.396. \quad u(x, t) = \begin{cases} u_1, & f(u_1)x \leq y, \\ f^{-1} \left(\frac{y}{x} \right), & f(u_2)x \leq y < f(u_1)x, \\ u_2, & -kx \leq y < f(u_1)x. \end{cases}$$

8.397. $\sigma(x, t) = \varphi(w(x, t))$, где $w(x, t)$ задана параметрически:

$$w(x, t) = e^{-k(t-\tau)} \nu(t),$$

$$x = \int_{\tau}^t \varphi'(\nu(\tau)) e^{-k(y-\tau)} dy;$$

$$t_k = \min \left\{ -\frac{1}{k} \ln \left[\frac{e^{-k\tau}}{\nu(\tau)} \psi \left(\frac{\nu'(\tau) \varphi'(\nu(\tau))}{k\nu(\tau) + \nu'(\tau)} \right) \right] \right\},$$

где $\xi = \psi(\eta)$ — обратная функция для $\eta = \varphi'(\xi)$. Обозначения те же, что и в задаче 1.38, т. 1.

У к а з а н и е. Задачу решать в полуплоскости, продолжив функцию $\mu(\tau)$ нулем на отрицательные значения t ; при таком продолжении начальное условие будет выполнено. Семейство характеристик определяется системой уравнений $\frac{dx}{dt} = \varphi'(w)$, $\frac{dw}{dt} = -kw$, $x(\tau) = 0$. Для определения момента времени t_k в интеграле для x сделать замену переменной по формуле $z = \nu(t) \exp(-k(y-\tau))$.

8.398. Функция $g(\xi, \tau)$ определяется параметрически:

$$g(\xi, \tau) = \mu(\tau)_0, \quad \xi_k = \min \left(-\frac{1}{2B\mu'(\tau)} \right),$$

$$\tau = 2B\mu(\tau_0)\xi + \tau_0; \quad \tau_k = \tau^* - \frac{\mu(\tau^*)}{\mu'(\tau^*)},$$

$$x_k = -\frac{1}{C} \ln \left(1 + \frac{C}{2B\mu'(\tau^*)} \right), \quad t_k = \tau^* - \frac{\mu(\tau^*)}{\mu'(\tau^*)} + \frac{A}{C} \ln \left(1 + \frac{C}{2B\mu'(\tau^*)} \right),$$

где τ^* — точка минимума функции $-1/(2B\mu'(\tau))$.

У к а з а н и е. Задачу для определения функции $g(\xi, \tau)$ решать в полосе $(0; 1/C)$, продолжив функцию $\mu(\tau)$ нулем для $\tau < \frac{A}{C} \ln(1 - \xi C)$; при таком продолжении выполняется условие при $t = 0$. Для определения характеристик получается задача Коши: $\frac{d\tau}{d\xi} = \mu(\tau_0)$, $\tau(0) = \tau_0$. Обозначения те же, что и в задаче 1.39, т. 1.

8.399. $u(x, t) = \int_0^x u(\xi, t) d\xi + \mu(t)$, деформация определяется параметрически:

$\varepsilon(x, t) = \nu(\tau)$, $t = x \sqrt{\frac{\rho}{b'(\nu(\tau))}}$, функция $\nu(t)$ задана неявно посредством уравнения $\mu'(t) + g'(\nu(\tau)) = \frac{1}{\rho} \int_0^t F(\tau) d\tau$.

У к а з а н и е. Уравнение для функции $u(x, t)$ не является квазилинейным, поэтому следует отыскивать деформацию $\varepsilon(x, t)$, для которой получается задача с квазилинейным уравнением:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \sqrt{\frac{b'(t)}{\rho}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0, \quad \varepsilon(x, 0) = 0, \quad \varepsilon(0, t) = \nu(t).$$

$$\mathbf{8.400.} \quad 1) \begin{cases} u_t + au_x + v_t + av_x = 0, \\ u_t - au_x - (v_t - av_x) = 0. \end{cases} \quad 2) \begin{cases} r_{1t} + ar_{1x} = 0, & r_1 = u + v, \\ r_{2t} - ar_{2x} = 0, & r_2 = u - v. \end{cases}$$

$$\mathbf{8.402.} \quad v = \frac{r+s}{2}, \quad c = \frac{\gamma-1}{4}(r-s), \quad \rho = \left[\frac{(\gamma-1)(r-s)}{4k} \right]^{\frac{2}{\gamma-1}},$$

$$P = \frac{k^2}{\gamma} \left[\frac{(\gamma-1)(r-s)}{4k} \right]^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}}.$$

8.403. Р е ш е н и е. 2) Пусть $s = s_0$, тогда $v = (r + s_0)/2$ и $v_x = r_x/2$. При движении элемента газа по соответствующей траектории изменение плотности в зависимости от времени будет

$$\frac{d\rho}{dt} = \rho_t + v\rho_x = \rho_t + (\rho v)_x - \rho v_x = -\rho s_x/2.$$

3) Если $r = r_0$, то первое уравнение системы (8.86) удовлетворяется тождественно, а из второго следует, что характеристики — прямые линии. Пусть φ — угол наклона характеристики к оси Ox , тогда

$$\frac{\partial}{\partial x} \operatorname{tg} \varphi = \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\beta r_0 + \alpha s} = -\frac{\alpha s_x}{(\beta r_0 + \alpha s)^2}.$$

Следовательно, характеристики образуют расходящийся пучок при $s_x > 0$ и сходящийся пучок при $s_x < 0$. В последнем случае градиент функции $s(x, t)$ (значит, и всех гидродинамических величин) в некоторый момент $t_k > 0$ становится неограниченным (пример 8.13).

8.404. Характеристическая форма системы

$$h_1^k \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda_k \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + h_2^k \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \lambda_k \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = 0,$$

или

$$h_1^k \left(\frac{dv_x}{dx} \right)_k + h_2^k \left(\frac{dv_y}{dx} \right)_k = 0, \quad (8.112)$$

$$h_1^k = \lambda_k(v_x^2 - c^2), \quad h_2^k = v_y^2 - c^2, \quad k = 1, 2, \quad \lambda_{1,2} = \frac{v_x v_y \pm c\sqrt{v^2 - c^2}}{v_x^2 - c^2}.$$

Решение. 3) Пусть θ и $\psi = \theta + \varphi$ — углы, образуемые линией тока и характеристикой с положительным направлением оси Ox (рис. 8.21). Тогда

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg}(\psi - \theta) = \frac{\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \theta}{1 + \operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \theta} = \frac{\lambda_{1,2} - v_y/v_x}{1 + \lambda_{1,2} v_y/v_x} \pm \frac{c}{\sqrt{v^2 - c^2}}.$$

Следовательно, $\sin \varphi = \pm c/v$.

4) Из соотношений (8.89), (8.88) вытекает, что дифференциалы dv_x , dv_y , $d\varphi$, $d\theta$ удовлетворяют уравнениям

$$dv_x = \cos \theta dv - v \sin \theta d\theta,$$

$$dv_y = \sin \theta dv + v \cos \theta d\theta,$$

$$dc = \sin \varphi dv + v \cos \varphi d\varphi, \quad dc = -\frac{(\gamma - 1)v}{2c} dv.$$

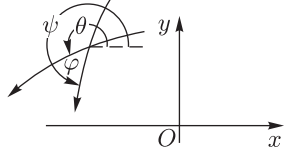


Рис. 8.21

Два последние соотношения устанавливают зависимость между dv и $d\varphi$

$$dv = -v \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{\sin^2 \varphi + \frac{\gamma - 1}{2}} d\varphi. \quad (8.113)$$

Если ввести dv_x и dv_y в систему (8.112), то она примет форму

$$(h_2^k \sin \theta + h_1^k \cos \theta) \left(\frac{dv}{dx} \right)_k + (h_2^k \cos \theta - h_1^k \sin \theta) v \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_k = 0, \quad k = 1, 2.$$

Следующий шаг — подстановка в полученные уравнения величин

$$h_1^{1,2} = \operatorname{tg}(\theta \pm \varphi) \cos(\theta + \varphi) \cos(\theta - \varphi), \quad h_2^{1,2} = \sin(\theta + \varphi) \sin(\theta - \varphi),$$

что дает

$$\left(\frac{dv}{dx} \right)_k \mp v \operatorname{tg} \varphi \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_k = 0, \quad k = 1, 2.$$

После исключения величины dv из найденных соотношений с помощью (8.113) получается система уравнений

$$\frac{\cos^2 \varphi}{\sin^2 \varphi + \frac{\gamma - 1}{2}} \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)_k \pm \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_k = 0,$$

или

$$\left(\frac{dF}{dx} \right)_k \pm \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_k = 0, \quad k = 1, 2,$$

где

$$F(\varphi) = \int \frac{\cos^2 \varphi}{\sin^2 \varphi + \frac{\gamma - 1}{2}} d\varphi.$$

$$8.405. \quad \frac{\partial r_1}{\partial t} + \frac{3r_1 + r_2}{4} \frac{\partial r_1}{x} = 0, \quad \frac{\partial r_2}{\partial t} + \frac{r_1 + 3r_2}{4} \frac{\partial r_2}{x} = 0, \quad r_{1,2} = u \pm 2\sqrt{gh}.$$

$$8.406. \quad \frac{\partial r_1}{\partial t} + \frac{r_1 + r_2 + 2}{2} \frac{\partial r_1}{x} = 0, \quad \frac{\partial r_2}{\partial t} + \frac{r_2 + r_2 - 2}{2} \frac{\partial r_2}{x} = 0.$$

8.407. Указание к п. 3. Если $H = H(E)$, то линейная относительно производных $\frac{\partial E}{\partial t}$, $\frac{\partial E}{\partial x}$ система

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{c}{\varepsilon} \frac{dH}{dE} \frac{\partial E}{\partial x} &= 0, \\ \frac{dH}{dE} \frac{\partial E}{\partial t} + c \frac{\partial E}{\partial x} &= 0 \end{aligned}$$

совместна при условии (необходимом и достаточном) равенства нулю ее определителя $\left(\frac{dH}{dE}\right)^2 - \varepsilon(E) = 0$. Для E получается квазилинейное уравнение

$$\frac{\partial E}{\partial t} \pm \frac{1}{\sqrt{\varepsilon(E)}} \frac{\partial E}{\partial x} = 0.$$

8.409. $u = 2x - 6t, \quad v = x - t + 1.$

8.410. $u = -2xt + 13t^2, \quad v = x^2 - 4xt - 4t^2.$

8.411. $u = 2x^2 - 16xt + 32t^2 + x - 19t, \quad v = -13x^2 + 104xt + 208t^2 + x - 10t.$

8.412. $u = 1 - 28xt - 7t^2, \quad v = -48x^2 + 4xt - 143t^2.$

8.413. $u = x - 6t, \quad v(x, t) = -\frac{2}{3}(47t + 4x + 20).$

8.414. $u = e^{-t^2} \operatorname{sh} x, \quad v = e^{-t^2} \operatorname{ch} x.$

8.415. $u = 4x^2t^2 + 11x^2 + t^2, \quad v = 2x^2t^2 - 11x^4 - 11t^4 - 60t^2.$

8.416. $u = \frac{1}{42} [3(8 + 3t)x + 8(2 - t)], \quad v = \frac{1}{21} [3(20 - 3t)x + 20(2 - t)].$

8.417. $u = 3x^2 + 4x(3t + 2), \quad v = 3x^2 + 4x(3t - 2) + 24t^2.$

8.418. $u = x^2 + t^2 + x^2t^2 - 1, \quad v = x^2 + t^2 - x^2t^2 + 1.$

8.419. $u = \frac{x}{t} \left(3 + \frac{x}{t}\right) + (x - t^2 + 1)(1 - x + t^2),$
 $v = 2\frac{x}{t} \left(3 + \frac{x}{t}\right) - 3(x - t^2 + 1)(1 - x + t^2).$

8.420. $u = 1 + xt + \frac{t^2}{2}, \quad v = x + \frac{xt}{2} - \frac{t^2}{4}.$

8.421. $u = 1 + \frac{1}{2} \ln(1 + t^2 + 2t \operatorname{ch} x), \quad v = \frac{1}{2} \ln \frac{t + e^x}{t + e^{-x}}.$

8.422. $u = x(3 + e^{-t}) - 3 \ln(1 + t), \quad v = x(1 - 2e^{-t}) - \ln(1 + t).$

8.423. $u = \operatorname{ch}(x + t) \operatorname{ch}(x - t) + \operatorname{sh}(x - t) - \operatorname{sh} x - \operatorname{ch} t, \quad$
 $v = \operatorname{sh} x + \operatorname{ch} t - \operatorname{sh}(x + t)$

8.424. $u = \operatorname{sh}^2(x^3 - t^3), \quad v = \operatorname{ch}^2(x^3 - t^3).$

8.425. $u = \operatorname{ch}^2 x + (\operatorname{sh} t + 2) \operatorname{sh} t, \quad v = \operatorname{ch} x \operatorname{ch} t - \operatorname{sh} x.$

8.426. $u = (x + 1) \operatorname{ch} t - t \operatorname{sh} t, \quad v = (x + 1) \operatorname{sh} t \operatorname{ch} t.$

8.427. $u = \frac{6}{7}x^2(1 - e^{-7t}) + 2xe^{-2t}, \quad v = e^{-2t} - \frac{1}{7}x(4 + 3e^{-7t}).$

У к а з а н и е. Для инвариантов Римана $r_1 = u - 2xv$, $r_2 = u + 3xv$ получают-ся задачи

$$\begin{aligned} \frac{\partial r_1}{\partial t} &= 0, & \frac{\partial r_2}{\partial t} + 5x \frac{\partial r_2}{\partial x} &= 3r_2 - 6x^2, \\ -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, & & -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ r_1(x, 0) &= 2x^2, & r_2(x, 0) &= 5x - 3x^2. \end{aligned}$$

8.428. $u = x^2 - t^2, \quad v = 2(x - x^2 - 3t).$

У к а з а н и е. Для инвариантов Римана $r_1 = 3u - tv$, $r_2 = 2u + v$ получаются задачи

$$\begin{aligned} (2t + 3) \frac{\partial r_1}{\partial t} - 2r_1 &= -3r_2, & \frac{\partial r_2}{\partial t} + (2t + 3) \frac{\partial r_2}{\partial x} &= 0, \\ -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, & & -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ r_1(x, 0) &= 3x^2, & r_2(x, 0) &= 2x. \end{aligned}$$

$$8.429. \quad u = 3x - 32t, \quad v = 5x - 46t.$$

$$8.430. \quad u = 3x^2t^2 + 3xt - 2x^2 - 2t^2 + 3, \quad v = 2x^2t^2 + 2xt - 3x^2 - 1.$$

$$8.431. \quad u = \frac{x}{2} + \frac{t}{2} + \frac{t^2}{4} - \frac{7}{4} + (x - 2t + 2)e^{t-1},$$

$$v = \frac{x}{2} + \frac{t}{2} + \frac{t^2}{4} + \frac{1}{4} - (x - 2t + 2)e^{t-1}.$$

$$8.432. \quad u = \frac{x^4 - 5(x^2 + 1)t^2}{x^2 + t^2}, \quad v = \frac{(x^2 + 5(t^1 + 1))x^2}{x^2 + t^2}.$$

$$8.433. \quad u = 1, \quad v = (x - t)^3.$$

$$8.434. \quad u = \frac{2x + t + 3}{3(t + 1)}, \quad v = \frac{(t - x)^2}{9(t + 1)^2}.$$

$$8.435. \quad u = \frac{1 - x + t}{4(t + 1)(2t + 1)}, \quad v = \frac{(3 + 4t)x - t - 1}{2(t + 1)(2t + 1)}.$$

$$8.436. \quad u = \cos^2\left(x - \frac{t}{4}\right), \quad v = \sin^2\left(x - \frac{t}{4}\right).$$

$$8.437. \quad u = e^{\frac{2(x-3t)}{1+2t}}, \quad v = \frac{2(x-t+1)}{1+2t}.$$

$$8.438. \quad u = \frac{4}{3}x - 2t - v, \quad v = \sqrt[3]{\frac{3A + \sqrt{9A^2 + 4}}{2}} + \sqrt[3]{\frac{3A - \sqrt{9A^2 + 4}}{2}}, \quad A = \frac{4}{3} - 2t.$$

$$8.439. \quad u = \frac{2}{3} \frac{x-3}{2t+1}, \quad v(x, t) = \frac{2}{3} \frac{x+3}{2t+1}.$$

$$8.440. \quad u = \frac{x+1}{t^2+1}, \quad v(x, t) = \frac{x-t^2}{t^2+1}.$$

У к а з а н и е. Задача на собственные значения для матрицы A

$$(h_1, h_2) \begin{pmatrix} t(u+v) - \lambda & t(u-v) \\ t(u-v) & t(u+v) - \lambda \end{pmatrix} = 0$$

имеет два собственных значения $\lambda_1 = 2tu$ и $\lambda_2 = 2tv$ и соответствующие им собственные векторы $h^1 = (1, 1)$ и $h^2(1, -1)$. Инварианты Римана $r_1 = u + v$ и $r_2 = u - v$ являются решением задачи Коши для гиперболической системы уравнений

$$r_{1t} + t(r_1 + r_2)r_{1x} = 0,$$

$$r_{2t} + (r_1 - r_2)r_{2x} = 0,$$

$$r_1(x, 0) = 2x + 1, \quad r_2(x, 0) = 1.$$

$$8.441. \quad u = \frac{4(xt^2 + 2x + t)}{t^4 + 4}, \quad v = \frac{2(4x + t^2 + 2)}{t^4 + 4}.$$

$$8.442. \quad u = \frac{3x + xt + t + 2}{(t + 1)^2}, \quad v = \frac{x - xt - t}{(t + 1)^2}.$$

$$8.443. \quad u = \frac{4xt + 6x + 8t + 2 + (2x - 1)\sin t}{(2t + 1)(2 + \sin t)}, \quad v = \frac{4xt - 2x + 8t + 2 - (2x - 1)\sin t}{(2t + 1)(2 + \sin t)}.$$

$$8.444. \quad u = \frac{3xt + 2x + t + 2}{(1 + t)(1 + 3t)}, \quad v = \frac{x + 4t + 3}{(1 + t)(1 + 3t)}.$$

У к а з а н и е. Разрешить систему относительно u_t и v_t :

$$u_t + (2u + v)u_x + (u + 2v)v_x = 0,$$

$$v_t + (u + 2v)u_x + (2u + v)v_x = 0.$$

Собственные значения и (левые) собственные векторы матрицы системы соответственно равны

$$\lambda_1 = 4(u+v), \quad h^1 = (1, 1), \quad \lambda_2 = u-v, \quad h^2 = (1, -1).$$

Инварианты Римана $r_1 = u+v$, $r_2 = u-v$ являются решением задачи Коши

$$\begin{aligned} r_{1t} + 3r_1 r_{1x} &= 0, \quad r_{2t} + r_2 r_{2x} = 0, \\ r_1(x, 0) &= 3x + 5, \quad r_2(x, 0) = x - 1. \end{aligned}$$

$$8.445. \quad u(x, t) = \frac{x}{1+2t}, \quad v(x, t) = \frac{x-6t-3}{1+2t}.$$

У к а з а н и е. Разрешить систему относительно u_t и v_t и ввести инварианты Римана $r_1 = u+v$, $r_2 = u-v$, задача Коши для которых имеет вид

$$\begin{aligned} r_{1t} + (r_1 + r_2)r_{1x} &= 0, \\ r_{2t} + (r_1 - r_2)r_{2x} &= 0, \\ r_1(x, 0) &= 2x - 3, \quad r_2(x, 0) = 3. \end{aligned}$$

$$8.446. \quad u(x, t) = \frac{x(2+\ln t)}{t(1+\ln t)}, \quad v(x, t) = \frac{x \ln t}{t(1+\ln t)}.$$

$$8.447. \quad u = \frac{2(x+t+6)}{2+t}, \quad v = \frac{2(x+2t)}{2+t}.$$

$$8.448. \quad u = \frac{x(\ln t + t + 1)}{t(\ln t + 1)}, \quad v = \frac{x(t - \ln t - 1)}{t(\ln t + 1)}.$$

$$8.449. \quad u = \frac{2x + 4xt + 4t - xt^2 - 2t^2}{(1+t)(2+t^2)}, \quad v = \frac{2(1+x)}{2+t^2}.$$

$$8.450. \quad u(x, t) = \frac{2(2x-3t)}{1+t^2}, \quad v(x, t) = \frac{5x-9t}{1+t^2}.$$

$$8.451. \quad u(x, t) = (3x+t+2)e^{-t}, \quad v(x, t) = (3x-t+1)e^{-t}.$$

$$8.452. \quad u(x, t) = \frac{4x-2\cos t+5}{8(1+t)}, \quad v(x, t) = \frac{4x+2\cos t-1}{8(1+t)}.$$

$$8.453. \quad u(x, t) = \frac{3x-t}{2(2\operatorname{ch} t-1)}, \quad v(x, t) = \frac{x-3t}{2(2\operatorname{ch} t-1)}.$$

$$8.454. \quad v(x, t) = \begin{cases} 0, & c_0 t \leq x, \\ \frac{2}{\gamma+1} \left(\frac{x}{t} - c_0 \right), & -\frac{2c_0 t}{\gamma-1} \leq x \leq c_0 t. \end{cases}$$

$$8.455. \quad v(x, t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq c_0 t \leq x, \\ -\frac{1}{\gamma} \left(\frac{\gamma+1}{2} at + c_0 - f(x, t) \right), & -\frac{at^2}{2} \leq x \leq c_0 t, \quad 0 \leq t \leq t_k, \\ \frac{2c_0^2}{a(\gamma-1)^2} - \frac{2c_0 t}{\gamma-1}, & \frac{2c_0^2}{a(\gamma-1)^2} - \frac{2c_0 t}{\gamma-1} \leq x \leq c_0 t, \quad t_k \leq t, \end{cases}$$

$$\text{где } f(x, t) = \sqrt{\left(\frac{\gamma+1}{2} at + c_0 \right)^2 - 2\gamma a(c_0 t - x)}; \quad t_k = \frac{2c_0}{a(\gamma-1)}, \quad v_k = -\frac{2c_0}{\gamma-1}.$$

График скорости дан на рис 8.22.

У к а з а н и е. Для определения скорости исключить t_0 из уравнений (8.94). Для вычисления t_k воспользоваться постоянством $s(x, t)$, т. е. $v - \frac{2c}{\gamma-1} = -\frac{2c_0}{\gamma-1}$,

откуда $-v \leq \frac{2c_0}{\gamma-1}$, следовательно, максимальная скорость газа $2c_0/(\gamma-1)$.

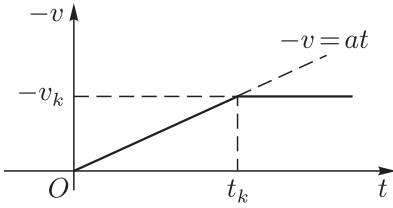


Рис. 8.22

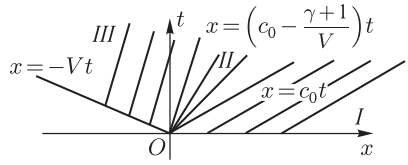


Рис. 8.23

8.456. Если $V < v_k$ где v_k — максимальная скорость газа, то

$$v(x, t) = \begin{cases} 0, & c_0 t \leq x, \\ \frac{2}{\gamma+1} \left(\frac{x}{t} - c_0 \right), & \left(c_0 - \frac{\gamma+1}{2} \right) t \leq x \leq c_0 t, \\ -V, & -Vt \leq \left(c_0 - \frac{\gamma+1}{2} \right) t. \end{cases} \quad (8.114)$$

Если $V \geq v_k$, то

$$v(x, t) = \begin{cases} 0, & c_0 t \leq x, \\ \frac{2}{\gamma+1} \left(\frac{x}{t} - c_0 \right), & -\frac{2c_0 t}{\gamma-1} \leq x \leq c_0 t. \end{cases}$$

У к а з а н и е. Если $V < v_k$, то в областях I или III (рис. 8.23) решение дается формулами (8.94). В области II уравнение характеристики $x = (\alpha r + \beta s_0)t$, где r принимает значения от $-2V - s_0$ до $-s_0$, следовательно,

$$r = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{x}{t} - \beta s_0 \right), \quad -2V - s_0 \leq \frac{1}{\alpha} \left(\frac{x}{t} - \beta s_0 \right) \leq -s_0$$

(см. также задачу 8.395). При $V \geq v_k$ решение получается заменой V на v_k в формулах (8.114).

8.457.

$$v(x, t) = \begin{cases} 0, & c_0 t \leq x, \\ \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\gamma+1}{2} at - c_0 + \sqrt{\left(\frac{\gamma+1}{2} at - c_0 \right)^2 + 2\gamma a(c_0 t - x)} \right), & \frac{at^2}{2} \leq x \leq c_0 t; \end{cases}$$

ударная волна возникает на переднем фронте $x_k = c_0 t_k$ в момент времени $t_k = \frac{2c_0}{a(\gamma+1)}$.

У к а з а н и е. Значение t_k — корень уравнения $\frac{\partial x}{\partial v} \Big|_{v=0} = 0$.

8.458. Ударная волна образуется между поршнем и передним фронтом в сечении $x_k = 2c_0 \frac{4\gamma+1}{3(\gamma+1)} \sqrt{\frac{2c_0}{a(3\gamma+1)}}$ в момент времени $t_k = \frac{1}{\gamma+1} \sqrt{\frac{2c_0(3\gamma+1)}{a}}$.

У к а з а н и е. Условия возникновения ударной волны: $\frac{\partial x}{\partial v} = 0$, $\frac{\partial^2 x}{\partial v^2} = 0$.

8.459. Решение. В r -волне Римана второй инвариант сохраняет постоянное значение; в данном случае $s = v - \frac{2c}{\gamma-1} \equiv -\frac{2c_0}{\gamma-1}$, откуда следует,

что $c = c_0 + \frac{(\gamma - 1)v}{2}$. Подстановка найденного выражения для c в первое уравнения системы (8.85) преобразует его к виду (8.95).

$$\mathbf{8.460.} \quad v(x, t) = 0, \quad c_0 t \leq x,$$

$$\begin{cases} v(x, t) = \mu(t_0), \\ x = \left(c_0 + \frac{\gamma + 1}{2} \mu(t_0)\right) (t - t_0), \end{cases}$$

при $x \leq c_0 t$.

$$\mathbf{8.461.} \quad x_k = t_k = 0, \quad 0 \leq n < 1,$$

$$x_k = \frac{2c_0^2}{k(\gamma + 1)}, \quad t_k = \frac{2c_0}{k(\gamma + 1)}, \quad n = 1,$$

$$\text{при } n > 1 \quad \begin{cases} x_k = \frac{4c_0 n}{n^2 - 1} \left[\frac{2c_0(n - 1)}{k(\gamma + 1)(n + 1)} \right]^{\frac{1}{n}}, \\ t_k = \left[\frac{c_0}{k(\gamma + 1)} \right]^{\frac{1}{n}} \left(\frac{2c_0(n - 1)}{k(\gamma + 1)(n + 1)} \right)^{\frac{n-1}{n}}. \end{cases}$$

8.462. У к а з а н и е. Переход к независимым переменным r и s осуществляется на базе гидродинамической системы, записанной в инвариантах (8.86). На Γ_r -характеристике, уравнение которой $dx = (\alpha r + \beta s) dt$, инвариант Римана r сохраняет постоянное значение, поэтому вдоль Γ_r -характеристики имеют место соотношения

$$dx(r, s) = x_r dr + x_s ds = x_s ds, \quad dt(r, s) = t_r dr + t_s ds = t_s ds.$$

Уравнение характеристики принимает форму: $x_s = (\alpha r + \beta s) t_s$. Аналогично преобразуется уравнение Γ_s -характеристики. Таким образом, функции $x(r, s)$ и $t(r, s)$ удовлетворяют системе уравнений

$$\frac{\partial x}{\partial s} = (\alpha r + \beta s) \frac{\partial t}{\partial s}, \quad \frac{\partial x}{\partial r} = (\alpha s + \beta r) \frac{\partial t}{\partial r}.$$

Если из этой системы исключить (посредством дифференцирования) $x(r, s)$, то для $t(r, s)$ получится уравнение Дарбу-Эйлера (задача 8.77, п. 1:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r \partial s} - \frac{k}{r - s} \left(\frac{\partial t}{\partial r} - \frac{\partial t}{\partial s} \right) = 0.$$

$$\mathbf{8.463.} \quad h(x, t) = H(x_0), \quad u(x, t) = 2(\sqrt{gH(x_0)} - \sqrt{gh_0}),$$

$$x = (3\sqrt{gH(x_0)} - 2\sqrt{gh_0})t + x_0, \quad t_k = -\frac{2}{3}\sqrt{H(x_k)/g}/H'(x_0),$$

где x_k — точка, в которой $\sqrt{H(x)}/|H_r(x)|$ имеет наибольшее значение.

$$\mathbf{8.464.} \quad h(x, t) = \begin{cases} h_0, & x \leq -\sqrt{gh_0} t, \\ \frac{1}{9g} \left(2\sqrt{gh_0} - \frac{x}{t} \right)^2, & -\sqrt{gh_0} t \leq x \leq 2\sqrt{gh_0} t, \\ 0, & 2\sqrt{gh_0} t \leq x. \end{cases}$$

$$u(x, t) = \begin{cases} 0, & x \leq -\sqrt{gh_0} t, \\ \frac{2}{3} \left(\sqrt{gh_0} + \frac{x}{t} \right), & -\sqrt{gh_0} t \leq x \leq 2\sqrt{gh_0} t, \end{cases}$$

$$u(0, t) = \frac{4}{9}gh_0, \quad h(0, t) = \frac{2}{3}\sqrt{gh_0}.$$

8.465. 1, а) $\theta(x, y) = 0$, $\varphi(x, y) = \varphi_0 \arcsin \frac{c_0}{v_0}$, $x \operatorname{tg} \varphi_0 \leq y$,

$$\theta(x, y) = \theta_S, \quad \varphi(x, y) = \varphi_S,$$

$$y = f(x_0) + (x - x_0) \operatorname{tg}(\theta_S + \varphi_S),$$

$$\theta_S = f', \quad f(x) \leq y \leq x \operatorname{tg} \varphi_0,$$

$$F(\varphi_S) = F(\varphi_0) + \theta_S,$$

символ S указывает, что значение величины вычислено на поверхности S ;

$$P_S = \begin{cases} P_0, & x \leq 0, \\ P_0 \left(\frac{2 + (\gamma - 1) \operatorname{cosec}^2 \varphi_0}{2 + (\gamma - 1) \operatorname{cosec}^2 \varphi_S} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, & 0 \leq x. \end{cases} \quad (8.115)$$

1, б) $\theta(x, y) = 0$, $\varphi(x, y) = \varphi_0$, $x \operatorname{tg} \varphi_0 \leq y$,

$$\begin{cases} \theta(x, y) + \varphi(x, y) = \operatorname{arctg} \frac{x}{y}, \\ F(\varphi) - \theta = F(\varphi_0), \\ \theta(x, y) = \theta_1 = -\operatorname{arctg} k, \end{cases} \quad \begin{aligned} & x \operatorname{tg}(\theta_S + \varphi_S) \leq y \leq x \operatorname{tg} \varphi_0, \\ & -kx \leq y \leq x \operatorname{tg}(\theta_1 + \varphi_1). \end{aligned}$$

$$F(\varphi_1) = F(\varphi_0) + \theta_1,$$

Давление выражается формулой (8.115) при $\varphi_S = \varphi_1$.

Решение. 1, а) из уравнения $y' = \operatorname{tg}(\theta - \varphi)$ характеристики Γ_2 (см. (8.90)) следует, что Γ_2 начинается в области, где поток однороден (рис. 8.13). На Γ_2 инвариант $r_2(x, y)$ сохраняет постоянное значение

$$r_2(x, y) = F(\varphi) - \theta = F(\varphi_0). \quad (8.116)$$

Так как $F(\varphi_0)$ от y не зависит, то $r_2(x, y) \equiv r_{20} = F(\varphi_0)$. Система (8.90), в которой второе уравнение удовлетворяется тождественно, определяет задачу для $r_1(x, y)$:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial r_1}{\partial x} + \lambda_1(r_1, r_{20}) \frac{\partial r_1}{\partial y}, \\ & -\infty < x < \infty, \quad f(x) < y, \\ & r_1(x, f(x)) = F(\varphi_0) - 2\theta_S, \quad \operatorname{tg} \theta_S = f'. \end{aligned}$$

Поскольку инвариант $r_1(x, y)$ имеет постоянное значение на характеристике Γ_1 , то Γ_1 — прямая линия $y = (x - x_0) \operatorname{tg}(\theta_S - \varphi_S) + f(x_0)$, где φ_S дано соотношением (8.116)

$$F(\varphi_S) = F(\varphi_0) + \theta_S. \quad (8.117)$$

Итак, $r_1(x, y) = F(\varphi_0) + 2\theta_S$, $y = (x - x_0) \operatorname{tg}(\theta_S - \varphi_S) + f(x_0)$, $-\infty < x_0 < \infty$. Теперь нужно применить формулы $\theta(x, y) = \frac{1}{2}(r_1 - r_2)$, $F(\varphi) = \frac{1}{2}(r_1 + r_2)$.

Выражение для давления есть следствие двух формул:

$$c^2 = c_0^2 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}},$$

которая получается из ((1.164), т. 1) в результате исключения ρ с помощью уравнения адиабаты $P/P_0 = (\rho/\rho_0)^\gamma$, и формулы

$$\frac{c^2}{2} \operatorname{cosec}^2 \varphi + \frac{c^2}{\gamma - 1} = \frac{c_0^2}{2} \operatorname{cosec}^2 \varphi_0 + \frac{c_0^2}{\gamma - 1},$$

вытекающей из (8.88) и $\varphi = \arcsin \frac{c}{v}$.

У к а з а н и е к п. 2. Функция φ_S , заданная выражением (8.117), монотонно зависит от $\theta_S = \frac{d\varphi_S}{d\theta_S} \frac{2 \sin^2 \varphi_S}{\gamma + \cos 2\varphi_S} > 0$.

8.466. Да. У к а з а н и е. См. задачу 8.405.

$$\mathbf{8.467.} \quad u(x, t) = \begin{cases} u_0, & l < x < Ut, \quad t > t_k, \\ 0, & Ut < x, \quad U = \frac{\alpha u_0}{2}. \end{cases}$$

У к а з а н и е. Записать закон сохранения числа машин в форме (8.97).

$$\mathbf{8.468.} \quad u(x, t) = \begin{cases} u_2, & 0 < x < Ut, \\ 0, & Ut < x, \\ U = \frac{q(u_2) - q(u_1)}{u_2 - u_1}. \end{cases}$$

У к а з а н и е. Смешанную задачу свести к задаче Коши с начальным условием

$$u(x, 0) = \begin{cases} u_2, & x < 0, \\ u_1, & 0 < x. \end{cases}$$

8.469. У к а з а н и я. 1) Исключить v_1 и v_2 из условий (8.98); 2) энтропия идеального газа $S = c_V \ln(P/\rho^\gamma)$. При движении ударной волны газ перемещается из области 1 в область 2, что приводит к возрастанию энтропии, т. е. $S_2 - S_1 > 0$. Неравенство $\rho_2 > \rho_1$ вытекает из положительности производной $\partial(S_2 - S_1)/\partial z$, а неравенство $P_2 > P_1$ — из (8.99); 4) использовать соотношения

$$\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} = \frac{2(1 - M_2^2)}{(\gamma + 1)M_2} = \frac{2(M_1^2 - 1)}{2 + (\gamma - 1)M_1^2},$$

которые следуют из условий (8.99), где $M = \frac{v}{c}$ — число Маха.

$$\mathbf{8.470.} \quad x = Ut, \quad U = \frac{\gamma + 1}{4} V + \sqrt{c_1^2 + \left(\frac{\gamma + 1}{4} V\right)^2},$$

$$P(x, t) = \begin{cases} P_1 \left(1 + \frac{\gamma(\gamma + 1)V^2}{4c_1^2} + \frac{\gamma V}{c_1} \sqrt{1 + \left(\frac{(\gamma + 1)V}{4c_1}\right)^2} \right), & 0 < x < Ut, \\ P_2, & Ut < x. \end{cases}$$

У к а з а н и е. Скорость газа между поршнем и ударной волной равна скорости поршня.

8.471. У к а з а н и я: 1) плотность потоков массы ρu и импульса $P + \rho u^2$ (см. пример 8.17) проинтегрировать по z от 0 до h ; 2) энергия

$$w = \int_0^h \left(\frac{\rho u^2}{2} + \rho g z \right) dz = \frac{\rho u^2 h}{2} + \frac{\rho g h^2}{2};$$

преобразование производной w_t с помощью уравнений (8.91) дает

$$q_w = \rho u \left(\frac{u^2 h}{2} + g h^2 \right);$$

3) перемещение жидкости из области 1 в область 2 сопровождается потерей энергии; 4) из условий (8.100) следует, что

$$v_1^2 = \frac{g h_2}{2 h_1} (h_1 + h_2), \quad v_2^2 = \frac{g h_1}{2 h_2} (h_1 + h_2).$$

Глава 9

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ

Применение линейных уравнений для моделирования физических явлений возможно лишь при условии малости физических параметров. В реальных процессах эти условия не выполняются, поэтому многие явления (например, ударная волна в газе, нелинейные волны на поверхности воды, распространение лазерного излучения и др.) не укладываются в рамки линейной теории. Для решения прикладных задач необходимо разрабатывать более сложные модели, включающие нелинейные эффекты. Среди нелинейных уравнений, встречающихся в математической физике, следует выделить: уравнение Кортевега–де Фриза (КдФ)

$$u_t + 6uu_x + u_{xxx} = 0, \quad (9.1)$$

модифицированное уравнение КдФ (мКдФ)

$$u_t + 6u^2u_x + u_{xxx} = 0, \quad (9.2)$$

нелинейное уравнение Шредингера (НУШ)

$$iu_t + u_{xx} + 2u|u|^2 = 0, \quad (9.3)$$

уравнение sin-Гордон (СГ)

$$u_{xt} = \sin u. \quad (9.4)$$

Решить задачу математической физики означает найти решение уравнения при дополнительных условиях (начальных, граничных). Такое решение можно извлечь из общего решения уравнения, однако найти общее решение нелинейного уравнения удается лишь в редких случаях.

В 1967 г. был открыт метод решения задачи Коши для уравнения Кортевега–де Фриза, известный как метод обратной задачи рассеяния (МОЗР). Это открытие послужило началом интенсивного изучения нелинейных уравнений. МОЗР был распространен на уравнения мКдФ, СГ, НУШ и другие уравнения.

Этот метод не является универсальным, поэтому для исследования нелинейных эффектов в физических процессах и для

изучения свойств уравнений используются частные решения (т.е. решения уравнений без каких-либо условий), называемые точными. Особый интерес как с практической, так и с теоретической точки зрения представляют точные решения приведенных выше нелинейных уравнений, называемые солитонами. Солитон — это уединенная нелинейная волна, распространяющаяся без изменения формы с постоянной скоростью; при взаимодействии солитонов их форма и скорость не изменяются (упругое взаимодействие). Наряду с МОЗР были разработаны другие методы построения солитонных решений различных нелинейных уравнений. Изложение теории солитонов имеется в книгах [1, 17, 24, 28, 55, 64].

В последнем параграфе этой главы рассмотрены некоторые из наиболее простых методов отыскания точных решений нелинейных уравнений. Задачи для демонстрации методов взяты из справочников [69],[68], которые содержат богатейший материал по нелинейным уравнениям математической физики, возникающих при моделировании различных физических процессов. Более полное представление о методах решения нелинейных уравнений дают монографии [42, 70].

Литература к главе 9

1. Абловиц М., Сигур Х. Солитоны и метод обратной задачи. — М.: Мир, 1987.
2. Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. — М.: Мир, 1988.
3. Захаров В.Е., Манахов С.В., Питаевский Л.П. Теория солитонов: метод обратной задачи. — М.: Наука, 1980.
4. Кудряшов Н.А. Аналитические методы в теории нелинейных уравнений в частных производных. — М.: МИФИ, 2008.
5. Лэм Дж.Л. Введение в теорию солитонов. — М.: Меркурий-Пресс, 1983.
6. Полянин А.Д., Зайцев В.Ф., Журов А.И. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.

9.1. Метод обратной задачи рассеяния

Пример 9.1. В теории рассеяния применяются решения Йоста уравнения Шредингера (задача 6.342). Каждое из решений

Йоста существует и единственно. Эти свойства устанавливаются с помощью интегральных уравнений (6.51). Для доказательства вводится новая функция $\chi^+(x, k) = f^+(x, k) \exp(-ikx)$, удовлетворяющая уравнению (оно получается подстановкой $f^+ = \chi \exp(ikx)$ в (6.51))

$$\chi^+(x, k) = 1 + \int_x^\infty \frac{e^{2ik(\xi-x)} - 1}{2ik} u(\xi) \chi^+(\xi, k) d\xi, \quad (9.5)$$

или в операторной форме

$$\chi^+ = 1 + \mathcal{K} \chi^+.$$

Оператор $\mathcal{K}$ определен на множестве $\mathcal{M}_{\mathcal{K}}$ функций $v(x, k)$, непрерывных и ограниченных на промежутке $\overline{H} = \{x: h \leq x\}$ при каждом $k \in \{ : \operatorname{Im} k \geq 0 \}$ и при любом h . Последовательность функций сходится в смысле (8.40), где $\|v\| = \max_{\overline{H}} |v|$.

Если $\xi \geq x$, $\operatorname{Im} k \geq 0$, то

$$|K(\xi, x, k)| = \left| \frac{e^{2ik(\xi-x)} - 1}{2ik(\xi-x)} \right| (\xi-x) |u(\xi)| \leq M(\xi-x) |u(\xi)|, \quad (9.6)$$

где $K(\xi, x, k)$ — ядро оператора $\mathcal{K}$. Оператор $\mathcal{K}$ отображает $\mathcal{M}_{\mathcal{K}}$ в $\mathcal{M}_{\mathcal{K}}$. Действительно, ограниченность несобственного интеграла $w = \mathcal{K}v$ вытекает из оценки (9.6):

$$\begin{aligned} |w| &\leq \int_x^\infty |K(\xi, x, k)| \cdot |v(\xi, k)| d\xi \leq \|v\| \int_x^\infty (\xi-x) |u(\xi)| d\xi \leq \\ &\leq M \|v\| U(x) \leq MU(h) \|v\|, \end{aligned}$$

где $U(x)$ определена выражением (8.38). Для доказательства непрерывности интеграла $\mathcal{K}v$ его следует представить в виде суммы $w_1 + w_2$ интегралов в пределах от x до h и от h до ∞ соответственно; функция $w_1(x)$ непрерывна, а непрерывность $w_2(x)$ проверяется непосредственно: при $\Delta x \rightarrow 0$

$$|\Delta w_2| \leq \|v\| \left| \frac{e^{-2ik\Delta x} - 1}{2ik\Delta x} \right| |\Delta x| \int_h^\infty |u(\xi)| d\xi \rightarrow 0.$$

Дальнейшее доказательство проводится методом, изложенным в примере 8.10. Исследование сходимости ряда Неймана $\sum_{m=0}^\infty \mathcal{K}^m 1$

основано на оценке

$$|\mathcal{K}^m 1| \leq \frac{M^m U^m(x)}{m!}, \quad m \in \mathbb{N}, \quad (9.7)$$

которая устанавливается так же, как и оценка (8.43). Из неравенства (9.7) следует, что

$$|\chi^+(x, k)| \leq e^{MU(x)}. \quad (9.8)$$

9.1. Показать, что при вещественном k

$$\overline{f^\pm(x, -k)} = f^\pm(x, k). \quad (9.9)$$

9.2. Доказать, что решения Йоста $f^\pm(x, k)$ как функции k аналитичны в полуплоскости $\operatorname{Im} k > 0$ и непрерывны в замкнутой полуплоскости $\operatorname{Im} k \geq 0$.

9.3. Получить более точную, по сравнению с (9.8), оценку функций $\chi^\pm(x, k)$ при $\operatorname{Im} k \geq 0$:

$$|\chi^\pm| \leq e^{MU_1^\pm(x)} \cdot \begin{cases} 1 & 0 \leq \pm x, \\ 1 \mp MxU_0^\pm(x)(1 + MU_1^\pm(x)), & \pm x < 0, \end{cases} \quad (9.10)$$

где функции χ^+ соответствует верхний знак, а функции χ^- — нижний,

$$U_j^\pm(x) = \pm \int_x^{\pm\infty} |\xi|^j |u(\xi)| d\xi, \quad j = 0, 1.$$

9.4. Установить асимптотические оценки для решений Йоста:

$$\begin{aligned} f^\pm(x, k)e^{\mp ikx} &= 1 + o(1), \\ f_x^\pm(x, k)e^{\mp ikx} &= \pm ik + o(1), \end{aligned} \quad x \rightarrow \pm\infty, \quad \operatorname{Im} k \geq 0, \quad (9.11)$$

в которых верхнему знаку соответствует $x \rightarrow +\infty$, а нижнему — $x \rightarrow -\infty$;

$$f^\pm(x, k)e^{\mp ikx} = 1 + O\left(\frac{1}{k}\right), \quad k \rightarrow \infty, \quad \operatorname{Im} k \geq 0, \quad x \in \mathbb{R}. \quad (9.12)$$

Эти оценки являются равномерными по k и x в указанных областях.

9.5. При условии $\operatorname{Im} k \geq 0$ вычислить вронскианы:

$$1) W[f^+(x, k), f^+(x, -k)]; \quad 2) W[f^-(x, k), f^-(x, -k)].$$

Пример 9.2. Если $\text{Im } k \geq 0$, $k \neq 0$, то пара функций $f^+(x, k)$ и $f^+(x, -k)$ образуют фундаментальную систему решений уравнения Шредингера (задача 9.5), поэтому

$$f^-(x, k) = a(k)f^+(x, -k) + b(k)f^+(x, k). \quad (9.13)$$

Коэффициенты $a(k)$ и $b(k)$ можно найти, используя асимптотику (9.13). Действительно, при $x \rightarrow +\infty$

$$f^-(x, k) = a(k)e^{-ikx} + b(k)e^{ikx} + o(1).$$

С другой стороны, соотношение (9.13), преобразованное к виду

$$\begin{aligned} f^-(x, k) = & e^{-ikx} - \frac{1}{2ik} \int_{-\infty}^{\infty} u(\xi) f^-(\xi, k) e^{ik\xi} d\xi e^{-ikx} + \\ & + \frac{1}{2ik} \int_{-\infty}^{\infty} u(\xi) f^-(\xi, k) e^{-ik\xi} d\xi e^{ikx} + \\ & + \frac{1}{k} \int_x^{\infty} u(\xi) f^-(\xi, k) \sin k(\xi - x) d\xi, \end{aligned}$$

представляет собой асимптотику $f_-(x, k)$ при $x \rightarrow +\infty$ (последнее слагаемое есть $o(1)$). Следовательно,

$$\begin{aligned} a(k) &= 1 - \frac{1}{2ik} \int_{-\infty}^{\infty} u(\xi) e^{ik\xi} f^-(\xi, k) d\xi, \\ b(k) &= \frac{1}{2ik} \int_{-\infty}^{\infty} u(\xi) e^{-ik\xi} f^-(\xi, k) d\xi. \end{aligned}$$

Сходимость интегралов гарантируется оценкой (9.10).

В задачах рассеяния вводятся коэффициенты отражения $R(k) = b(k)/a(k)$ и прохождения $T(k) = 1/a(k)$ плоской волны при взаимодействии с потенциалом $u(x)$. Если ввести функции $\psi(x, k) = f_-(x, k)/a(k)$, то

$$\psi(x, k) = \begin{cases} T(k)e^{-ikx} + o(1), & x \rightarrow -\infty, \\ e^{-ikx} + R(k)e^{ikx} + o(1), & x \rightarrow +\infty. \end{cases}$$

При вещественном k сумма во второй строке представляет собой суперпозицию падающей из $+\infty$ плоской волны e^{-ikx} и отраженной волны; выражение в первой строке описывает прошедшую волну.

9.6. Доказать, что функция $a(k)$ является аналитической в полуплоскости $\text{Im } k > 0$ и непрерывна в замкнутой полуплоскости $\{k: \text{Im } k \geq 0, k \neq 0\}$, а функция $b(k) \in C(\text{Im } k = 0, k \neq 0)$.

9.7. При $k \neq 0$ выразить коэффициенты $a(k)$ и $b(k)$ через решения Йоста в виде

$$a(k) = \frac{1}{2ik} W[f^-(x, k), f^+(x, k)], \quad \text{Im } k \geq 0, \quad (9.14)$$

$$b(k) = -\frac{1}{2ik} W[f^-(x, k), f^+(x, -k)], \quad \text{Im } k = 0. \quad (9.15)$$

9.8. При вещественном k установить формулы

$$\overline{a(k)} = a(-k), \quad \overline{b(k)} = b(-k), \quad (9.16)$$

$$|a(k)|^2 = 1 + |b(k)|^2. \quad (9.17)$$

9.9. Получить асимптотические формулы

$$a(k) = 1 + O\left(\frac{1}{k}\right), \quad k \rightarrow \infty, \quad \text{Im } k \geq 0, \quad (9.18)$$

$$b(k) = O\left(\frac{1}{k^2}\right), \quad k \rightarrow \infty, \quad \text{Im } k = 0. \quad (9.19)$$

9.10. Доказать, что $a(k)$ не имеет нулей.

Пример 9.3. Свойства собственных функций и собственных значений задачи Штурма–Лиувилля для уравнения Шредингера

$$\mathcal{L}\psi \equiv -\psi'' + u(x)\psi = \lambda\psi, \quad (9.20)$$

$$\psi \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}} = \{\psi: \psi \in C^2(\mathbb{R}) \cap L_2(\mathbb{R})\},$$

где $u(x)$ удовлетворяет условиям (6.50).

Пусть $\lambda_n \neq 0$ — собственное значение, а $\psi_n(x)$ — соответствующая собственная функция оператора $\mathcal{L}$: $\mathcal{L}\psi_n = \lambda_n\psi_n$, $\psi_n \neq 0$. Поскольку $\psi_n = \mathcal{L}\psi_n/\lambda_n \in L_2(\mathbb{R})$, то при $x \rightarrow \infty$ существует конечный предел интеграла

$$\begin{aligned} \int_{-x}^x (\overline{\psi_n} \mathcal{L}\psi_n + \psi_n \mathcal{L}\overline{\psi_n}) d\xi &= \\ &= -(\overline{\psi_n}' \psi_n + \psi_n' \overline{\psi_n}) \Big|_{-x}^x + 2 \int_{-x}^x (u|\psi_n|^2 + |\psi_n'|^2) d\xi = \\ &= -\frac{d}{dx} (|\psi_n(x)|^2 + |\psi_n(-x)|^2) + 2 \int_{-x}^x (u|\psi_n|^2 + |\psi_n'|^2) d\xi. \end{aligned}$$

Так как интеграл в правой части имеет предел (конечный или нет), то существует предел подстановки. Этот предел равен нулю (иначе $\psi_n \notin L_2(\mathbb{R})$), следовательно, $\psi'_n \in L_2(\mathbb{R})$. Располагая этими свойствами собственных функций, нетрудно показать, что собственные значения оператора $\mathcal{L}$ вещественны:

$$\begin{aligned} \lambda_n(\psi_n, \psi_n) &= (\mathcal{L}\psi_n, \psi_n) = -\psi'_n \bar{\psi}_n \Big|_{-\infty}^{\infty} + \\ &+ \int_{-\infty}^{\infty} (u|\psi_n|^2 + |\psi'_n|^2) d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} (u|\psi_n|^2 + |\psi'_n|^2) d\xi. \end{aligned}$$

Неотрицательные λ не могут быть собственными значениями оператора $\mathcal{L}$. Действительно, если $\lambda = k_n^2 > 0$, то соответствующее решение, являясь линейной комбинацией $f^+(x, k)$, $f^-(x, k)$, имеет при $x \rightarrow +\infty$ асимптотику (см. (9.11))

$$C_1 e^{ik_n x} + C_2 e^{-ik_n x} + o(1)$$

и, следовательно, не принадлежит $\mathcal{M}_{\mathcal{L}}$. Такой же вывод справедлив и для $\lambda = 0$, ибо в этом случае одно из решений ведет себя при $x \rightarrow +\infty$ как $1 + o(1)$, а другое — как $x + o(x)$.

Пусть $\lambda_n = -\beta_n^2$, $\beta_n > 0$. Если в качестве фундаментальной системы решений взять $f^-(x, i\beta_n)$, $f^-(x, -i\beta_n)$, то при $x \rightarrow -\infty$

$$\begin{aligned} \psi_{n(x)} &= A_n f^-(x, i\beta_n) + B_n f^-(x, -i\beta_n) = \\ &= A_n (e^{\beta_n x} + o(e^{\beta_n x})) + B_n (e^{-\beta_n x} + o(e^{-\beta_n x})). \end{aligned}$$

Из условия $\psi_n \in L_2(\mathbb{R})$ следует, что $B_n = 0$; другую константу можно выбрать произвольно, например, $A_n = 1$. Аналогичная ситуация возникает при выборе фундаментальной системы решений $f^+(x, i\beta_n)$, $f^+(x, -i\beta_n)$. В этом случае остается функция $f^+(x, i\beta_n)$. Таким образом,

$$\psi_n = f^-(x, i\beta_n) = b_n f^+(x, i\beta_n) = \begin{cases} e^{\beta_n x} + o(e^{\beta_n x}), & x \rightarrow -\infty, \\ e^{-\beta_n x} + o(e^{-\beta_n x}), & x \rightarrow +\infty. \end{cases}$$

Так как оператор $\mathcal{L}$ веществен, то собственные функции можно выбрать вещественными, тогда b_n — вещественное число.

9.11. Доказать, что между нулями функции $a(k)$, $\text{Im } k \geq 0$, и собственными значениями задачи (9.20) имеется взаимно однозначное соответствие.

9.12. Доказать, что нули функции $a(k)$, $\text{Im } k \geq 0$, простые.

9.13. Пусть $\psi_n(x) = f^-(x, i\beta_n) = b_n f^+(x, i\beta_n)$ — функция, построенная в примере 9.3, $d_n = \|\psi_n\|$. Доказать, что

$$d_n^2 = i b_n a'(i\beta_n). \quad (9.21)$$

9.14. Доказать, что: 1) все собственные значения задачи (9.20) простые; 2) число собственных значений конечно.

9.15. Пусть $\Lambda_n = \{i\beta_1, i\beta_2, \dots, i\beta_n\}$, $\beta_j > 0$, — множество нулей $a(k)$. Доказать, что функция $R(k) \in C(\text{Im } k = 0)$, а $T(k)$ есть мероморфная в полуплоскости $\text{Im } k > 0$ функция с простыми полюсами $i\beta_j$, $j = 1, 2, \dots, n$, непрерывная в области $\{k: \text{Im } k \geq 0\}/\Lambda_n$.

9.16. Доказать, что при вещественном k

$$\overline{T(-k)} = T(k), \quad \overline{R(-k)} = R(k), \quad (9.22)$$

$$|T(k)|^2 + |R(k)|^2 = 1. \quad (9.23)$$

9.17. Получить асимптотические формулы

$$T(k) = 1 + O\left(\frac{1}{k}\right), \quad k \rightarrow \infty, \quad \text{Im } k \geq 0, \quad (9.24)$$

$$R(k) = O\left(\frac{1}{k^2}\right), \quad k \rightarrow \infty, \quad \text{Im } k = 0. \quad (9.25)$$

9.18. Даны операторы

$$\mathcal{L}_0 = -\frac{d^2}{dx^2}, \quad \mathcal{L} = -\frac{d^2}{dx^2} + u(x),$$

где функция $u(x)$ удовлетворяет условиям (6.50), и линейный оператор Ω с областью определения $\mathcal{M}_\Omega$, удовлетворяющий условию $\mathcal{L}\Omega f = \Omega\mathcal{L}_0 f$.

1. Доказать, что Ω преобразует решение φ уравнения $\mathcal{L}_0\varphi = k^2\varphi$ в решение $\psi = \Omega\varphi$ уравнения $\mathcal{L}\psi = k^2\psi$.

2. Пусть $\mathcal{E}(\overline{\Delta})$, где $\overline{\Delta} = \{x, y: h \leq x \leq y\}$ — множество функций $K(x, y)$, удовлетворяющих условиям:

если $y \rightarrow \infty$, то при любом h функция $K(x, y) \rightarrow 0$ равномерно по x на промежутке $\overline{H} = [h, \infty)$,

интегралы

$$\int_x^\infty \left| \frac{\partial^m K(x, y)}{\partial y^m} \right| dy, \quad m = 1, 2,$$

сходятся на $\overline{H}$, а интегралы

$$\int_x^\infty \left| \frac{\partial^m K(x, y)}{\partial x^m} \right| dy, \quad m = 0, 1, 2,$$

равномерно сходятся на $\overline{H}$. Доказать, что существует единственная функция $K(x, y) \in \mathcal{E}(\overline{\Delta})$, такая что

$$(\Omega f)(x) = f(x) + \int_x^\infty K(x, y) f(y) dy, \quad (9.26)$$

где $f \in C^2(\mathbb{R})$, $\forall x \in \overline{H}: |f^{(m)}(x)| \leq M$, $m = 0, 1, 2$.

Пример 9.4. Прямая задача рассеяния для уравнения Шредингера

$$-\psi'' + u(x)\psi = k^2\psi, \quad -\infty < x < \infty, \quad (9.27)$$

где потенциал $u(x)$ удовлетворяет условиям (6.50), заключается в определении коэффициентов прохождения и отражения, а также собственных значений и собственных функций. Пусть $\psi_n(x) = f^-(x, i\beta_n) = b_n f^+(x, i\beta_n)$ — собственная функция из примера 9.3, $c_n^2 = b_n^2/d_n^2$ (см. (9.21)). Элементы множества

$$s = \{R(k), \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N, c_1^2, c_2^2, \dots, c_N^2\}$$

называются данными рассеяния.

Прямая задача рассеяния является частью МОЗР; говоря о ее решении, имеют в виду построение множества s .

Пусть $u(x) = -U_0\delta(x)$, $U_0 > 0$, тогда решение уравнения (9.27)

$$\psi(x) = \begin{cases} e^{-ikx}, & x < 0, \\ ae^{-ikx} + be^{ikx}, & x > 0. \end{cases}$$

Из условий в нуле $\psi(+0) = \psi(-0)$, $\psi'(+0) - \psi'(0) = -U_0\psi(+0)$ следует, что $a + b = 1$, $-ika + ikb + ik = -U_0$, откуда

$$a(k) = 1 - \frac{iU_0}{2k}, \quad b(k) = \frac{iU_0}{2k}.$$

Уравнение $a(k) = 0$ имеет мнимый корень $k_1 = iU_0/2$, которому соответствуют $\beta_1 = U_0/2$, $a'(i\beta_1) = -2i/U_0$, $b_1 = b(i\beta_1) = 1$, следовательно,

$$s = \left\{ R(k) = \frac{iU_0}{2k - iU_0}, \beta_1 = \frac{U_0}{2}, c_1^2 = \frac{U_0}{2} \right\}.$$

9.19. Решить задачу рассеяния для уравнения Шредингера (9.27) с потенциалом $U_0\delta(x)$, $U_0 > 0$.

9.20. Найти данные рассеяния для уравнения (9.27) на потенциале

$$u(x) = -U_0\eta(l - |x|), \quad U_0 > 0. \quad (9.28)$$

9.21. Решить задачу рассеяния для уравнения (9.27) с потенциалом $u(x) = -U_0 \operatorname{sech}^2 \frac{x}{l}$.

9.22. Потенциал $u(x)$ в уравнении (9.27) называется безотражательным, если $R(k) = 0$. Будут ли безотражательными потенциалы, рассмотренные в примере 9.4 и в задачах 9.19, 9.20?

9.23. Найти условие, при котором потенциал из задачи 9.21 будет безотражательным.

9.24. Найти данные рассеяния на потенциале

$$u(x) = -\frac{1}{l^2}N(N+1)\operatorname{sech}^2 \frac{x}{l},$$

где N — целое положительное число.

Пример 9.5. Обратная задача рассеяния для уравнения Шредингера (9.27) состоит в восстановлении потенциала $u(x)$ по данным рассеяния. В качестве элементов множества s можно взять любую функцию $R(k) \in C(-\infty < k < \infty)$, удовлетворяющую условиям (9.25) и $|R(k)| \leq 1$ (в силу (9.23)), и $2N$ произвольных положительных величин $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N, c_1^2, c_2^2, \dots, c_N^2$. Процедура восстановления потенциала связана с решением линейного интегрального уравнения Гельфанда–Левитана–Марченко (ГЛМ). Вывод этого уравнения основан на соотношении (9.13), записанном в виде

$$T(k)f^-(x, k) = f^+(x, -k) + R(k)f^+(x, k), \quad (9.29)$$

и преобразовании (9.26)

$$f^+(x, k) = e^{ikx} + \int_x^\infty K(x, z)e^{ikz}dz. \quad (9.30)$$

В результате вычитания e^{-ikx} из обеих частей (9.29), умножения на e^{iky} и интегрирования по k получается уравнение

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} [T(k)f^-(x, k) - e^{-ikx}] e^{iky} dk = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \{ [f^+(x, -k) - e^{-ikx}] e^{iky} + R(k)f^+(x, k)e^{iky} \} dk \quad (9.31) \end{aligned}$$

Вычисление интеграла в левой части (9.31) осуществляется на комплексной плоскости. Поскольку

$$T(k)f^-(x, k)e^{ikx} - 1 = O\left(\frac{1}{k}\right), \quad k \rightarrow \infty, \quad \text{Im } k \geq 0,$$

что следует из (9.24) и (9.12), то при $y > x$ применима лемма Жордана к контуру $C_r = \{k: |k| = r, 0 \leq \arg k \leq \pi\}$. Следовательно, интеграл существует (хотя бы в смысле главного значения) и равен

$$\begin{aligned} 2\pi i \sum_{n=1}^N \frac{f^-(x, i\beta_n)}{a'(i\beta_n)} e^{-\beta_n y} &= 2\pi i \sum_{n=1}^N \frac{b_n f^+(x, i\beta_n)}{a'(i\beta_n)} e^{-\beta_n y} = \\ &= -2\pi \sum_{n=1}^N c_n^2 e^{-\beta_n(x+y)} - 2\pi \int_x^{\infty} K(x, z) \sum_{n=1}^N c_n^2 e^{-\beta_n(x+z)} dz. \end{aligned}$$

Здесь использовано выражение (9.30) для $f^+(x, k)$ и соотношение (9.21), на основании которого

$$-\frac{ib_n}{a'(i\beta_n)} = \frac{b_n^2}{d_n^2} = c_n^2.$$

Интеграл от первого слагаемого в правой части (9.31) после подстановки функции $f^+(x, k)$ в форме (9.30) превращается в

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{iky} dk \int_x^{\infty} K(x, z) e^{-ikz} dz.$$

Полученное выше выражение есть результат последовательного применения прямого и обратного преобразований Фурье

функции $2\pi K(x, y)\eta(y - x)$. Теперь можно заключить, что существует интеграл от второго слагаемого в правой части (9.31),

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} R(k)e^{iky} \left[e^{ikx} + \int_x^{\infty} K(x, z)e^{ikz} dz \right] dk = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} R(k)e^{ik(x+y)} dk + \int_x^{\infty} K(x, z) dz \int_{-\infty}^{\infty} R(k)e^{ik(y+z)} dk. \end{aligned}$$

Законность изменения порядка интегрирования в интеграле

$$\int_{-\infty}^{\infty} dk \int_x^{\infty} \Phi(z, k) dz, \quad \Phi(z, k) = R(k)K(x, z)e^{ik(y+z)}$$

обусловлена интегрируемостью $|\Phi(z, k)|$ по z и равномерной сходимостью интегралов

$$\int_x^{\infty} \Phi(z, k) dz, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(z, k) dk$$

(первого по $k \in (-\infty, \infty)$, второго по $z \in [x, \infty)$); эти свойства следуют из (9.25) и свойств ядра $K(x, z)$ (см. задачу 9.18). Введением функции

$$F(x) = \sum_{n=1}^N c_n^2 e^{-\beta_n x} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(k)e^{ikx} dk$$

достигается компактная запись результата преобразования уравнения (9.29):

$$K(x, y) + F(x + y) + \int_x^{\infty} K(x, z)F(x + z) dz = 0, \quad y > x. \quad (9.32)$$

Это и есть уравнение ГЛМ. Оно представляет собой сингулярное интегральное уравнение Вольтерра 2-го рода относительно неизвестной функции $K(x, y)$. Потенциал $u(x)$ рассчитывается по формуле (см. (9.139))

$$u(x) = -2 \frac{dK(x, x)}{dx}. \quad (9.33)$$

9.25. Показать, что интегральное уравнение ГЛМ (9.32) восстанавливает δ -функциональные потенциалы по данным рассеяния, полученным: 1) в примере 9.4; 2) в задаче 9.19.

9.26. Восстановить потенциал $u(x)$, если

$$s = \{R(k) = 0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N, c_1^2, c_2^2, \dots, c_N^2\},$$

где $\beta_j > 0$, $j = 1, 2, \dots, N$.

Пример 9.6. Метод обратной задачи рассеяния. Существует класс нелинейных уравнений, для которых задача Коши

$$u_t = \Phi(u, u_x, u_{x^2}, \dots, u_{x^n}), \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \quad (9.34)$$

$$u(x, t)|_{t=0} = u_0(x) \quad (9.35)$$

сводится к нескольким линейным. Для проведения подобной редукции требуется построить два вспомогательных оператора. Один из них — изоспектральный (спектр не зависит от t) оператор Шредингера

$$\mathcal{L}(t) = -D^2 - u(x, t), \quad D = \frac{d}{dx}, \quad (9.36)$$

где $u(x, t)$ — решение задачи (9.34), (9.35). Условием изоспектральности оператора $\mathcal{L}(t)$ является унитарная эквивалентность $\mathcal{L}(t)$ и $\mathcal{L}(0)$:

$$U^*(t)\mathcal{L}(t)U(t) = \mathcal{L}(0), \quad (9.37)$$

где $U(t)$ — унитарный оператор, $U^*(t)$ — сопряженный оператор. В самом деле, если такой оператор $U(t)$ существует, то уравнение $\mathcal{L}(0)\psi(x, 0) = \lambda\psi(x, 0)$ после умножения обеих частей слева на $U(t)$ и применения свойства (9.37) преобразуется в уравнение $\mathcal{L}(t)\psi(x, t) = \lambda\psi(x, t)$, где $\psi(x, t) = U(t)\psi(x, 0)$ с тем же значением λ . Отсюда вытекает существование второго оператора $\mathcal{A}$ со свойствами: $\mathcal{A}$ — антисимметричный оператор, коммутатор $[\mathcal{L}, \mathcal{A}] = \mathcal{L}\mathcal{A} - \mathcal{A}\mathcal{L}$ является оператором умножения,

$$\mathcal{L}_t + [\mathcal{L}, \mathcal{A}] = 0, \quad (9.38)$$

$$\psi_t(x, t) = \mathcal{A}\psi(x, t). \quad (9.39)$$

Действительно, пусть $\mathcal{A} = U_t U^*$, тогда

$$\mathcal{A} + \mathcal{A}^* = U_t U^* + (U_t U^*)^* = U_t U^* + U U_t^* = \frac{d}{dt} U U^* = \frac{dI}{dt} = 0,$$

т. е. $\mathcal{A} = -\mathcal{A}^*$ (антисимметричность). Так как $\mathcal{A} = U_t U^*$, то $U_t = \mathcal{A}U$ и $U_t^* = -U^* \mathcal{A}$; подстановка U_t и U_t^* в тождество

$$U_t^* \mathcal{L}(t)U + U^* \mathcal{L}(t)U + U^* \mathcal{L}(t)U_t = 0,$$

полученное дифференцированием (9.37) по t , приводит к соотношению $U^*(-\mathcal{A}\mathcal{L} + \mathcal{L}_t + \mathcal{L}\mathcal{A}) = 0$, эквивалентному (9.38). Сравнение $\mathcal{L}_t = -u_t$ (результат дифференцирования оператора (9.36) по t) и уравнения (9.37) показывает, что

$$u_t = [\mathcal{L}, \mathcal{A}], \quad (9.40)$$

т. е. $[\mathcal{L}, \mathcal{A}]$ — оператор умножения на функцию u_t . Наконец, из свойства $\psi(x, t) = U\psi(x, 0)$ следует, что

$$\psi_t(x, t) = U_t\psi(x, t) = \mathcal{A}U\psi(x, 0) = \mathcal{A}\psi(x, t).$$

Если уравнения (9.40) и (9.34) эквивалентны, то пара $(\mathcal{L} - \mathcal{A})$ операторов называется парой Лакса для уравнения (9.34).

Применение МОЗР для построения решения задачи Коши (9.34), (9.35) состоит из трех этапов.

1. Решение прямой задачи рассеяния для уравнения Шредингера (9.27) с потенциалом (9.35), который определяет данные рассеяния $s(0)$ при $t = 0$: $u(x, 0) \rightarrow s(0)$.

2. Решение задачи Коши для уравнения (9.35) относительно t при большом фиксированном значении $|x|$; на этом этапе определяется зависимость данных рассеяния от t : $s(0) \rightarrow s(t)$.

3. Решение обратной задачи рассеяния, которая состоит в построении функции $u(x, t)$ по данным рассеяния при фиксированном t : $s(t) \rightarrow u(x, t)$.

Таким образом, для практической реализации МОЗР нужно располагать парой Лакса $(\mathcal{L} - \mathcal{A})$. Конструкция оператора $\mathcal{L}$ известна. Оператор $\mathcal{A}$ в некоторых случаях можно отыскивать в виде

$$\mathcal{A} = -\alpha_m \left(D^{2m+1} + \sum_{j=1}^m (b_j D^{2j-1} + D^{2j-1} b_j) \right), \quad (9.41)$$

где α_m — постоянная величина, b_j — неизвестные функции от u и производных u по x , выбираемые так, чтобы коммутатор $[\mathcal{L}, \mathcal{A}]$ был оператором умножения.

9.27. Построить пару Лакса для уравнения $u_t + u_x = 0$.

9.28. Показать, что пара Лакса для уравнения КдФ (9.1) состоит из операторов $\mathcal{L} = -D^2 - u$ и

$$\mathcal{A} = -4D^3 - 3uD - 3Du. \quad (9.42)$$

9.29. Найти пару Лакса $(\mathcal{L} - A)$, где $\mathcal{L} = -D^2 - u$, а оператор A определен выражением (9.41) при $m = 2$, $\alpha_2 = 16$; показать, что уравнение (9.40) имеет вид

$$u_t + 30u^2u_x + 20u_xu_{xx} + 10uu_{xxx} + u_{xxxx} = 0. \quad (9.43)$$

9.30. Определить зависимость от t данных рассеяния для потенциала $u(x, t)$, удовлетворяющего уравнению КдФ (9.1).

9.31. Найти зависимость данных рассеяния от t для потенциала $u(x, t)$, удовлетворяющего уравнению (9.43).

9.32. Получить решение задачи Коши для уравнения КдФ (9.1), если $u(x, 0) = \frac{2}{l^2} \operatorname{sech}^2 \frac{x}{l}$. Убедиться в том, что решение, называемое солитоном, представляет собой уединенную волну неизменной формы, движущуюся вдоль Ox с постоянной скоростью. Как зависит скорость v_0 солитона от его амплитуды u_0 ?

9.33. Решить задачу Коши для уравнения (9.43) при условии $u(x, 0) = 2 \operatorname{sech}^2 x$.

9.34. Решение $u(x, t)$ задачи Коши с начальной функцией $u(x, 0)$, которой соответствуют данные рассеяния

$$s(0) = \{R(r) = 0, \beta_j, c_j^2, j = 1, 2, \dots, N\}, \quad 0 < \beta_1 < \dots < \beta_N,$$

называется N -солитонным. Построить односолитонное решение: 1) уравнения КдФ (9.1); 2) уравнения (9.43).

9.35. В приближении мелкой воды движение свободной поверхности жидкости описывается уравнением КдФ (1.101).

1) Определить форму и скорость солитона заданной амплитуды ζ_0 . 2) Найти условие, при котором начальное возмущение поверхности $\zeta(x, 0) = \zeta_0 \operatorname{sech}^2 \frac{x}{l}$ представляет собой суперпозицию (нелинейную) N солитонов.

9.36. Построить двухсолитонное решение уравнения КдФ (9.1). Показать, что оно состоит из двух солитонов, перемещающихся вдоль оси Ox с различными скоростями, и в результате взаимодействия солитонов их форма и скорость не изменяются, а происходит лишь сдвиг фаз каждого из них, при этом суммарный сдвиг фаз равен нулю.

9.37. Найти N -солитонное решение уравнения КдФ (9.1) и показать, что: 1) при $t \rightarrow -\infty$ оно представляет собой N солитонов, расположенных вдоль оси Ox в порядке убывания скоростей,

а при $t \rightarrow +\infty$ — в обратном порядке; 2) взаимодействие солитонов не влияет на их форму и скорость. Найти сдвиг фазы солитона с номером k , $1 \leq k \leq N$.

Пример 9.7. Уравнение Шредингера $\Psi'' - q(x)\Psi + k^2\Psi = 0$ сводится к системе дифференциальных уравнений первого порядка относительно функций $\psi_1 = \alpha\Psi' + \beta\Psi$, $\psi_2 = \gamma\Psi$:

$$\begin{cases} \psi_1' - \frac{\alpha}{\gamma}\left(q - k^2 - \frac{\beta^2}{\alpha^2}\right)\psi_2 = \frac{\beta}{\alpha}\psi_1, \\ \frac{\gamma}{\alpha}\psi_1 - \psi_2' = \frac{\beta}{\alpha}\psi_2. \end{cases}$$

При $\gamma = \alpha$, $\beta = ik\alpha$ система принимает вид

$$i \begin{pmatrix} D & -q \\ 1 & -D \end{pmatrix} \psi = k\psi, \quad \psi = \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix}.$$

Для расширения области применимости МОЗР используется система

$$\mathcal{L}\psi = k\psi, \quad (9.44)$$

в которой

$$\mathcal{L} = i \begin{pmatrix} D & -q \\ r & -D \end{pmatrix}, \quad (9.45)$$

а потенциалы q и r принадлежат множеству функций

$$f \in C^2(\mathbb{R}), \quad |f^{(m)}| \leq M e^{-2\beta_0|x|}, \quad \beta_0 > 0, \quad m = 0, 1, 2. \quad (9.46)$$

Для формализации преобразований: будут употребляться матрицы

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \Sigma = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \\ A = \Sigma \Lambda = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & -q \\ r & 0 \end{pmatrix}.$$

В частности, уравнение (9.44) можно представить в виде

$$\Lambda D\psi + B\psi + ik\psi = 0. \quad (9.47)$$

Пусть $\varphi(x, k)$ и $\psi(x, k)$ — решения матричного уравнения (9.44). Определитель Вронского

$$W[\varphi, \psi] = \begin{vmatrix} \varphi_1 & \psi_1 \\ \varphi_2 & \psi_2 \end{vmatrix} = (\psi_2 - \psi_1) \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = (\psi_1, \psi_2) A \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \psi^\tau A \varphi$$

не зависит от x . Действительно, если в уравнение (9.47) подставить φ и ψ , умножить слева полученные тождества, причем

первое — на $\psi^\tau \Sigma$, второе — на $\varphi^\tau \Sigma$, и вычесть одно из другого, то разность будет равна

$$\begin{aligned} \psi^\tau \Sigma \Lambda \varphi_x - \varphi^\tau \Sigma \Lambda \psi_x \psi^\tau A \varphi_x - \varphi^\tau A \psi_x &= \\ &= \psi^\tau A \varphi_x + \psi_x^\tau A \varphi \frac{d}{dx} \psi^\tau A \varphi = \frac{d}{dx} W[\varphi, \psi] = 0, \end{aligned}$$

следовательно, $W[\varphi, \psi] = C(k)$.

9.38. Матрице $P(x) = (P_{ij}(x))$ ставится в соответствие функция $\|P\| = \sum_{ij} |P_{ij}|$; получить оценки

$$\|PQ\| \leq \|P\| \cdot \|Q\|, \quad \left\| \int P dx \right\| \leq \left\| \int \|P\| dx \right\|. \quad (9.48)$$

9.39. В задаче 6.343 определены решения Йоста уравнения (9.44). Показать, что для этих решений справедливы оценки

$$\begin{aligned} \|f^\pm e^{\mp ikx}\| &\leq \begin{cases} M_1, & 0 \leq \beta, \\ 1 + M_2 e^{\pm 2\beta x}, & -\beta_0 < \beta < 0, \end{cases} \\ \|\tilde{f}^\pm e^{\pm ikx}\| &\leq \begin{cases} 1 + M_2 e^{\mp 2\beta x}, & 0 < \beta < \beta_0, \\ M_1, & \beta \leq 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (9.49)$$

где M_1, M_2 — положительные константы, $\beta = \operatorname{Im} k$.

9.40. Доказать, что: 1) каждое из уравнений (6.54) имеет единственное решение, непрерывно дифференцируемое по переменной x в $\mathbb{R}$; 2) решения f^+ и $\tilde{f}^-$ как функции k аналитичны в полуплоскости $\operatorname{Im} k > -\beta_0$, а $\tilde{f}^+$ и f^- — в полуплоскости $\operatorname{Im} k < \beta_0$; все решения уравнения (6.54) удовлетворяют уравнению (9.44).

9.41. Получить следующие асимптотические представления решений Йоста: если $-\beta_0 < \operatorname{Im} k$, то

$$\begin{aligned} e^{-ikx} f^+(x, k) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = o(1), \quad x \rightarrow +\infty, \\ e^{ikx} f^-(x, k) &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = o(1), \quad x \rightarrow -\infty; \end{aligned} \quad (9.50)$$

если $\operatorname{Im} k < \beta_0$, то

$$\begin{aligned} e^{ikx} \tilde{f}^+(x, k) &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = o(1), \quad x \rightarrow +\infty, \\ e^{-ikx} \tilde{f}^-(x, k) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = o(1), \quad x \rightarrow -\infty. \end{aligned}$$

9.42. Вычислить определители $W[f^+, \tilde{f}^+]$, $W[f^-, \tilde{f}^-]$ при условии, что $k \in \{k: -\beta_0 < \text{Im } k < \beta_0\}$.

9.43. Доказать, что при $k \rightarrow \infty$ справедливы равномерные по x оценки

$$\begin{aligned} e^{-ikx} f^+(x, k) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + O\left(\frac{1}{k}\right), \\ e^{ikx} f^-(x, k) &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + O\left(\frac{1}{k}\right), \\ -\beta_0 &< \text{Im } k, \\ e^{ikx} \tilde{f}^+(x, k) &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + O\left(\frac{1}{k}\right), \\ e^{-ikx} \tilde{f}^-(x, k) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + O\left(\frac{1}{k}\right), \\ \text{Im } k &< \beta_0. \end{aligned}$$

9.44. Установить существование неособой матрицы S , где

$$S = \begin{pmatrix} b(k) & \tilde{a}(k) \\ a(k) & \tilde{b}(k) \end{pmatrix}, \quad (9.51)$$

называемой матрицей рассеяния, со свойствами:

1) $(f^- \tilde{f}^-) = (f^+ \tilde{f}^+) S$, т. е.

$$\begin{aligned} f^-(x, k) &= a(k) \tilde{f}^+(x, k) + b(k) f^+(x, k), \\ \tilde{f}^-(x, k) &= \tilde{b}(k) \tilde{f}^+(x, k) + \tilde{a}(k) f^+(x, k); \end{aligned} \quad (9.52)$$

2) $-\det S = a\tilde{a} - b\tilde{b} = 1$;

3) выполняются предельные соотношения

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f_1^- f_2^- = ab, \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \tilde{f}_1^- \tilde{f}_2^- = \tilde{a}\tilde{b}. \quad (9.53)$$

9.45. Заданы векторы-столбцы $p_j(x)$, $j = 1, 2$, компоненты которых $r_j(x)$, $q_j(x)$ принадлежат множеству функций (9.46). Установить следующие соотношения между потенциалами r_j , q_j и элементами матриц рассеяния S_j , $j = 1, 2$:

$$\begin{aligned} a_1 b_2 + a_2 b_1 &= \int_{-\infty}^{\infty} (p_1 + p_2)^\tau h \, d\xi, \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 &= \int_{-\infty}^{\infty} (\Lambda(p_2 - p_1))^\tau h \, d\xi, \end{aligned} \quad (9.54)$$

$$\begin{aligned}\tilde{b}_1 \tilde{a}_2 + \tilde{b}_2 \tilde{a}_1 &= \int_{-\infty}^{\infty} (p_1 + p_2)^\tau \tilde{h} d\xi, \\ \tilde{b}_1 \tilde{a}_2 - \tilde{b}_2 \tilde{a}_1 &= \int_{-\infty}^{\infty} (\Lambda(p_2 - p_1))^\tau \tilde{h} d\xi,\end{aligned}\tag{9.55}$$

где

$$h = \begin{pmatrix} f_1^- & g_1^- \\ f_2^- & g_2^- \end{pmatrix}, \quad \tilde{h} = \begin{pmatrix} \tilde{f}_1^- & \tilde{g}_1^- \\ \tilde{f}_2^- & \tilde{g}_2^- \end{pmatrix},$$

столбцы f и g — решения Йоста уравнений (9.44) $\mathcal{L}_j \psi = k\psi$ для $j = 1$ и $j = 2$ соответственно, матрица Λ была определена в примере 9.7.

9.46. Вывести формулы

$$\begin{aligned}W[f^-, f^+] &= a(k), & -\beta_0 < \operatorname{Im} k, \\ W[\tilde{f}^+, \tilde{f}^-] &= \tilde{a}(k), & \operatorname{Im} k < \beta_0, \\ \begin{cases} W[\tilde{f}^+, f^-] = b(k), \\ W[\tilde{f}^-, f^+] = \tilde{b}(k), \end{cases} & -\beta_0 < \operatorname{Im} k < \beta_0,\end{aligned}$$

и доказать, что функции $a(k)$, $\tilde{a}(k)$, $b(k)$, $\tilde{b}(k)$ аналитичны в указанных областях.

9.47. Доказать, что функции $a(k)$, $\tilde{a}(k)$, $b(k)$, $\tilde{b}(k)$ обладают следующими свойствами:

1) они выражаются через потенциалы и решения Йоста посредством интегральных соотношений

$$\begin{aligned}a(k) &= 1 + \int_{-\infty}^{\infty} q(\xi) f_2^-(\xi, k) e^{ik\xi} d\xi, & \operatorname{Im} k > \beta_0, \\ \tilde{a}(k) &= 1 + \int_{-\infty}^{\infty} r(\xi) \tilde{f}_1^-(\xi, k) e^{-ik\xi} d\xi, & \operatorname{Im} k < \beta_0, \\ \begin{cases} b(k) = \int_{-\infty}^{\infty} r(\xi) f_1^-(\xi, k) e^{-ik\xi} d\xi, \\ \tilde{b}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} q(\xi) \tilde{f}_2^-(\xi, k) e^{ik\xi} d\xi, \end{cases} & -\beta_0 < \operatorname{Im} k < \beta_0;\end{aligned}$$

2) при $k \rightarrow \infty$

$$a(k) = 1 + O\left(\frac{1}{k}\right), \quad -\beta_0 < \operatorname{Im} k,$$

$$\tilde{a}(k) = 1 + O\left(\frac{1}{k}\right), \quad \operatorname{Im} k < \beta_0,$$

$$\begin{cases} b(k) = O\left(\frac{1}{k^2}\right), \\ \tilde{b}(k) = O\left(\frac{1}{k^2}\right), \end{cases} \quad -\beta_0 < \operatorname{Im} k < \beta_0;$$

3) функции $a(k)$ и $\tilde{a}(k)$ имеют конечное число нулей в полуплоскостях $\operatorname{Im} k \geq 0$ и $\operatorname{Im} k \leq 0$ соответственно.

Пример 9.8. Прямая задача рассеяния для уравнения (9.43) состоит в определении функций $T(k) = 1/a(k)$, $\tilde{T}(k) = 1/\tilde{a}(k)$ и $R(k) = b(k)/a(k)$, $\tilde{R}(k) = \tilde{b}(k)/\tilde{a}(k)$ (коэффициенты прохождения и отражения соответственно), а также собственных значений и собственных функций оператора $\mathcal{L}$ (9.45):

$$\mathcal{L}\psi = k\psi, \quad -\infty < x < \infty,$$

$$(\psi, \psi) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi^\tau \bar{\psi} d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} (|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2) d\xi < \infty.$$

Пусть $k_j = \alpha_j + i\beta_j$, $j = 1, 2, \dots, N$, — нули функции $a(k)$, расположенные в полуплоскости $\operatorname{Im} k > 0$, а числа $\tilde{k}_j = \tilde{\alpha}_j + i\tilde{\beta}_j$, $j = 1, 2, \dots, \tilde{N}$ — нули $\tilde{a}(k)$, лежащие в полуплоскости $\operatorname{Im} k < 0$. Множество этих нулей и множество собственных значений совпадают. В самом деле, если $\tilde{k}_m = \tilde{\alpha}_m + i\tilde{\beta}_m$, $\tilde{\beta}_m < 0$, есть собственное значение оператора $\mathcal{L}$, то соответствующая собственная функция $\psi_m^-(x, \tilde{k}_m) = \tilde{a}_m \tilde{f}^-(x, \tilde{k}_m) + \tilde{c}_m \tilde{f}^-(x, \tilde{k}_m)$ принадлежит $L_2(\mathbb{R})$, если $\tilde{c}_m = 0$ (это вытекает из формул (9.50)). Таким образом, при $\tilde{a}_m = 1$ собственная функция $\psi_m^-(x, \tilde{k}_m) = \tilde{f}^-(x, \tilde{k}_m)$. С другой стороны, функция $\psi_m^-(x, k_m) = b_m \tilde{f}^+(x, k_m) + \tilde{d}_m \tilde{f}^+(x, k_m)$ принадлежит $L_2(\mathbb{R})$, если $\tilde{d}_m = 0$. Итак, $\psi_m^-(x, k_m) = \tilde{f}^-(x, k_m) = b_m \tilde{f}^+(x, k_m)$, откуда следует, что $W[\tilde{f}^-(x, k_m), \tilde{f}^+(x, k_m)] = \tilde{a}(k_m) = 0$ (задача 9.42). Обратно, если $\tilde{a}(\tilde{k}_m) = 0$, то $\tilde{f}^+(x, k_m)$ и $\tilde{f}^-(x, \tilde{k}_m)$ линейно зависимы, поэтому $b_m \tilde{f}^+(x, k_m) = \tilde{f}^-(x, \tilde{k}_m) = \psi_m^-(x, k_m) \in L_2(\mathbb{R})$, т. е. $\psi_m^-(x, k_m)$ — собственная функция, k_m — собственное

значение. Для $k_m = \alpha_m + i\beta_m$, $\beta_m > 0$, применимы такие же рассуждения. В этом случае собственной функцией является функция $\psi_m^+(x, k_m) = f^-(x, k_m) = b_m f^+(x, k_m)$. Так как вещественные k не являются собственными значениями, то доказательство завершено.

9.48. Если между потенциалами $r(x)$ и $q(x)$, входящими в оператор $\mathcal{L}$ (9.45), имеется зависимость, то число данных рассеяния уменьшается. Доказать, что:

1) если $r = -\bar{q}$, то $\tilde{a}(k) = \overline{a(\bar{k})}$, $\tilde{b}(k) = -\overline{b(\bar{k})}$, $\tilde{N} = N$, $\tilde{k}_j = \bar{k}_j$, $\tilde{b}_j = -\bar{b}_j$, $j = 1, 2, \dots, N$;

2) если $r = -q$, то $\tilde{a}(k) = a(-k)$, $\tilde{b}(k) = -b(-k)$, $\tilde{N} = N$, $\tilde{k}_j = -k_j$, $\tilde{b}_j = -b_j$, $j = 1, 2, \dots, N$;

3) если $r = -q$, $\bar{q} = q$, то свойства, приведенные в 1) и 2) дополняются следующими: $\overline{c(k)} = c(-k)$, где $c(k)$ — любой из четырех коэффициентов $a(k)$ и т. д., нули k_j , $\bar{k}_j$ расположены симметрично мнимой оси или на ней (если $\operatorname{Re} k_j = 0$, то числа b_j вещественные, если $k_{1,2} = \pm\alpha + i\beta$, то $b_1 = \bar{b}_2$).

9.49. Пусть $\mathcal{E}(\overline{\Delta})$, где $\overline{\Delta} = \{x, y: -\infty < x \leq y < \infty\}$ — множество функций

$$F(x, y) = \begin{pmatrix} F_1(x, y) \\ F_2(x, y) \end{pmatrix},$$

обладающих свойствами:

при любом $h \in \mathbb{R}$ функция $F(x, y) \rightarrow 0$ при $y \rightarrow \infty$ равномерно на $\overline{H} = [h; \infty)$,

интегралы

$$\int_x^\infty \left\| \frac{\partial^m F(x, y)}{\partial x^m} \right\| dy, \quad m = 0, 1,$$

сходятся равномерно на $\overline{H}$;

при любом $x \in \overline{H}$ сходится интеграл

$$\int_x^\infty \left\| \frac{\partial F(x, y)}{\partial y} \right\| dy.$$

Доказать, что существует единственная пара функций

$$K(x, y) = \begin{pmatrix} K_1(x, y) \\ K_2(x, y) \end{pmatrix}, \quad \tilde{K}(x, y) = \begin{pmatrix} \tilde{K}_1(x, y) \\ \tilde{K}_2(x, y) \end{pmatrix}$$

из $\mathcal{E}(\overline{\Delta})$, таких что

$$\begin{aligned} f^+(x, k) &= e^{ikx} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \int_x^\infty K(x, y) e^{iky} dy, \\ \tilde{f}^+(x, k) &= e^{-ikx} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \int_x^\infty \tilde{K}(x, y) e^{-iky} dy, \end{aligned} \quad (9.56)$$

$$K_1(x, x) = -\frac{1}{2}q(x), \quad \tilde{K}_2(x) = -\frac{1}{2}r(x). \quad (9.57)$$

Пример 9.9. Обратная задача рассеяния для системы уравнений (9.44) заключается в восстановлении потенциалов $q(x)$ и $r(x)$ по данным рассеяния s . Преобразование от s к q и r осуществляется с помощью интегральных уравнений ГЛМ. Их вывод будет сделан в предположении, что нули функций $a(k)$ и $\tilde{a}(k)$ простые и не лежат на вещественной оси. В этом случае данными рассеяния являются

$$\begin{aligned} R(k), \quad k_m \ (\text{Im } k_m > 0), \quad c_m &= -\frac{ib_m}{a'(k_m)}, \quad m = 1, 2, \dots, N, \\ \tilde{R}(k), \quad \tilde{k}_m \ (\text{Im } \tilde{k}_m < 0), \quad \tilde{c}_m &= \frac{i\tilde{b}_m}{\tilde{a}'(\tilde{k}_m)}, \quad m = 1, 2, \dots, \tilde{N}. \end{aligned}$$

Исходным пунктом вывода служат разложения (9.52). Если в первое разложение подставить f^+ и $\tilde{f}^+$ в форме (9.56) и записать результат в виде

$$\begin{aligned} T(k)f^-(x, k) - e^{-ikx} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} &= \int_x^\infty \tilde{K}(x, z) e^{-ikz} dz + \\ &+ R(k) e^{ikx} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + R(k) \int_x^\infty K(x, z) e^{ikz} dz, \end{aligned}$$

то после умножения на e^{iky} и интегрирования по k получится уравнение

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik(y-x)} \left[T(k) f^-(x, k) e^{ikx} - \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right] dk = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} e^{iky} dk \int_0^{\infty} \tilde{K}(x, z) e^{-ikz} dz + \int_{-\infty}^{\infty} R(k) e^{ik(y+x)} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} dk + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} R(k) e^{iky} dk \int_x^{\infty} K(x, z) e^{ikz} dz. \end{aligned}$$

Это уравнение после преобразований, аналогичных проделанным в примере 9.5, принимает форму одного из уравнений ГЛМ:

при $x < y$

$$\tilde{K}(x, y) + F(x + y) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \int_x^{\infty} K(x, z) F(z + y) dz = 0, \quad (9.58)$$

где

$$F(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(k) e^{ikx} dk + \sum_{j=1}^N c_j e^{ik_j x}.$$

Подобным же образом осуществляется вывод второго уравнения ГЛМ:

при $x < y$

$$K(x, y) + \tilde{F}(x + y) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \int_x^{\infty} \tilde{K}(x, z) \tilde{F}(z + y) dz = 0, \quad (9.59)$$

где

$$\tilde{F}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{R}(k) e^{-ikx} dk + \sum_{j=1}^{\tilde{N}} \tilde{c}_j e^{-i\tilde{k}_j x}.$$

Чтобы определить потенциалы $q(x)$ и $r(x)$, нужно найти решения K и $\tilde{K}$ системы интегральных уравнений ГЛМ (9.58), (9.59) и воспользоваться формулами (9.57).

Распространение полученных результатов на случай кратных нулей функций $a(k)$, $\tilde{a}(k)$ достигается посредством предельного перехода.

9.50. Показать, что:

1) если $r = -\bar{q}$, то $\tilde{K} = A^\tau \bar{K}$, $\tilde{R}(k) = -\overline{R(\bar{k})}$, $\tilde{N} = N$, $\tilde{c}_j = \bar{c}_j$, $j = 1, 2, \dots, N$, $\tilde{F} = -\bar{F}$;

2) если $r = -q$, то $\tilde{K} = A^\tau K$, $\tilde{R}(k) = -R(-k)$, $\tilde{N} = N$, $\tilde{c}_j = -c_j$, $j = 1, 2, \dots, N$, $\tilde{F} = -F$;

3) если $r = -q$ и $\bar{q} = q$, то к соотношениям п. 2 добавляются $\bar{K} = K$ и $\bar{F} = F$. Матрица A определена в примере 9.7.

9.51. Написать систему уравнений ГЛМ в следующих случаях:

1) $r = -\bar{q}$; 2) $r = -q$; 3) $r = -q$, $\bar{q} = q$.

9.52. Решить обратную задачу рассеяния для уравнения (9.44), если $R(k) = 0$ и: 1) $r = -\bar{q}$; 2) $r = -q$, $\bar{q} = q$.

Пример 9.10. МОЗР применим для решения задачи Коши вида

$$\begin{aligned} q_t &= \Phi_1((q), (r)), \\ r_t &= \Phi_2((q), (r)), \end{aligned} \quad (9.60)$$

$$q(x, 0) = q_0(x), \quad r(x, 0) = r_0(x), \quad (9.61)$$

где (q) и (r) — наборы функций и их частных производных по переменной x .

Реализация МОЗР основана на построении пары Лакса $(\mathcal{L} - \mathcal{A})$ (см. пример 9.6). Система (9.60) включает ряд актуальных нелинейных уравнений математической физики, для которых оператор $\mathcal{L}$ имеет структуру (9.45). Для этого оператора ставится спектральная задача

$$\mathcal{L}\psi = k\psi. \quad (9.62)$$

Линейный оператор $\mathcal{A}$, зависящий от (q) и (r) , определяет эволюцию во времени собственных функций оператора $\mathcal{L}$, т. е.

$$\psi_t = \mathcal{A}\psi, \quad (9.63)$$

и удовлетворяет уравнению Лакса

$$\mathcal{L}_t = [\mathcal{A}, \mathcal{L}], \quad (9.64)$$

которое должно быть эквивалентно системе (9.60). Условия (9.63), (9.64) обеспечивают изоспектральность оператора $\mathcal{L}$. Действительно, если тождество (9.62) продифференцировать по t ,

$$\mathcal{L}_t\psi + \mathcal{L}\psi_t = k_t\psi + k\psi_t,$$

подставить $\mathcal{L}_t = [\mathcal{A}, \mathcal{L}]$, $k\psi_t = k\mathcal{A}\psi = \mathcal{A}k\psi = \mathcal{A}\mathcal{L}\psi$, то получится соотношение $[\mathcal{A}, \mathcal{L}]\psi = k_t + [\mathcal{A}, \mathcal{L}]\psi$, откуда $k_t = 0$.

Решение задачи Коши (9.60), (9.61) осуществляется по следующей схеме.

1. Прямая задача рассеяния: $q(x, 0), r(x, 0) \rightarrow s(0)$ (решение уравнения (9.62)).

2. Эволюция во времени данных рассеяния: $s(0) \rightarrow s(t)$ (решение уравнения (9.63)).

3. Обратная задача рассеяния: $s(t) \rightarrow r(x, t)$ (решение системы уравнений ГЛМ (9.53), (9.54)).

Оператор $\mathcal{A}$, удовлетворяющий уравнению (9.64), представляет собой матрицу (2×2) . Для решения уравнений мКдФ, СГ и НУШ достаточно ограничиться матрицей вида

$$\mathcal{A} = \begin{pmatrix} U & V \\ W & -U \end{pmatrix}. \quad (9.65)$$

Операторное равенство (9.64) $\mathcal{A}\mathcal{L}\psi - \mathcal{L}\mathcal{A}\psi = \mathcal{L}_t\psi$ можно преобразовать к виду

$$([\Lambda(ikI + B), \mathcal{A}] + \mathcal{A}_x + \Lambda B_t)\psi = 0, \quad (9.66)$$

если учесть, что (см. (9.47))

$$\mathcal{L}\psi = k\psi, \quad \mathcal{L} = iD\Lambda + iB, \quad \psi_x = -\Lambda B\psi - ik\Lambda\psi.$$

Достаточным условием обращения в нуль левой части уравнения (9.66) является равенство нулю коэффициентов при ψ_1 и ψ_2 , т. е.

$$\begin{cases} U_x + rV - qW = 0, \\ V_x + 2qU + 2ikV - q_t = 0, \\ W_x - 2rU - 2ikW - r_t = 0. \end{cases} \quad (9.67)$$

Если считать k независимым параметром, принимающим произвольные значения (как большие, так и малые), то можно отыскивать частные решения системы (9.67) в виде разложений по степеням k (как положительным, так и отрицательным). Пусть

$$\begin{aligned} U &= U_0 + U_1k + U_2k^2, \\ V &= V_0 + V_1k + V_2k^2, \\ W &= W_0 + W_1k + W_2k^2. \end{aligned} \quad (9.68)$$

Величины $U_0, \dots, W_2$ определяются из условия равенства нулю коэффициентов при степенях k в тождествах, которые получаются подстановкой разложений (9.68) в систему (9.67). Коэффициент при k^3 обратится в нуль, если $V_2 = W_2 = 0$. Коэффициент при k^2 окажется равным нулю, если $U_{2x} = 0$, т. е. $U_2 = c_2$,

$V_1 = iqc_2$, $W_1 = irc_2$. Из равенства нулю коэффициента при k вытекает, что $U_{1x} = 0$, откуда $U_1 = c_1$, $V_0 = -\frac{1}{2}c_2q_x + ic_1q$, $W_0 = \frac{1}{2}c_2r_x + ic_1r$. Свободный член будет аннулирован при условии $U_{0x} = \frac{1}{2}c_2(qr)_x$, т. е. $U_0 = \frac{1}{2}c_2qr + c_0$,

$$\begin{aligned} q_t + \frac{1}{2}c_2q_{xx} - ic_1q_x - c_2q^2r - 2c_0q &= 0, \\ r_t - \frac{1}{2}c_2r_{xx} - ic_1r_x + c_2qr^2 + 2c_0r &= 0. \end{aligned} \quad (9.69)$$

Уравнения (9.69) представляют собой одну из реализаций системы (9.60). В частном случае $r = \pm\bar{q}$ система (9.69) совместна при условиях $\bar{c}_i = -c_i$, $i = 0, 1, 2$. Если $c_0 = c_1 = 0$, $c_2 = -2i$, то получается нелинейное уравнение Шредингера

$$iq_t + q_{xx} \pm 2q|q|^2 = 0,$$

которому соответствует оператор $\mathcal{A}$

$$\mathcal{A} = \begin{pmatrix} \pm i|q|^2 - 2ik^2 & iq_x + 2qk \\ \pm i\bar{q}_x \mp 2\bar{q}k & \mp i|q|^2 + 2ik^2 \end{pmatrix}.$$

В отличие от пары Лакса для уравнения КдФ в данном случае $\mathcal{L}$ и $\mathcal{A}$ — матричные операторы, оператор $\mathcal{L}$ в общем случае неэрмитов, оператор $\mathcal{A}$ — неантисимметричный, недифференциальный, может зависеть от k .

9.53. Построить пару Лакса для: 1) модифицированного уравнения мКдФ $q_t \pm 6qq^2 + q_{xxx} = 0$; 2) СГ (9.4).

9.54. Определить зависимость от переменной t данных рассеяния спектральной задачи (9.62) в тех случаях, когда система эволюционных уравнений (9.64) сводится к: 1) уравнению мКдФ (9.2); 2) НУШ (9.3); 3) уравнению СГ (9.4) при условии $\lim_{|x| \rightarrow \infty} u(x, t) = 0 \pmod{2\pi}$.

9.55. Построить односолитонное решение НУШ (9.3); определить скорость v_0 и амплитуду u_0 солитона.

9.56. Найти односолитонное решение уравнения мКдФ (9.2); каковы скорость v_0 и амплитуда u_0 солитона?

9.57. Построить решение $u(x, t)$ задачи Коши для уравнения мКдФ (9.2), если потенциалу $u(x, 0)$ соответствуют следующие данные рассеяния:

$$s(0) = \{R(k, 0) = 0, i\beta_1, i\beta_2, c_1(0), c_2(0)\}, \quad 0 < \beta_1 < \beta_2,$$

где $i\beta_{1,2}$ — простые нули функции $a(k)$. Доказать, что решение состоит из двух солитонов, взаимодействующих друг с другом упругим образом. Найти сдвиг фаз солитонов в результате взаимодействия.

9.58. Найти решение $u(x, t)$ задачи Коши для уравнения мКдФ (9.2), если потенциалу $u(x, 0)$ соответствуют данные рассеяния

$$s(0) = \{R(k, 0) = 0, k_1, k_2, c_1(0), c_2(0)\},$$

где $k_1 = \alpha + i\beta$ — простой нуль функции $a(k)$, $\alpha > 0$, $\beta > 0$. Показать, что $u(x, t)$ — осциллирующая функция с солитонной огибающей (бризер). Найти фазовую скорость бризера и скорость солитонной огибающей.

9.59. Найти решение уравнения СГ (9.4), соответствующее данным рассеяния

$$s(0) = \{R(k, 0) = 0, i\beta, c(0)\}, \beta > 0,$$

где $i\beta$ — простой нуль функции $a(k)$, если:

$$\begin{aligned} 1) \quad & \lim_{x \rightarrow -\infty} u(x, t) = 0, \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} u(x, t) = 2\pi, \\ 2) \quad & \lim_{x \rightarrow -\infty} u(x, t) = 2\pi, \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} u(x, t) = 0. \end{aligned}$$

Убедиться в том, что при фиксированном t функция $u(x, t)$ в первом случае монотонно возрастает (кинк), во втором — монотонно убывает (антикинк); в обоих случаях u_x представляет собой уединенную волну (солитон).

9.60. Построить решение $u(x, t)$ уравнения СГ (9.4), соответствующее данным рассеяния

$$s(0) = \{R(k, 0) = 0, i\beta_1, i\beta_2, c_1(0), c_2(0)\}, 0 < \beta_1 < \beta_2,$$

где $i\beta_{1,2}$ — простые нули функции $a(k)$, при дополнительном условии $\lim_{|x| \rightarrow \infty} u(x, t) = 0$. Доказать, что решение представляет собой суперпозицию (нелинейную) двух кинков, которые взаимодействуют друг с другом упругим образом.

9.61. Записать решение задачи 9.60 при условии $4\beta_1\beta_2 = 1$ в переменных $\xi = x + t$, $\tau = x - t$; рассмотреть случай кратного нуля $\beta_1 = \beta_2 = \frac{1}{2}$.

9.62. Найти решение уравнения СГ (9.4) при дополнительном условии $\lim_{|x| \rightarrow \infty} u(x, t) = 0$, соответствующее данным рассеяния

$$s(0) = \{R(k, 0) = 0, k_1, k_2, c_1(0), c_2(0)\}, k_1 = \alpha + i\beta,$$

где k_1 — простой нуль функции $a(k)$, $\alpha > 0$, $\beta > 0$. Показать, что решение представляет собой пульсирующий солитон (бризер). Записать решение в переменных $\xi = x + t$, $\tau = x - t$ и рассмотреть случай $|k_1| = 1/2$.

9.63. Доказать, что уравнения $u_t - 6u^2u_x + u_{xxx} = 0$ (мКдФ) и $iu_t + u_{xx} - 2u|u|^2 = 0$ (НУШ) не имеют солитонных решений.

9.2. Метод преобразований Бэклунда

Пример 9.11. Пусть $D(u)$ и $E(u)$ — дифференциальные уравнения с частными производными,

$$B_j((u), (v), (k)) = 0, j = 1, 2, \dots, m, \quad (9.70)$$

— соотношения, в которых (u) , (v) наборы функций и их производных, (k) — набор параметров. Соотношения (9.70) называются преобразованиями Бэклунда (ПБ), если:

1) они отображают $D(u) = 0$ в $E(v) = 0$ (т. е.: если u — решение уравнения $D(u) = 0$, то v — решение уравнения $E(v) = 0$) и наоборот;

2) при условии $D(u) = 0$ ($E(v) = 0$) из них можно найти решение уравнения $E(v) = 0$ ($D(u) = 0$).

ПБ, связывающие решения одного и того же уравнения, называются автопреобразованиями Бэклунда (АПБ).

Уравнения мКдФ, СГ и НУШ — частные случаи системы (9.60). Благодаря этому возможен единый подход к построению АПБ для этой группы уравнений, суть которого заключается в установлении соответствия между решениями $p_1 = (r_1, q_1)^T$ и $p_2 = (r_2, q_2)^T$ системы (9.60) и данными рассеяния для уравнения (9.44) $\mathcal{L}_j \psi = k\psi$ с потенциалами $q_j, r_j, j = 1, 2$. Плодотворность подобного метода объясняется следующим фактом: если спектр оператора $\mathcal{L}_2$ отличается от спектра оператора $\mathcal{L}_1$ конечным числом собственных значений, что достаточно просто задать в терминах данных рассеяния, то решение p_2 получается из решения p_1 добавлением солитонных решений.

Отправной точкой построения АПБ служат равенства (9.54) и (9.55). Здесь удобно ввести билинейную форму

$$(p, h) = \int_{-\infty}^{\infty} p^{\tau}(\xi, t) h(\xi, t, k) d\xi \quad (9.71)$$

и переписать указанные равенства, придав им вид

$$\begin{aligned} a_1 a_2 (R_2 + R_1) &= (p_2 + p_1, h), \\ a_1 a_2 (R_2 - R_1) &= (\Lambda(p_2 - p_1), h), \\ \tilde{a}_1 \tilde{a}_2 (\tilde{R}_2 + \tilde{R}_1) &= (p_2 + p_1, \tilde{h}), \\ \tilde{a}_1 \tilde{a}_2 (\tilde{R}_2 - \tilde{R}_1) &= -(\Lambda(p_2 + p_1), \tilde{h}). \end{aligned} \quad (9.72)$$

В последующих преобразованиях используется матричный интегро-дифференциальный оператор. Он возникает, если произведения $f_1^- g_2^-$, $f_2^- g_1^-$ в форме (9.144) (см. решение задачи 9.45) внести в правую часть (9.142) и употребить матричную запись

$$\mathcal{Z}h = kh, \quad (9.73)$$

в которой

$$\mathcal{Z} = \frac{1}{2i} \begin{pmatrix} -D + \int_{-\infty}^x d\xi q^{\tau}(x, t) r(\xi, t) & \int_{-\infty}^x d\xi q^{\tau}(x, t) \Sigma q(\xi, t) \\ - \int_{-\infty}^x d\xi r^{\tau}(x, t) \Sigma r(\xi, t) & D - \int_{-\infty}^x d\xi r^{\tau}(x, t) q(\xi, t) \end{pmatrix},$$

где $q^{\tau} = (q_1, q_2)$, $r^{\tau} = (r_1, r_2)$, матрица Σ определена в примере 9.7. Сопряженный оператор $\mathcal{Z}^*$ вводится посредством билинейной формы (9.71)

$$(\mathcal{Z}^* p, h) = (p, \mathcal{Z}h) \quad (9.74)$$

и представляет собой матрицу

$$\mathcal{Z}^* = \frac{1}{2i} \begin{pmatrix} D + \int_x^{\infty} d\xi r^{\tau}(x, t) q(\xi, t) & - \int_x^{\infty} d\xi r^{\tau}(x, t) \Sigma r(\xi, t) \\ \int_x^{\infty} d\xi q^{\tau}(x, t) \Sigma q(\xi, t) & -D - \int_x^{\infty} d\xi q^{\tau}(x, t) r(\xi, t) \end{pmatrix}.$$

Техника его построения сводится к интегрированию по частям. Так как $\mathcal{Z}$ можно представить суммой матриц, в каждой из которых лишь один элемент отличен от нуля, то достаточно

рассмотреть частный случай оператора

$$\mathcal{Z} = \frac{1}{2i} \begin{pmatrix} q_1(x, t) \int_{-\infty}^x d\xi r_1(\xi, t) & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Построение $\mathcal{Z}^*$ состоит в преобразовании билинейной формы

$$\begin{aligned} (p, \mathcal{Z}h) &= \int_{-\infty}^{\infty} p^\tau \mathcal{Z}h d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} p_1 \mathcal{Z}_{11} h_1 d\xi = \\ &= \frac{1}{2i} \int_{-\infty}^{\infty} p_1(\xi, t) q_1(\xi, t) d\xi \int_{-\infty}^{\xi} r_1(s, t) h_1(s, t, k) ds = \\ &= \frac{1}{2i} \int_{-\infty}^{\infty} \left(-\frac{d}{d\xi} \int_{\xi}^{\infty} p_1(\eta, t) q_1(\eta, t) d\eta \right) d\xi \int_{-\infty}^{\xi} r_1(s, t) h_1(s, t, k) ds = \\ &= -\frac{1}{2i} \int_{\xi}^{\infty} p_1(\eta, t) q_1(\eta, t) d\eta \int_{-\infty}^{\xi} r_1(s, t) h_1(s, t, k) ds \Big|_{\xi=-\infty}^{\xi=\infty} + \\ &+ \frac{1}{2i} \int_{-\infty}^{\infty} r_1(\xi, t) h_1(\xi, t, k) d\xi \int_{\xi}^{\infty} p_1(\eta, t) q_1(\eta, t) d\eta = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} h_1 \mathcal{Z}_{11}^* p_1 d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} (\mathcal{Z}^* p)^\tau h d\xi = (\mathcal{Z}^* p, h). \end{aligned}$$

Пусть $\omega(k)$ — произвольный многочлен. Исходя из соотношений (9.72) можно составить комбинации

$$\begin{aligned} a_1 a_2 [R_2 - R_1 + \omega(k)(R_2 + R_1)] &= \\ &= (\Lambda(p_2 - p_1), h) + (p_2 + p_1, \omega(k)h), \\ -\tilde{a}_1 \tilde{a}_2 [\tilde{R}_2 - \tilde{R}_1 - \omega(k)(\tilde{R}_2 + \tilde{R}_1)] &= \\ &= \left(\Lambda(p_2 - p_1), \tilde{h} \right) + \left(p_2 + p_1, \omega(k)\tilde{h} \right). \end{aligned}$$

Теперь вступают в действие формулы (9.73) и (9.74), с помощью которых последние два выражения преобразуются к виду

$$\begin{aligned} a_1 a_2 [R_2 - R_1 + \omega(k)(R_2 + R_1)] &= \\ &= (\Lambda(p_2 - p_1) + \omega(\mathcal{Z}^*)(p_2 + p_1), h), \quad (9.75) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\tilde{a}_1\tilde{a}_2 \left[\tilde{R}_2 - \tilde{R}_1 - \omega(k)(\tilde{R}_2 + \tilde{R}_1) \right] + \\
& + \left(\Lambda(p_2 - p_1) + \omega(\mathcal{Z}^*)(p_2 + p_1, \tilde{h}) \right). \quad (9.76)
\end{aligned}$$

Такая форма записи подсказывает достаточные условия, при которых соотношения (9.75)–(9.76) удовлетворяются тождественно по k при любом многочлене $\omega(k)$:

$$\Lambda(p_2 - p_1) + \omega(\mathcal{Z}^*)(p_1 + p_2) = 0, \quad (9.77)$$

$$R_2 - R_1 + \omega(k)(R_2 + R_1) = 0,$$

$$\tilde{R}_2 - \tilde{R}_1 - \omega(k)(\tilde{R}_2 + \tilde{R}_1) = 0,$$

или

$$R_2 = \frac{1 - \omega(k)}{1 + \omega(k)} R_1, \quad \tilde{R}_2 = \frac{1 + \omega(k)}{1 - \omega(k)} \tilde{R}_1. \quad (9.78)$$

Соотношение (9.77) имеет структуру (9.70). Из-за отсутствия производных по t из него нельзя определить однозначно одну из функций, задавшись другой. Чтобы иметь полную систему АПБ, нужно построить еще одно соотношение типа (9.70), содержащее производные по t . Для решения этой задачи привлекается система (9.60).

Наиболее простая форма АПБ (9.77) соответствует линейной функции $\omega(k) = \alpha k + \beta$. Если распорядиться коэффициентами α и β так, чтобы

$$\frac{\omega - 1}{\omega + 1} = \frac{k - \tilde{k}_1}{k - k_1}, \quad \text{т. е. } \omega = \frac{2k - (k_1 + \tilde{k}_1)}{\tilde{k}_1 - k_1},$$

где $\text{Im } k_1 > 0$, $\text{Im } \tilde{k}_1 < 0$, k_1 и $\tilde{k}_1$ не являются ни полюсами, ни нулями функций $R_{1,2}$ и $\tilde{R}_{1,2}$ соответственно, то

$$R_2 = -\frac{k - \tilde{k}_1}{k - k_1} R_1, \quad \tilde{R}_2 = -\frac{k - k_1}{k - \tilde{k}_1} \tilde{R}_1. \quad (9.79)$$

Следовательно, спектр оператора $\mathcal{L}_2$ будет отличаться от спектра оператора $\mathcal{L}_1$ двумя дополнительными собственными значениями k_1 и $\tilde{k}_1$. Итак, выбор линейной функции $\omega(k)$ фиксирует АПБ (см. (9.77)):

$$(q_1 + q_2)_x + (q_1 - q_2) \int_x^\infty (q_1 r_1 - q_2 r_2) d\xi + 2i(k_1 q_1 + \tilde{k}_1 q_2) = 0, \quad (9.80)$$

$$(r_1 + r_2)_x + (r_1 - r_2) \int_x^\infty (q_1 r_1 - q_2 r_2) d\xi - 2i(\tilde{k}_1 r_1 + k_1 r_2) = 0. \quad (9.81)$$

9.64. Доказать коммутативность АПБ (9.80), (9.81): если к решению p_0 системы (9.60) последовательно применить АПБ с параметрами $k_1, \tilde{k}_1$ и $k_2, \tilde{k}_2$, то результат не зависит от порядка преобразований (рис. 9.1)¹⁾.

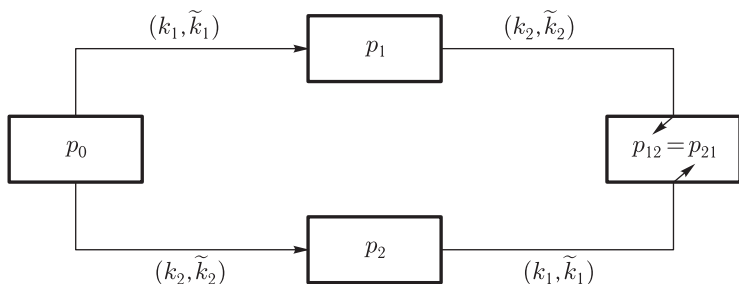


Рис. 9.1

9.65. Показать, что при $r = -q$, $\bar{q} = q$ АПБ (9.80), (9.81) преобразуются к виду

$$(w_1 + w_2)_x = 2ik \sin(w_1 - w_2), \quad (9.82)$$

где

$$w_i = \int_x^\infty q_i d\xi, \quad i = 1, 2,$$

— потенциальные функции решений.

9.66. При $r = -q$, $\bar{q} = q$ установить формулу, выражающую принцип нелинейной суперпозиции

$$(k_2 - k_1) \operatorname{tg} \frac{w - w_0}{2} = (k_1 + k_2) \operatorname{tg} \frac{w_1 - w_2}{2}, \quad (9.83)$$

где w_0, w_1, w_2, w — потенциальные функции решений (см. задачу 9.65), связанных между собой АПБ по схеме, изображенной на рис 9.1.

9.67. Построить АПБ для уравнения мКдФ (9.2) в следующей форме:

$$\begin{aligned} (w_1 + w_2)_x - 2ik \sin(w_1 - w_2) &= 0, \\ (w_1 - w_2)_t + 2(w_{1x}^3 - w_{2x}^3) + (w_1 - w_2)_{xxx} &= 0. \end{aligned} \quad (9.84)$$

¹⁾ Диаграмма из [55]

9.68. Найти односолитонное решение уравнения мКдФ (9.2) исходя из АПБ (9.84).

9.69. Используя принцип нелинейной суперпозиции (9.83), решить задачи 9.57, 9.58.

9.70. Показать, что АПБ для уравнения СГ (9.4) могут быть представлены в форме

$$\left(\frac{u_1 + u_2}{2}\right)_x = 2ik \sin \frac{u_1 - u_2}{2}, \quad (9.85)$$

$$\left(\frac{u_1 - u_2}{2}\right)_t = \frac{1}{2ik} \sin \frac{u_1 + u_2}{2}. \quad (9.86)$$

9.71. Решить задачу 9.59, применяя АПБ (9.85), (9.86).

9.72. Применяя принцип нелинейной суперпозиции (9.83), решить задачи 9.60, 9.62.

9.73. Найти решение $u(x, t)$ уравнения СГ (9.4), соответствующее собственному значению $k = i\beta$ кратности 2 при условии $\lim_{|x| \rightarrow \infty} u(x, t) = 0$.

9.74. Построить АПБ для уравнения $u_{xx} + u_{yy} = \sin u$ и найти однокинковое решение, удовлетворяющее условиям $u(\infty, y) = 2\pi$, $u(-\infty, y) = 0$.

9.75. Найти регулярное и сингулярное односолитонные решения НУШ (9.3), применяя АПБ для этого уравнения.

9.76. Построить АПБ, связывающие два решения u_1 и u_2 уравнения КдФ (9.1), в форме

$$\begin{aligned} (w_1 + w_2)_x - (w_1 - w_2)^2 + k^2 &= 0, \\ (w_1 - w_2)_t - 6(w_{1x}^2 - w_{2x}^2) + (w_1 - w_2)_{xxx} &= 0, \end{aligned} \quad (9.87)$$

где $u_i = -2w_{ix}$, $i = 1, 2$.

9.77. Применяя АПБ (9.87), построить регулярное и сингулярное односолитонные решения уравнения КдФ.

9.78. Доказать коммутативность АПБ для уравнения КдФ: если решение u_0 преобразовать последовательным применением АПБ с параметрами k_1 и k_2 , то результирующее решение не зависит от порядка преобразований (рис. 9.2).

9.79. Пусть u_0 , u_1 , u_2 , u — решения уравнения КдФ, связанные между собой АПБ по схеме, изображенной на рис. 9.2. Доказать,

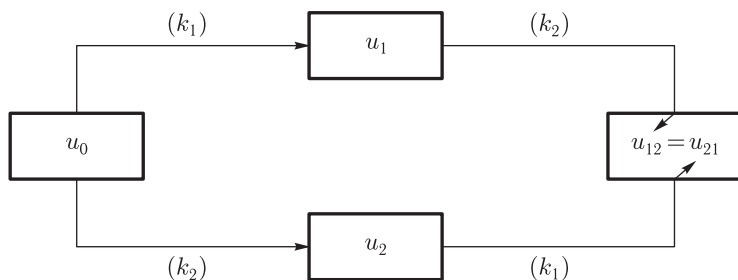


Рис. 9.2

что потенциальная функция w (см. задачу 9.65) выражается через остальные по формуле (принцип нелинейной суперпозиции)

$$(w - w_0)(w_2 - w_1) = k_2^2 - k_1^2. \quad (9.88)$$

9.80. Найти двухсолитонное решение уравнения КдФ (9.1), применяя нелинейный принцип суперпозиции (9.40).

9.81. Построить односолитонное решение (регулярное и сингулярное) уравнения (9.43), применяя АПБ для этого уравнения.

9.82. Известно, что $u(x, t)$ и $v(x, t)$ — решения уравнений КдФ (9.1) и мКдФ ($v_t + 6\sigma v_2 v_x + v_{xxx} = 0$), где $\sigma = \pm 1$. 1) Показать, что при определенных α и β имеется зависимость $u = \alpha v^2 + \beta v_x$ (преобразование Миуры). 2) Построить ПБ, связывающие решения u и v уравнений КдФ и мКдФ. 3) Найти решение уравнения мКдФ, если $u = 0$.

9.83. Подстановка Коула–Хопфа $u = -2\nu v_x / v$ преобразует решение уравнения Бюргерса $u_t + uu_x - \nu u_{xx} = 0$, $\nu > 0$, в решение уравнения теплопроводности $v_t = \nu v_{xx}$. Доказать это утверждение и построить ПБ, связывающие решения приведенных уравнений.

9.84. Решить задачу Коши для уравнения Бюргерса

$$u_t + uu_x - \nu u_{xx} = 0, \quad -\infty < x < \infty, \quad 0 < t, \\ u(x, 0) = u_0(x).$$

9.85. Доказать, что соотношения

$$v_x = u_x + \frac{2k}{\alpha} e^{\frac{\alpha}{2}(u+v)}, \quad (9.89)$$

$$v_t = -u_t - \frac{1}{k} e^{\frac{\alpha}{2}(u-v)}, \quad (9.90)$$

где k — произвольный параметр, являются ПБ для уравнения Лиувилля

$$u_{xt} = e^{\alpha u} \quad (9.91)$$

и волнового уравнения $u_{xt} = 0$.

9.86. Применяя ПБ (9.89), (9.90), найти общее решение уравнения Лиувилля (9.91).

9.3. Метод Хироты

Пример 9.12. В методе Хироты [84] используется линейный дифференциальный оператор, действующий на упорядоченную пару функций $a(x, t)$ и $b(x, t)$ по правилу

$$D_x^m D_t^n a \cdot b = \left(\frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x'} \right)^m \left(\frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t'} \right)^n a(x, t) b(x', t') \Big|_{x'=x, t'=t}. \quad (9.92)$$

Оператор (9.92) обладает следующими свойствами:

$$D_x^m a \cdot 1 = \frac{\partial^m a}{\partial x^m}, \quad (9.93)$$

$$D_x^m a \cdot b = (-1)^m D_x^m b \cdot a, \quad (9.94)$$

$$D_x^{2m+1} a \cdot a = 0, \quad (9.95)$$

$$D_x^m a \cdot b = D_x^{m-1} (a_x \cdot b - a \cdot b_x), \quad (9.96)$$

$$D_x^{2m} a \cdot a = 2 D_x^{2m-1} a_x \cdot a, \quad (9.96)$$

$$D_x D_t a \cdot a = 2 D_x a_t \cdot a = 2 D_t a_x \cdot a,$$

$$D_x^m e^{k_1 x} \cdot e^{k_2 x} = (k_1 - k_2)^m e^{(k_1 + k_2)x}. \quad (9.97)$$

Все эти свойства являются непосредственным следствием определения и доказываются по единой схеме.

Доказательство свойства (9.93):

$$D_x^m a \cdot 1 = \left(\frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x'} \right)^m a(x, t) \Big|_{x'=x} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \right)^m a(x, t) = \frac{\partial^m a}{\partial x^m}.$$

Доказательство свойства (9.94):

$$\begin{aligned} D_x^m f_1 \cdot f_2 &= \left(\frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x'} \right)^m f_1(x) f_2(x') \Big|_{x'=x} = \\ &= \sum_{s=0}^m C_m^s (-1)^{m-s} f_1^{(s)}(x) f_2^{(m-s)}(x) = \\ &= \sum_{s=0}^m C_m^s (-1)^{m-s} k_1^s k_2^{m-s} f_1(x) f_2(x) = (k_1 - k_2)^m f_1(x) f_2(x). \end{aligned}$$

Доказательство свойства (9.97). Пусть $f_j = \exp(k_j x)$, где $j = 1, 2$, тогда

$$\begin{aligned} D_x^m f_1 \cdot f_2 &= \left(\frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x'} \right)^m f_1(x) f_2(x')|_{x'=x} = \\ &= \sum_{s=0}^m C_m^s (-1)^{m-s} f_1^{(s)}(x) f_2^{(m-s)}(x) = \\ &= \sum_{s=0}^m C_m^s (-1)^{m-s} k_1^s k_2^{m-s} f_1(x) f_2(x) = (k_1 - k_2)^m f_1(x) f_2(x). \end{aligned}$$

Для доказательства этого свойства можно применить также метод математической индукции.

9.87. Задан многочлен $P(\alpha, \beta)$ относительно α и β ; показать, что

$$\begin{aligned} P(D_x, D_t) e^{\eta_1} \cdot e^{\eta_2} &= P(k_1 - k_2, \omega_1 - \omega_2) e^{\eta_1 + \eta_2} = \\ &= \frac{P(k_1 - k_2, \omega_1 - \omega_2)}{P(k_1 + k_2, \omega_1 + \omega_2)} e^{\eta_1 + \eta_2} \cdot 1, \end{aligned} \quad (9.98)$$

где $\eta_j = k_j x + \omega_j t + \delta_j$, $j = 1, 2$.

9.88. Дан многочлен

$$P(x_1, x_2) = x_1 x_2 + x_1^4. \quad (9.99)$$

Установить тождества

$$\begin{aligned} P(D_x, D_t) e^{\eta_1} \cdot e^{\eta_2} &= -P(D_x, D_t) e^{\eta_1 + \eta_2 + A_{12}} \cdot 1, \\ p_{123} P(D_x, D_t) e^{\eta_1 + \eta_2 + A_{12}} \cdot e^{\eta_3} &= \\ &= -P(D_x, D_t) e^{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + A_{12} + A_{23} + A_{31}} \cdot 1, \end{aligned} \quad (9.100)$$

где

$$\eta_i = k_i x - k_i^3 t + \delta_i, \quad A_{ij} = 2 \ln \left| \frac{k_i - k_j}{k_i + k_j} \right|, \quad i, j = 1, 2, 3,$$

$p_{123} a_{123} = (a_{123} + a_{231} + a_{312})$ — оператор циклической перестановки и суммирования.

9.89. Разложение функции $a(x)$ в ряд Тэйлора можно записать в виде (см. (9.93))

$$a(x + \varepsilon) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{a^{(m)}(x) \varepsilon^m}{m!} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\varepsilon^m}{m!} D_x^m a \cdot 1 e^{\varepsilon D_x} a \cdot 1.$$

В связи с этим вводится (по определению) оператор

$$e^{\varepsilon D_x} a \cdot b = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\varepsilon^m}{m!} D_x^m a \cdot b. \quad (9.101)$$

Показать, что

$$e^{\varepsilon D_x} a \cdot b = a(x + \varepsilon) b(x - \varepsilon). \quad (9.102)$$

9.90. Пусть $D_j = \varepsilon_j D_x + \delta_j D_t$, $j = 1, 2, 3$, где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \delta_3$ — константы. Установить тождество

$$\begin{aligned} e^{D_1} (e^{D_2} a \cdot b) \cdot (e^{D_3} c \cdot d) = \\ = e^{\frac{1}{2}(D_2 - D_3)} \left(e^{\frac{1}{2}(D_2 + D_3) + D_1} a \cdot d \right) \left(e^{\frac{1}{2}(D_2 + D_3) - D_1} c \cdot b \right), \end{aligned} \quad (9.103)$$

которое называется формулой обмена (b и d меняются местами с a и c).

9.91. Пусть

$$D_z = \varepsilon D_x + \delta D_t, \quad \frac{\partial}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial t}{\partial t x} + \delta \frac{\partial}{\partial t}, \quad (9.104)$$

где ε и δ — константы. Доказать, что

$$e^{\gamma \frac{\partial}{\partial z}} \frac{G}{F} = \frac{e^{\gamma D_z} G \cdot F}{(\text{ch } \gamma D_z) F \cdot F}, \quad (9.105)$$

где $\exp \left(\gamma \frac{\partial}{\partial z} \right) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\gamma^m}{m!} \frac{\partial^m}{\partial z^m}$.

9.92. Для преобразования нелинейных уравнений применяются формулы, связывающие операторы $\frac{\partial}{\partial x}$ и D_x . Доказать, что:

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{a}{b} = \frac{1}{b^2} D_x a \cdot b, \quad (9.106)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{a}{b} = \frac{1}{b^2} D_x^2 a \cdot b - \frac{a}{b^3} D_x^2 b \cdot b, \quad (9.107)$$

$$\frac{\partial^3}{\partial x^3} \frac{a}{b} = \frac{1}{b^2} D_x^3 a \cdot b - \frac{3}{b^4} (D_x a \cdot b) (D_x^2 b \cdot b), \quad (9.108)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4}{\partial x^4} \frac{a}{b} = \frac{1}{b^2} D_x^4 a \cdot b - \frac{6}{b^4} (D_x^2 a \cdot b) (D_x^2 b \cdot b) + \\ + \frac{6a}{b^5} (D_x^2 b \cdot b)^2 - \frac{a}{b^3} D_x^4 b \cdot b. \end{aligned} \quad (9.109)$$

9.93. Разложение обеих частей формулы обмена (9.103) в степенные ряды по $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \delta_3$ и приравнивание коэффициентов

при одинаковых степенях позволяет получать различные операторные тождества. Доказать, что

$$(D_x^2 a \cdot b)cd - ab(D_x^2 c \cdot d) = D_x [(D_x a \cdot d) \cdot cb + ad \cdot (D_x c \cdot b)], \quad (9.110)$$

$$(D_x D_t f \cdot f)gg - ff(D_x D_t g \cdot g) = 2D_x (D_t f \cdot g) \cdot fg, \quad (9.111)$$

$$(D_x D_t f \cdot g)gg - fg(D_x D_t g \cdot g) = D_x (D_t f \cdot g) \cdot gg, \quad (9.112)$$

$$\begin{aligned} (D_x^4 f \cdot f)gg - ff(D_x^4 g \cdot g) = \\ = 2D_x [(D_x^3 f \cdot g) \cdot fg - 3(D_x^2 f \cdot g) \cdot (D_x f \cdot g)]. \end{aligned} \quad (9.113)$$

9.94. Свойство (9.102) при $x = n \in \mathbb{Z}$, $\varepsilon = s \in \mathbb{Z}$, записанное в виде

$$e^{sD_n} a_n \cdot b_n = a_{n+s} b_{n-s}, \quad (9.114)$$

где введены обозначения $a_n = a(n)$, $b_n = b(n)$, является определением оператора $\exp(sD_n)$, действующего на функции a_n , b_n целочисленного аргумента. Доказать, что

$$\begin{aligned} e^{\pm D_n} a_n \cdot 1 &= a_{n \pm 1}, & e^{\pm D_n} 1 \cdot a_n &= a_{n \mp 1}, \\ \operatorname{ch} D_n a_n \cdot b_n &= \frac{1}{2}(a_{n+1} b_{n-1} + a_{n-1} b_{n+1}). \end{aligned}$$

9.95. Для оператора, определенного в предыдущей задаче, получить следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \operatorname{sh}^2 \left(\frac{1}{2} D_n \right) a_n \cdot a_n &= \frac{1}{2}(a_{n-1} a_{n+1} - a_n^2), \\ \operatorname{sh}^2 \left(\frac{1}{2} D_n \right) e^{k_1 n} \cdot e^{k_2 n} &= \operatorname{sh}^2 \frac{k_1 - k_2}{2} e^{(k_1 + k_2)n} = \\ &= \frac{\operatorname{sh}^2 \frac{k_1 - k_2}{2}}{\operatorname{sh}^2 \frac{k_1 + k_2}{2}} \operatorname{sh}^2 \left(\frac{1}{2} D_n \right) e^{(k_1 + k_2)n} \cdot 1. \end{aligned} \quad (9.115)$$

Пример 9.13. Метод Хироты состоит в преобразовании нелинейного дифференциального уравнения в систему билинейных уравнений, для решения которых используется метод теории возмущений (решения отыскиваются в форме степенных рядов по некоторому параметру).

Для решения уравнения СГ (9.4) применяется замена

$$u = 4 \operatorname{arctg} \frac{G}{F} + 2\pi n, \quad n \in \mathbb{Z},$$

рационализирующая $\sin u$. С помощью свойства (9.106) оператора D уравнение СГ преобразуется к виду

$$D_x (D_t G \cdot F) \cdot (F^2 + G^2) = FG(F^2 - G^2).$$

Свойство (9.112) позволяет перестроить последнее уравнение, придав ему форму

$$(F^2 - G^2)(D_x D_t F \cdot G - FG) - FG D_x D_t (F \cdot F - G \cdot G) = 0. \quad (9.116)$$

В силу произвольности F и G их можно связать дополнительным условием. Если потребовать обращения в нуль второго слагаемого в уравнении (9.116), то оно сведется к системе билинейных уравнений

$$\begin{aligned} D_x D_t (F \cdot F - G \cdot G) &= 0, \\ D_x D_t F \cdot G - FG &= 0. \end{aligned} \quad (9.117)$$

Пусть

$$\begin{aligned} F &= 1 + \varepsilon f_1 + \varepsilon^2 f_2 + \varepsilon^3 f_3 + \dots, \\ G &= \varepsilon g_1 + \varepsilon^2 g_2 + \varepsilon^3 g_3 + \dots \end{aligned} \quad (9.118)$$

Первое разложение имеет место в предположении, что $f_0 \neq 0$. Фиксация $f_0 = 1$ не существенна, так как $u(x, t)$ выражается чрез отношение G и F . Выбор $g_0 = 0$ не принципиален: результаты не изменятся, если предположить, что $g_0 \neq 0$. После подстановки рядов (9.118) в уравнения (9.117) и приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях ε получается бесконечная система

$$\begin{aligned} D_x D_t g_1 \cdot 1 &= g_1, \\ D_x D_t 1 \cdot f_1 &= 0, \\ D_x D_t (g_2 \cdot 1 + g_1 \cdot f_1) &= g_2 + g_1 f_1, \\ D_x D_t (2 \cdot f_2 + f_1 \cdot f_1 - g_1 \cdot g_1) &= 0, \\ D_x D_t (g_3 \cdot 1 + g_2 \cdot f_1 + g_1 \cdot f_2) &= g_3 + g_2 f_1 + g_1 f_2, \\ D_x D_t (1 \cdot f_3 + f_2 \cdot f_1 - g_2 \cdot g_1) &= 0 \end{aligned} \quad (9.119)$$

и так далее.

Первое уравнение системы обладает экспоненциальным решением $g_1 = \exp\left(\beta x + \frac{t}{\beta} + \delta\right)$, подстановка которого в остальные уравнения системы превращает их при $f_{m-1} = g_m = 0$, $m \geq 2$, в тождества. Таким образом,

$$u(x, t) = \pm 4 \operatorname{arctg} e^{\beta x + \frac{t}{\beta} + \delta} + 2\pi n$$

(параметр ε включен в δ). При $\varepsilon > 0$, $n = 0$, функция $u(x, t)$ представляет собой либо кинк ($\beta > 0$), либо антикинк ($\beta < 0$) (см. задачу 9.59).

9.96. Применяя метод Хироты, построить двухкинковое решение уравнения СГ (9.4).

9.97. Получить одно- и двухсолитонные решения уравнения мКдФ (9.2) с помощью метода Хироты.

9.98. Построить односолитонное решение НУШ (9.3), используя метод Хироты.

9.99. Уравнение $u_{xt} - u + \alpha u^3 = 0$, $\alpha > 0$, имеет решение в виде уединенной волны

$$u(x, t) = \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \frac{1}{\operatorname{ch}\left(kx + \frac{t}{k} + \delta\right)}.$$

Получить это решение.

9.100. Методом Хироты построить одно- и двухсолитонные решения уравнения КдФ (9.1).

9.101. Показать, что N -солитонное решение уравнения КдФ в билинейной форме (см. (9.166))

$$(D_x D_t + D_x^4) F \cdot F = 0 \quad (9.120)$$

имеет вид

$$F_N = \sum_{\mu=0,1} \exp \left(\sum_{i=1}^N \mu_i \eta_i + \sum_{1 \leq i \leq j}^N \mu_i \mu_j A_{ij} \right), \quad (9.121)$$

где $N = 0, 1, 2, \dots$, величины η_i и A_{ij} определены в условии задачи 9.88, $\sum_{i=1}^0 \cdot = \sum_{i < j}^0 \cdot = \sum_{i < j}^1 \cdot = 0$, а внешнее суммирование осуществляется по всем возможным комбинациям из $\mu_1 = 0, 1$; $\mu_2 = 0, 1$; $\dots$; $\mu_N = 0, 1$.

Пример 9.14. Вывод АПБ в билинейной форме для уравнения КдФ. Функция F_N , заданная выражением (9.121), определяет N -солитонное решение уравнения КдФ и удовлетворяет уравнению (9.120), т. е. уравнению

$$(D_x D_t + D_x^4) F_N \cdot F_N = 0.$$

Из этого уравнения и уравнения для F_{N+1}

$$(D_x D_t + D_x^4) F_{N+1} \cdot F_{N+1} = 0$$

посредством умножения первого на F_{N+1}^2 , второго — на F_N^2 и почленного вычитания получается тождество

$$\begin{aligned} & [(D_x D_t + D_x^4) F_N \cdot F_N] F_{N+1} F_{N+1} - \\ & - [(D_x D_t + D_x^4) F_{N+1} \cdot F_{N+1}] F_N F_N = 0. \end{aligned}$$

В результате применения формул (9.111) и (9.113) при $f = F_N$ и $g = F_{N+1}$ тождество преобразуется к виду

$$2D_x \{[(D_t + D_x^3)F_N \cdot F_{N+1}] \cdot F_N F_{N+1} - 3(D_x^2 F_N \cdot F_{N+1}) \cdot (D_x F_N \cdot F_{N+1})\} = 0$$

и выполняется при следующих условиях, имеющих билинейную форму:

$$D_x^2 F_N \cdot F_{N+1} = \lambda_{N+1} F_N F_{N+1}, \quad (9.122)$$

$$(D_t + 3\lambda_{N+1} D_x + D_x^3) F_N \cdot F_{N+1} = 0, \quad (9.123)$$

где λ_{N+1} — произвольный параметр.

Соотношения (9.122) и (9.123), связывающие два решения уравнения КдФ в билинейной форме (9.120), являются АПБ для этого уравнения. Если решение F_N известно, то АПБ представляют собой систему линейных дифференциальных уравнений относительно F_{N+1} .

9.102. Найти одно- и двухсолитонные решения уравнения КдФ в билинейной форме (9.120), используя АПБ для этого уравнения.

9.103. Показать, что N -солитонное решение уравнения КдФ в билинейной форме (9.120), удовлетворяющее АПБ (9.122), (9.123), имеет вид

$$F_N = \sum_{\varepsilon=\pm 1} \prod_{1 \leq i \leq j}^N \left(\frac{\varepsilon_i k_i - \varepsilon_j k_j}{k_i^2 - k_j^2} \right) \frac{\exp\left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \eta_i\right)}{\prod_{i=1}^N \varepsilon_i k_i}, \quad (9.124)$$

где $\eta_i = k_i x - k_i^3 t + \delta_i$, $\prod_{i=1}^0 = \prod_{i < j}^0 = \prod_{i < j}^1 = 1$, $\sum_{i=1}^0 = 0$, а внешнее суммирование осуществляется по всем возможным комбинациям из $\varepsilon_1 = -1, 1$; $\varepsilon_2 = -1, 1$; ...; $\varepsilon_N = -1, 1$.

9.104. Два решения $F_N^{(1)}$ и $F_N^{(2)}$ уравнения (9.120) называются эквивалентными, $F_N^{(1)} \sim F_N^{(2)}$, если они определяют одно и то же решение уравнения КдФ (9.1).

1. Доказать эквивалентность $e^{ax+b} F_N \sim F_N$, где a и b не зависят от x .

2. Записать решения F_1 и F_2 , определенные выражением (9.124), и доказать, что они эквивалентны решениям (9.169), (9.170).

3. Показать, что решения (9.121) и (9.124) эквивалентны.

9.105. Установить принцип нелинейной суперпозиции

$$D_x F_{N+1} \cdot F_{N-1} = \frac{1}{2} F_N \tilde{F}_N, \quad (9.125)$$

где $F_N = F_N(k_1, k_2, \dots, k_{N-1}, k_N)$ — решение уравнения (9.120), имеющего вид (9.124); $\tilde{F}_N = F_N(k_1, k_2, \dots, k_{N-1}, k_{N+1})$ получается заменой в F_N последнего аргумента k_N на k_{N+1} .

9.106. Найти решение F_2 уравнения КдФ в билинейной форме (9.120), используя принцип нелинейной суперпозиции (9.125), где F_0 и F_1 заданы выражением (9.124); показать, что F_2 также имеет вид (9.124).

9.107. Среди частных решений уравнения (9.120) имеются полиномы Φ различных степеней, каждый из которых порождает рациональное решение $u(x, t)$ уравнения КдФ (9.1). Пусть $\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2, \dots$ — полиномиальные решения, расположенные в порядке возрастания степеней полиномов, а Φ_0 — полином наименьшей степени. Найти функции Φ_0, Φ_1, Φ_2 и соответствующие им решения $u_0(x, t), u_1(x, t), u_2(x, t)$ (последнее — при условии $u_2(0, t) = 0$).

9.108. Полиномиальные решения Φ_N уравнения (9.120) получаются из выражения (9.124) при $K = (k_1, k_2, \dots, k_N) \rightarrow 0$; найти Φ_0, Φ_1, Φ_2 .

9.109. Пусть $F_N(x, t, K)$, где $K = (k_1, k_2, \dots, k_N)$ — решение уравнения (9.120) в форме (9.124); доказать, что

$$\lim_{K \rightarrow 0} F_N(x, t, K) = \Phi_N(x, t), \quad (9.126)$$

где Φ_N — полином степени $\frac{1}{2}N(N+1)$, обладающий свойством

$$\Phi(\alpha x, \alpha^3 t) = \alpha^{\frac{N(N+1)}{2}} \Phi_N(x, t).$$

9.110. Для полиномиальных решений (9.126) установить рекуррентные формулы

$$\begin{aligned} D_x \Phi_{N+1} \cdot \Phi_{N-1} &= \frac{1}{2} \Phi_N^2, \\ (D_t + D_x^3) \Phi_{N+1} \cdot \Phi_N &= 0 \end{aligned}$$

и показать, что

$$\Phi_N(x, t) = \sum_{s=0}^{\left[\frac{N(N+1)}{6}\right]} a_{N-s} x^{\frac{N(N+1)}{2} - 3st^s}, \quad a_N > 0. \quad (9.127)$$

9.111. Для построения рациональных решений уравнения КдФ (9.1) можно использовать полином $\Theta_N = \frac{1}{a_N} F_N \sim F_N$ (см. задачу 9.104). Вывести рекуррентные формулы

$$\begin{aligned} D_x \Theta_{N+1} \cdot \Theta_{N-1} &= (2N+1) \Theta_N^2, \\ (D_t + D_x^3) \Theta_{N+1} \cdot \Theta_N &= 0 \end{aligned}$$

и найти $\Theta_2, \Theta_3, \Theta_4$.

9.112. Уравнение Буссинеска

$$u_{tt} - u_{xx} - 3(u^2)_{xx} - u_{xxxx} = 0$$

модулирует распространение длинных волн на мелкой воде.

1. Найти одно- и двухсолитонные решения этого уравнения.

2. Построить рациональное решение исходя из односолитонного решения.

9.113. Уравнение Кадомцева–Петвиашвили (двухмерное уравнение КдФ) имеет вид

$$(u_t + 6uu_x + u_{xxx})_x + \sigma u_{yy} = 0, \quad \sigma = \pm 1.$$

1) Построить одно- и двухсолитонное решение этого уравнения.

2) Найти его рациональное решение, используя односолитонное решение.

9.114. С точки зрения метода Хироты уравнения КдФ, Буссинеска, Кадомцева–Петвиашвили (задачи 9.100, 9.112, 9.113 соответственно) обладают общим свойством: функции F и G связаны соотношением $G = 2F_x$, так что решение

$$u = 2(\ln F)_{xx}. \quad (9.128)$$

К этому типу относятся:

1) уравнение, моделирующее движение волн на мелкой воде,

$$u_t - u_{xxt} - 3uu_t + 3u_x \int_x^\infty u_t d\xi + u_x = 0;$$

2) уравнение КдФ более высокого порядка

$$u_t + 45u^2u_{xx} + 15(u_xu_{xx} + uu_{xxx}) + u_{xxxxx} = 0;$$

применяя подстановку (9.128), найти односолитонное решение каждого из уравнений.

9.115. Показать, что по цепочке Тоды, движение которой описывается уравнениями (задача 1.175)

$$\frac{d^2}{d\tau^2} \ln(1 + u_n) = u_{n-1} - 2u_n + u_{n+1}, \quad (9.129)$$

может распространяться уединенная волна (солитон) сжатия или разрежения как в положительном, так и в отрицательном направлениях оси Ox . Определить скорость v и ширину h волны. Как зависят v и h от амплитуды волны?

9.4. Другие методы построения точных решений

Пример 9.15. Метод разделения переменных. Некоторые нелинейные уравнения с неизвестной функцией $u(x, t)$ имеют решение в виде суммы произведений функций, каждая из которых зависит от одной переменной, т. е.

$$u(x, y) = \sum_{j=1}^{j=n} f_j(x)g_j(y). \quad (9.130)$$

Уравнение

$$u_t = au_{xx} + bu_x^2$$

имеет решение вида (9.130), а именно: $u(x, t) = \varphi(t) + \psi(x)$. Действительно, подстановка $u(x, t)$ в уравнение превращает его в тождество $\varphi'(t) = af'' + bf'^2$, правая и левая части которого зависят от разных переменных. Это возможно, если каждая часть равна константе:

$$\varphi'(t) = \lambda, \quad af'' + bf'^2 = \lambda.$$

Отсюда $\varphi(t) = \lambda t + C_1$, а уравнение для $f(x)$ заменой $f' = v(f)$ сводится к уравнению первого порядка

$$v'v + \frac{b}{a}v'^2 - \frac{\lambda}{a} = 0.$$

Для функции $w(f) = v^2(f)$ получается линейное уравнение

$$w' + \frac{2b}{a}w - \frac{2\lambda}{a} = 0,$$

общим решением которого

$$w(f) = Ce^{-\frac{2b}{a}f} + \frac{\lambda}{b}.$$

Таким образом, $f'(x) = \pm \sqrt{Ce^{-\frac{2b}{a}f} + \frac{\lambda}{b}}$, откуда

$$\int \frac{e^{\frac{b}{a}f} df}{\sqrt{Ce^{-\frac{2b}{a}f} + \frac{\lambda}{b}}} = \pm x + C_2.$$

Надо учесть все случаи: 1) $C > 0$, $\lambda = 0$; 2) $C = 0$, $\frac{\lambda}{b} > 0$; 3) $C > 0$, $\frac{\lambda}{b} > 0$; 4) $C > 0$, $\frac{\lambda}{b} < 0$; 5) $C < 0$, $\frac{\lambda}{b} > 0$. В третьем случае

интеграл берется с помощью замены $\sqrt{\frac{\lambda}{b}} \exp \frac{bf}{a} = \xi \sqrt{c}$:

$$\frac{a}{b} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \int \frac{d\xi}{\sqrt{\xi^2 + 1}} = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \operatorname{arcsch} \xi.$$

Итак, $\xi = \pm \operatorname{sh} \left(\frac{b}{a} \sqrt{\frac{\lambda}{b}} x + B \right)$, откуда

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{a}{b} \ln \left(\sqrt{\frac{bc}{\lambda}} \left(\pm \operatorname{sh} \left(\frac{b}{a} \sqrt{\frac{\lambda}{b}} x + B \right) \right) \right) = \\ &= \frac{a}{b} \ln \left| \operatorname{sh} \left(\frac{b}{a} \sqrt{\frac{\lambda}{b}} x + B \right) \right| + C_1. \end{aligned}$$

В результате $u(x, t) = \lambda t + \frac{a}{b} \ln \left| \operatorname{sh} \left(\frac{b}{a} \sqrt{\frac{\lambda}{b}} x + B \right) \right| + C_1$.

После введения произвольной постоянной $A = \frac{b}{a} \sqrt{\frac{\lambda}{b}}$ решение принимает форму

$$u(x, t) = \frac{a^2 A^2}{b} t + \frac{a}{b} \ln |\operatorname{sh}(At + B)| + C.$$

В остальных случаях решение получается аналогично (см. также задачу 9.116). Здесь и далее $A, B, C, \dots$ — п. п. (произвольные постоянные).

З а м е ч а н и е. В этом примере (как и в последующих примерах и задачах) получены лишь некоторые частные решения.

9.116. Найти решения уравнения из примера 9.15 в других случаях.

Найти какие-либо точные решения в виде суммы функций, каждая из которых зависит от одного аргумента, уравнений 9.117–9.165.

$$9.117. \quad u_t = au_{xx} + bu_x^2 + cu_x + p.$$

$$9.118. \quad u_t = au_{xx} + bu_x^2 + cu_x + pt.$$

$$9.119. \quad u_t = au_{xx} + bu_x^2 + c.$$

$$9.120. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} u \frac{\partial u}{\partial x}.$$

$$9.121. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} u \frac{\partial u}{\partial x} + bu_x^2 + cu + p.$$

$$9.122. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} u \frac{\partial u}{\partial x} + bu_x^2 + ct^n.$$

$$9.123. \quad u_t = ax^n u_x^k u_{xx}.$$

$$9.124. \quad u_t = ae^{\sigma u_{xx}}.$$

$$9.125. \quad u_t = a \exp\left(\frac{\partial^3 u}{\partial^3 x}\right).$$

$$9.126. \quad u_t = ae^{\sigma u_{xx}} u_{xx}.$$

$$9.127. \quad u_t = e^{\sigma u} (au_{xx} + bu_x^2).$$

$$9.128. \quad u_t = a \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.129. \quad u_t = \frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + a.$$

$$9.130. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - bt, \quad b\sigma > 0.$$

$$9.131. \quad u_t = \frac{\partial}{\partial x} \left(e^u \frac{\partial u}{\partial x} \right) - a^2 e^u.$$

$$9.132. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + be^{\sigma u}.$$

$$9.133. \quad u_t = \frac{\partial}{\partial x} \left(e^u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + ae^u + b.$$

$$9.134. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(x^n e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b.$$

$$9.135. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(x^{n+2} e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + be^{\sigma u} + bx^n e^{\sigma u}.$$

$$9.136. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\alpha x + \sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + be^{\alpha x + \sigma u}.$$

$$9.137. u_t = a \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right].$$

$$9.138. u_t = F(u_{xx}).$$

$$9.139. u_t = F\left(\frac{\partial^n u}{\partial x^n}\right).$$

$$9.140. u_{tt} = au_{xx} + bu_x^2 + ct^n.$$

$$9.141. u_{tt} = a^2 u_{xx} + bu_x^2 + cu + kt \sin \omega t.$$

$$9.142. u_{tt} = a \frac{\partial}{\partial x} u \frac{\partial u}{\partial x}.$$

$$9.143. u_{tt} = a \frac{\partial}{\partial x} u \frac{\partial u}{\partial x} + bu + c.$$

$$9.144. u_{tt} = au_{xx}^2.$$

$$9.145. u_{tt} = ax^n u_x^k u_{xx}.$$

$$9.146. u_{tt} = ae^{\sigma u} u_{xx}.$$

$$9.147. u_{tt} + au_t = b \frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.148. u_{tt} + a^2 tu_t = b \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.149. u_{tt} = ae^{u_x} u_{xx}.$$

$$9.150. u_{tt} + atu_t = e^{kt} \frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad a > 0.$$

$$9.151. u_{tt} = a \frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad a > 0.$$

$$9.152. u_{tt} = \sin u_x u_{xx}.$$

$$9.153. u_{tt} = a \frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b \frac{\partial}{\partial y} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

$$9.154. au_{xx} + bu_{yy} = pu_x^2 + qu_y^2 + ru + s.$$

$$9.155. au_{xx} + bu_{yy} + cu_{zz} = pu \ln u + qu.$$

$$9.156. u_{xx} u_{yy} = a \sin \alpha x e^{-\beta y}.$$

$$9.157. u_{xy}^2 = ae^{\alpha x} u_{xx} u_{yy} + bxy^k.$$

$$9.158. u_{xy}^2 - u_{xx} u_{yy} = bx^m y^n.$$

$$9.159. u_{xy}^2 = a(x^2 + 1) u_{xx} u_{yy} + bxe^{-\alpha^2 y^2}.$$

$$9.160. u_{xx} u_{yy} = f(x) e^{\sigma u}.$$

$$9.161. u_{xy}^2 = f(x)u_{xx}u_{yy} + g(x)y^k.$$

$$9.162. u_{xy}^2 = f(x)u_{xx}u_{yy} + g(x)e^{\sigma y}.$$

$$9.163. u_{xy}^2 = f_1(x)g_1(y)u_{xx}u_{yy} + f_2(x)g_2(y).$$

$$9.164. u_{xx} + ae^{\sigma u}u_{yy} = 0, a > 0.$$

$$9.165. u_{xx} + a \frac{\partial}{\partial y} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial y} \right) = 0.$$

Пример 9.16. Метод разделения переменных. Уравнение

$$u_{tt} = au_{xx} + bu \ln u + cu$$

имеет решение вида (9.130), а именно: $u(x, t) = \varphi(t)f(x)$. Результатом подстановки $u(x, t)$ в уравнение и деления на $\varphi(t)f(x)$ будет тождество

$$\frac{\varphi''}{\varphi} - b \ln \varphi - c = a \frac{f''}{f} + b \ln f.$$

Тождественное равенство двух функций, зависящих от разных переменных, возможно, если каждая из функций равна некоторой константе λ . Таким образом, задача сводится к интегрированию двух обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\varphi'' - b\varphi \ln \varphi - (c + \lambda)\varphi = 0,$$

$$f'' + \frac{b}{a}f \ln f - \frac{\lambda}{a}f = 0,$$

имеющих одинаковую структуру. В результате замены $\varphi(t) = e^{\psi(t)}$ получается уравнение

$$\psi'' + \psi'^2 - b\psi - (c + \lambda) = 0,$$

частным решением которого является квадратный трехчлен $\psi(t) = At^2 + Bt + C$. При подстановке этой функции $\psi(t)$ в уравнение оно становится тождеством, если $A = \frac{b}{4}$, $C = \frac{1}{2} + \frac{1}{b}(B^2 - (c + \lambda))$, так что

$$\psi(t) = \frac{b}{4} \left(t + \frac{2B}{b} \right)^2 + \frac{1}{2} - \frac{c + \lambda}{b}.$$

В итоге

$$u(x, t) = \frac{b}{4} \left(t + \frac{2B}{b} \right)^2 - \frac{b}{4a} \left(x - \frac{2aB}{b} \right)^2 + \frac{1}{2} - \frac{b - c}{b}.$$

Если $\varphi < 0$, $f < 0$, то $\ln \varphi f = \ln(-\varphi) + \ln(-f)$ и получается тот же результат.

Найти какие-либо точные решения (в форме произведения функций) уравнений 9.166–9.211.

$$9.166. u_t = au_x u_{xx}.$$

$$9.167. u_t = f(x)uu_{xx}, \text{ где: 1) } f(x) = x^n; \text{ 2) } f(x) = e^{\alpha x}.$$

$$9.168. u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.169. u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + bu.$$

$$9.170. u_t = a \frac{\partial}{\partial x} u^m \frac{\partial u}{\partial x} + f'(t)u.$$

$$9.171. u_t = u_{xx} + \frac{a}{u} u_x^2.$$

$$9.172. u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + bu + c.$$

$$9.173. u_t = u_{xx} + au \ln u.$$

$$9.174. u_t = ae^{\alpha x} uu_{xx}.$$

$$9.175. u_t = a \frac{\partial}{\partial x} x^m u^n \frac{\partial u}{\partial x} + bu.$$

$$9.176. u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \frac{x^n}{u} \frac{\partial u}{\partial x} + bu.$$

$$9.177. u_t = e^{-\alpha x} uu_{xx} + bu.$$

$$9.178. u_t = \frac{\partial}{\partial x} \left(x^k u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.179. u_t = ae^{\alpha x} uu_{xx} + bu_x.$$

$$9.180. u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u} \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.181. u_t = ax^n uu_{xx}.$$

$$9.182. u_t = ax^{n+2} u^m u_{xx} + bx^n u^{m+1}.$$

$$9.183. u_t = ax^n \frac{\partial}{\partial x} \left(u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.184. u_t = au^k u_{xx}.$$

$$9.185. u_t = \frac{a}{x^n} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^n u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.186. u_t = au^4 u_{xx} + bu^5.$$

$$9.187. u_t = a[(1 - u^2)u_{xx} + uu_x^2].$$

$$9.188. \quad u_t + auu_x = b \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.189. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(x^n u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.190. \quad u_t = ax^n \frac{\partial}{\partial x} u^m \frac{\partial u}{\partial x}; \text{ рассмотреть случай } n = \frac{3m+4}{m+1}.$$

$$9.191. \quad iu_t + u_{xx} + a|u|^{2n}u = 0, \quad \operatorname{Im} a = 0.$$

$$9.192. \quad iu_t + u_{xx} + (a|u|^2 + b|u| + c)u = 0.$$

$$9.193. \quad iu_t + u_{xx} + ku|u|^2u = 0.$$

$$9.194. \quad iu_t + u_{xx} + (a|u|^2 + b)u = 0.$$

$$9.195. \quad u_{tt} = a \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.196. \quad u_{tt} = au_{xx} + bu \ln u + ku.$$

$$9.197. \quad u_{tt} = au^m u_{xx}.$$

$$9.198. \quad u_{tt} = ax^n u^m u_{xx}.$$

$$9.199. \quad u_{tt} = a \frac{\partial}{\partial x} \left(x^n u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.200. \quad u_{tt} = u_{xx} + ae^{\beta t} u^2.$$

$$9.201. \quad u_{tt} = a \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u} \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.202. \quad u_{tt} = u_{xx} + ae^{\beta t} u^2 + bu.$$

$$9.203. \quad u_{tt} = u_{xx} + ae^{\beta x} u^2 - bu.$$

$$9.204. \quad u_{xx} + u_{yy} = au \ln |u|.$$

$$9.205. \quad u_{xx} + u_{yy} = axu + bu \ln |u|.$$

$$9.206. \quad u_{xx} + u_{yy} + \frac{k}{x} u_x = (px^2 + q)u + bu \ln |u|.$$

$$9.207. \quad u_{xx} + u_{yy} = (ax + by + c)u + mu \ln |u|.$$

$$9.208. \quad au_{xx} + bu_{yy} + \frac{k}{x} u_x + \frac{m}{y} u_y = (px^2 + qy^2 + r)u + su \ln |u|.$$

$$9.209. \quad u_{tt} = a \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

$$9.210. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

$$9.211. \quad a \frac{\partial}{\partial x} \left(u^n \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b \frac{\partial}{\partial y} \left(u^n \frac{\partial u}{\partial y} \right) = 0.$$

Пример 9.17. В решении вида (9.130) какую-либо систему функций, зависящих от одной и той же переменной, можно задать полностью или частично; остальные функции определяются из уравнения. Если число переменных больше двух, то одна из (простых) конструкций решения $u(x, y, t) = \varphi(t) + \psi(t)f(x, y)$ или $u(x, y, t) = \varphi(t) + \psi(t)f(x) + \chi(t)g(y)$ и т. п. Уравнение

$$u_t = au_{xx} + bu_x^2 + cu^2 + ru + s$$

допускает решение вида $u(x, t) = \varphi(t) + \psi(t)f(x)$. При подстановке $u(x, t)$ в уравнение оно становится тождеством, которое преобразуется к виду

$$\varphi' - c\varphi^2 - r\varphi - s = a\psi f'' + \psi^2(bf'^2 + cf^2) + (2c\varphi + r\psi - \psi')f.$$

Переменные разделятся, если правая и левая части будут равны нулю и $bf'^2 + cf^2 = 0$. В этом случае

$$\left(\frac{f'}{f}\right)^2 = \alpha^2, \quad \alpha^2 = -\frac{c}{b}, \quad \text{так что } f(x) = Ae^{\pm\alpha x}.$$

В результате из тождества следует система

$$\begin{aligned}\varphi' &= \varphi^2 + r\varphi + s, \\ \psi' &= \alpha^2 a\psi + 2c\varphi\psi + r\psi.\end{aligned}$$

Решение первого уравнения (с разделяющимися переменными) сводится к квадратурам

$$\int \frac{d\varphi}{\left(\varphi + \frac{r}{2c}\right)^2 - \frac{r^2 - 4cs}{4c^2}} = ct + B_1.$$

В зависимости от знака свободного члена в знаменателе подынтегральной функции получаются следующие результаты. Если $\frac{r^2 - 4cs}{4c^2} = p^2 > 0$, то

$$-\frac{1}{p} \operatorname{arcth} \frac{\varphi + \frac{r}{2c}}{p} = ct + B_1$$

или

$$-\frac{1}{p} \operatorname{arccth} \frac{\varphi + \frac{r}{2c}}{p} = ct + B_2.$$

Отсюда

$$\varphi(t) = -\frac{r}{2c} - p \operatorname{th}(pct + B)$$

или

$$\varphi(t) = -\frac{r}{2c} - p \operatorname{cth}(pct + B).$$

Если $-\frac{r^2 - 4cs}{4c^2} = q^2 > 0$, то

$$\varphi(t) = -\frac{r}{2c} + q \operatorname{tg}(qct + B).$$

Если $r^2 = 4cs$, то

$$\varphi(t) = -\frac{r}{2c} - \frac{1}{ct + B}.$$

Решение второго уравнения проводится аналогично. В итоге

$$u(x, t) = -\frac{r}{2c} - p \operatorname{th}(pct + B) + \frac{Ae^{\alpha^2 at + \alpha x}}{\operatorname{sh}^2(pct + B)},$$

$$u(x, t) = -\frac{r}{2c} - p \operatorname{cth}(pct + B) + \frac{Ae^{\alpha^2 at + \alpha x}}{\operatorname{ch}^2(pct + B)},$$

$$u(x, t) = -\frac{r}{2c} - q \operatorname{tg}(qct + B) + \frac{Ae^{\alpha^2 at + \alpha x}}{\cos^2(qct + B)},$$

$$u(x, t) = -\frac{r}{2c} - \frac{1}{ct + B} + \frac{Ae^{\alpha^2 at + \alpha x}}{(ct + B)^2},$$

где $p = \sqrt{\frac{r^2 - 4cs}{2c}}$, $q = \sqrt{\frac{4cs - r^2}{2c}}$, $\alpha = \pm \sqrt{-\frac{b}{c}}$ — вещественные числа, A, B — произвольные постоянные.

Найти точные решения вида $u(x, t) = \varphi(t) + \psi(t)f(x)$ и т. п. уравнений 9.212–9.226.

9.212. $u_t = au_{xx} + buu_x.$

9.213. $u_t + \frac{a}{t}u + buu_x = cu_{xx}.$

9.214. $u_t = au_{xx} + buu_x + cu.$

9.215. $u_t + auu_x = b \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right).$

9.216. $u_t = auu_{xx} + bu + cx + r.$

9.217. $u_t = auu_{xx} + buu_x + cu + r.$

9.218. $u_t = auu_{xx} + bu_x^2 + cu^2 + ru + s.$

9.219. $u_t = auu_{xx} + bu^2 + cu + s.$

9.220. $x^3(u_{xx} + au_{yy}) = cu_y^2 + bcu^2 + kxu + rx^2.$

$$9.221. u_{xx} + au_{yy} = cu_y^2 + bcu^2 + ku + r.$$

$$9.222. u_{xx} + au_{yy} = cu_y^2 e^{\alpha x} + bcu^2 e^{\alpha x} + ku + re^{-\alpha x}.$$

$$9.223. u_t = (a + bu)(u_{xx} + u_{yy}) + cu^2 + ku + m.$$

$$9.224. u_t = au(u_{xx} + u_{yy}) - a(u_x^2 + u_y^2) - b.$$

$$9.225. u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

$$9.226. u_t = au(u_{xx} + u_{yy}) - a(u_x^2 + u_y^2).$$

Пример 9.18. Уравнение

$$u_t = au_{xx} + bu_x^2 + cu + s$$

допускает решение вида $u(x, t) = x^2 \varphi(t) + x\psi(t) + \chi(t)$ (см. (9.130)). Действительно, из тождества

$$x^2 \varphi' + x\psi' + 2a\varphi + b(2x\varphi + \psi)^2 + x^2 c\varphi + x\psi + c\chi + s$$

следует система для определения функций φ, ψ, χ , а именно:

$$\varphi' = 4b\varphi^2 + c\varphi,$$

$$\psi' = 4b\varphi\psi + c\psi,$$

$$\chi' = 2a\varphi + b\psi^2 + c\chi + s.$$

Первое уравнение (с разделяющимися переменными) имеет решение $\varphi(t) = \frac{c}{4b} \frac{e^{ct}}{A - e^{ct}}$. Решением второго уравнения (с разделяющимися переменными) будет $\psi(t) = B \frac{e^{ct}}{A - e^{ct}}$. Третье (линейное) уравнение

$$\chi' - c\chi = \frac{2ac}{4b} \frac{e^{ct}}{A - e^{ct}} + \frac{bB^2 e^{2ct}}{(A - e^{ct})^2} + s$$

имеет решение

$$\chi(t) = \frac{acte^{ct}}{2bA} - \frac{ae^{ct}}{2b} \ln |A - e^{ct}| + \frac{bB^2 e^{ct}}{c(A - e^{ct})} + s + Ce^{ct}.$$

Здесь A, B, C — произвольные постоянные.

Найти решения вида $u(x, t) = x^2 \varphi(t) + x\psi(t) + \chi(t)$ уравнений 9.227–9.237.

$$9.227. u_t = au_{xx} + bu_x^2 + c.$$

$$9.228. u_t = au_{xx} + bu_x^2 + cu_x + s.$$

$$9.229. u_t = auu_{xx} + bu_x^2 + c.$$

$$9.230. u_t = auu_{xx} + bu_x + cu + s.$$

$$9.231. u_t = auu_{xx} + bu_x^2 + cu_x + s.$$

$$9.232. u_t = au_x u_{xx} + bu + c.$$

$$9.233. u_t = au_x u_{xx} + bu_x^2 + c.$$

$$9.234. u_{tt} = au_x u_{xx} + b^2 u.$$

$$9.235. u_{tt} = au_{xx}^2 - b^2 xu_x + c.$$

$$9.236. u_t = au(u_{xx} + u_{yy}) - a(u_x^2 + u_y^2) - b.$$

$$9.237. u_t = \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

Пример 9.19. Точные решения можно находить, применяя метод разделения переменных к уравнению, полученному из исходного посредством замены переменных. Если в уравнении

$$u_{tt} = u_{xx} + a(k^2 m u - k(m+1)u^m + u^{2m-1}), \quad m \neq 1,$$

сделать замену $u = v^\alpha$, с неизвестным пока показателем α , то в результате появятся слагаемые с $v^{(m-1)\alpha+2}$ и $v^{2(m-1)\alpha+2}$. Пусть $2(m-1)\alpha + 2 = 0$; в этом случае $v(x, t)$ удовлетворяет уравнению

$$\alpha v v_{tt} + \alpha(\alpha-1)v_t^2 = \alpha v v_{xx} + \alpha(\alpha-1)v_x^2 + \alpha k^2 m v^2 - \alpha k(m+1)v + a,$$

где $\alpha = \frac{1}{1-m}$, которое допускает решение вида $\varphi(t) + \psi(t)f(x)$.

Переменные разделятся, если $f' = \beta f$ (см. пример 9.17), так что $v(x, t) = \varphi(t) + \psi(t)e^{\beta x}$. Подстановка $v(x, t)$ в уравнение и сравнение коэффициентов при $e^{2\beta x}$ и $e^{\beta x}$ в обеих частях полученного тождества приводят к системе

$$\alpha \varphi \varphi'' + \alpha(\alpha-1)\varphi'^2 = (\alpha^2 \beta^2 + \alpha k^2 m) \varphi^2,$$

$$\alpha \varphi \psi'' + \alpha \psi \varphi'' + 2\alpha(\alpha-1)\varphi' \psi' = (\alpha \beta^2 + 2\alpha k^2 m) \varphi \psi - \alpha k(m+1) \varphi,$$

$$\alpha \psi \psi'' + \alpha(\alpha-1)\psi'^2 = \alpha k^2 m \psi^2 - \alpha k(m+1) \psi + a.$$

Одним из решений третьего уравнения является $\psi(t) = A$ при условии $\alpha m k^2 A^2 - \alpha k(m+1)A + a = 0$, откуда $A_1 = \frac{1}{k}$, $A_2 = \frac{1}{km}$. Второе уравнение, преобразованное к виду

$$\varphi'' - \mu \varphi = 0, \quad \mu = \beta^2 + \frac{2\alpha k^2 m}{\alpha} - \frac{\alpha k(m+1)}{\alpha A},$$

имеет решения $\varphi_{1,2}(t) = \exp(\pm\sqrt{\mu}t)$. Необходимо выбрать μ , так, чтобы функции $\varphi_{1,2}(t)$ удовлетворяли первому уравнению:

$$(\alpha\mu + \alpha(\alpha-1)\mu)C_{1,2}^2 e^{\pm 2\sqrt{\mu}t} = (\alpha\beta^2 + \alpha(\alpha-1)\beta^2 + ak^2m)C_{1,2}^2 e^{\pm 2\sqrt{\mu}t},$$

т. е. $\mu = \beta^2 + \frac{ak^2m}{\alpha^2}$. Должно выполняться равенство

$$\beta^2 + \frac{2ak^2m}{\alpha} - \frac{ak(m+1)}{\alpha A} = \beta^2 + \frac{ak^2m}{\alpha^2},$$

откуда $km = \frac{1}{A}$. Итак, $\psi(t) = \frac{1}{km}$ и $\psi(t) = Ce^{\pm\sqrt{\beta^2 + \frac{ak^2m}{\alpha^2}}t}$ суть решения системы. В итоге

$$u(x, t) = \left[\frac{1}{km} + Ce^{\beta x \pm \sqrt{\beta^2 + ak^2m(m+1)^2}t} \right]^{\frac{1}{1-m}},$$

где C и β — произвольные постоянные.

Есть решение вида $v(x, t) = f(x) + \varphi(t)g(x)$ (см. задачу 9.238).

9.238. Найти решение нелинейного уравнения из примера 9.19, полагая $v(x, t) = f(x) + \varphi(t)g(x)$.

Найти какие-либо точные решения нелинейных уравнений 9.239–9.247 с неизвестной функцией u методом разделения переменных, сделав сначала замену $u = v^\alpha$.

9.239. $u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + bu^{m+1}.$

9.240. $u_t = u_{xx} + e^{kt}(a + be^{kt})u^m.$

9.241. $u_t = u_{xx} + au + be^{kt}u^m.$

9.242. $u_t = a \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{u} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right].$

9.243. $u_t = a \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(u^n \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(u^n \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + f(t)u.$

9.244. $u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + bu^{1-m}.$

9.245. $u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u^2} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b \frac{1}{u^2}.$

9.246. $u_t = \frac{a}{x^m} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^n u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right).$

9.247. $u_t = a \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{u} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right].$

Найти точные решения уравнений 9.248–9.269 с неизвестной функцией u методом разделения переменных, предварительно сделав замену $v = e^{ku}$ или $u = e^{mv}$.

$$9.248. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b e^{\sigma u}.$$

$$9.249. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u} \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.250. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(x^n e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.251. \quad u_t = \frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\mu x + \sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.252. \quad u_{tt} = u_{xx} + b e^{\sigma u} + (at + c) e^{2\sigma u}.$$

$$9.253. \quad u_{tt} = u_{xx} + b e^{\sigma u} + (ax + c) e^{2\sigma u}.$$

$$9.254. \quad u_{tt} = u_{xx} + b e^{\sigma u} + (a e^{kt} + c) e^{2\sigma u}.$$

$$9.255. \quad u_{tt} = u_{xx} + b e^{\sigma u} + (a e^{kx} + c) e^{2\sigma u}.$$

$$9.256. \quad u_{tt} = u_{xx} + b e^{kt + \sigma u} + (a e^{2kt} + c) e^{2\sigma u}.$$

$$9.257. \quad u_{tt} = u_{xx} + b e^{kx + \sigma u} + (a e^{2kx} + c) e^{2\sigma u}.$$

$$9.258. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.259. \quad u_t = a \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right].$$

$$9.260. \quad u_t = a \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + f(t).$$

$$9.261. \quad u_t = a u_{xx} + b u \ln u + c x u.$$

$$9.262. \quad u_t = a u_{xx} + b u \ln u + c x t u.$$

$$9.263. \quad u_t = a u_{xx} + b u \ln^2 u + c u \ln u.$$

$$9.264. \quad u_t = \frac{a}{x^n} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^n \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b u \ln u.$$

$$9.265. \quad u_t = \frac{at}{x^n} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^n \frac{\partial u}{\partial x} \right) + 2btu \ln u.$$

$$9.266. \quad u_t = a u_{xx} + \frac{b}{x} u_x + c u \ln u + p e^{-\alpha t} u.$$

$$9.267. \quad u_t = a u_{xx} + b u \ln u + c t u.$$

$$9.268. \quad u_t = u_{xx} + a u \ln u.$$

$$9.269. \quad u_{xx} + u_{yy} = a u \ln(bu).$$

Пример 9.20. Функция $u(x, t) = f(kx - \lambda t)$, удовлетворяющая дифференциальному уравнению, называется решением типа бегущей волны. Если x — пространственная координата, а t — время, то такое решение описывает линейную волну, распространяющуюся без изменения профиля вдоль оси Ox со скоростью λ/k . Так как $u_x = kf'(z)$, $u_t = -\lambda f'(z)$, где $z = kx - \lambda t$, то решение типа бегущей волны существует, если $f(z)$ — решение обыкновенного дифференциального уравнения.

При подстановке $u(x, t) = f(z)$, $z = kx - \lambda t$ в уравнение

$$u_t = au_{xx} + bu^m u_x$$

получается обыкновенное дифференциальное уравнение

$$-\lambda kx - \lambda f' = ak^2 f'' + bk f^m f',$$

первый интеграл которого

$$-\lambda f' = \lambda + \frac{bk}{m+1} f^{m+1} + C_0.$$

Решение этого уравнения с разделяющимися переменными, записанное в виде

$$ar^2 \int \frac{df}{f(\alpha f^m + \lambda) + C_0} = -z + C, \quad \alpha = \frac{bk}{m+1},$$

определяет функцию $f(z)$ неявным образом. Если $C_0 = 0$, то подстановка $f^m(z) = h(z)$ сводит интеграл к табличному

$$\frac{ak^2}{m\lambda} \int \frac{dh}{h(\alpha h + \lambda)} = -z + C,$$

откуда

$$h(x) = \left(\frac{e^{-\varphi} - \alpha}{\lambda} \right)^{-1}, \quad \varphi = \frac{ak^2}{m\lambda} (C - z).$$

Решением данного уравнения будет

$$u(x, t) = \left[B e^{-\frac{m\omega}{a}(x-\omega t)} - \frac{b}{\omega(m+1)} \right]^{-\frac{1}{m}}, \quad B, \omega — \text{п. п.}$$

Найти решения уравнений 9.270–9.295 типа бегущей волны.

9.270. $u_t = u_{xx} + \frac{a}{u} u_x^2.$

9.271. $au_{xx} + bu_{yy} = cu^m.$

9.272. $u_t = au_{xx} + bu_x^2.$

$$9.273. \quad u_t = au^m u_{xx}.$$

$$9.274. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.275. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + bu^{1-m}.$$

$$9.276. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) - 2au + \frac{2}{9au}.$$

$$9.277. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - 2au^4 - u^3.$$

$$9.278. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(ue^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + bu^{1-m}.$$

$$9.279. \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(u^m \frac{\partial u}{\partial y} \right) = au^n.$$

$$9.280. \quad a \frac{\partial}{\partial x} \left(u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b \frac{\partial}{\partial y} \left(u^n \frac{\partial u}{\partial y} \right) = 0.$$

$$9.281. \quad u_t = auu_{xx} + bu^2 + cu + d.$$

$$9.282. \quad u_t = auu_{xx} - au_x^2 + cu_x + pu + q.$$

$$9.283. \quad u_t = au_{xx} + au_x^2 + bu - bu^4.$$

$$9.284. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u^2} \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.285. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(u^m \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad \text{где } m = -1, 1, 2.$$

$$9.286. \quad u_t = u_{xx} + \frac{2}{9}u - 2b^2u^3.$$

$$9.287. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{(u+b)^2} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + cu_x.$$

$$9.288. \quad u_t = u_{xx} + uu_x.$$

$$9.289. \quad u_t = u_{xx} - 2a^2uu_x^2.$$

$$9.290. \quad u_t = auu_{xx} + bu_x^2 + cu^2 + pu + q.$$

$$9.291. \quad u_{xx} + u_{yy} = au \ln u.$$

$$9.292. \quad u_{xx} + u_{yy} = a \operatorname{sh} \beta u.$$

$$9.293. \quad u_t = u_{xx} + au + bu^m + cu^{2m-1}.$$

$$9.294. \quad u_t = u_{xx} + au + bu^m.$$

$$9.295. \quad u_t = au_{xx} + u^m u_x, \quad \text{где } m = 2; 3.$$

$$9.296. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{(u^2 + b^2)} \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

$$9.297. \quad u_t = u_{xx} + a + be^{\sigma u}.$$

$$9.298. \quad u_t = u_{xx} + a + be^{\sigma u} + ce^{2\sigma u}.$$

$$9.299. \quad u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + be^{\sigma u} + c + de^{-\sigma u}.$$

$$9.300. \quad u_t = u_{xx} - u(1 - u)(a - u).$$

9.301. Доказать инвариантность уравнения из предыдущей задачи относительно преобразований: 1) $U = 1 - u$, $a_1 = 1 - a$; 2) $w(z, \tau) = 1 - \frac{1}{a}u(x, t)$, $\tau = a^2t$, $z = ax^2$. Найти еще какие-нибудь точные решения уравнения, исходя из этого свойства.

$$9.302. \quad u_t = a \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(e^{\sigma u} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + be^{\sigma u} + c + de^{-\sigma u}.$$

$$9.303. \quad u_t = au_{xx} + 2uu_x.$$

$$9.304. \quad u_t = u_{xx} + au(1 - u).$$

$$9.305. \quad u_t = au_{xx} + bu_x^2 + cu_x + r.$$

$$9.306. \quad u_t = au_{xx} + bu_x^2 + cu^2 + ru + s.$$

$$9.307. \quad u_t = (a + \sigma u)(u_{xx} + u_{yy}) + ku^2 + mu + n.$$

$$9.308. \quad u_t = au(u_{xx} + u_{yy}) - a(u_x^2 + u_y^2).$$

$$9.309. \quad u_t = \frac{\partial}{\partial x} u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} u \frac{\partial u}{\partial y}.$$

$$9.310. \quad u_t = a \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{u} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{u} \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

$$9.311. \quad u_t = au(u_{xx} + u_{yy}) - a(u_x^2 + u_y^2) - \beta.$$

$$9.312. \quad u_{xx} + u_{yy} = ae^{\sigma u}.$$

$$9.313. \quad au_{xx} + bu_{yy} + cu_{zz} = ke^{\sigma u}.$$

$$9.314. \quad au_{xx} + bu_{yy} + cu_{zz} = ku^m.$$

Пример 9.21. Функция

$$u(x, t) = t^\alpha U(z), \quad z = xt^\beta, \quad (9.131)$$

называется автомодельным решением уравнения

$$u_t = a \frac{\partial}{\partial x} u^n \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (9.132)$$

если преобразование подобия переменных

$$t = C\tau, \quad x = C^k\xi, \quad u = C^m v \quad (9.133)$$

не меняет ни формы решения (9.131), ни формы уравнения (9.132).

В новых переменных (9.133) решение имеет вид

$$C^m U = C^\alpha \tau^\alpha U(C^{k+\beta} x \tau^\beta)$$

и совпадает с (9.131), если $m = \alpha$, $k + \beta = 0$. Преобразованное уравнение

$$C^{m-1} v_\tau = a C^{-2k+mn+m} \frac{d}{dz} v^n \frac{dv}{dz}$$

сохранит форму (9.132), если $m - 1 = -2k + mn + v$, т. е.

$$k = \frac{mn+1}{2}, \quad m - \text{любое.}$$

Итак, решение уравнения (9.132) следует отыскивать в форме

$$u(x, t) = t^m U(z), \quad z = xt^{-k}, \quad k = \frac{mn+1}{2};$$

переменные U и z называются автомодельными.

Так как $\frac{d}{dx} = t^{-k} \frac{d}{dz}$, то в новых переменных уравнение (9.132) запишется в виде

$$mt^{m-1}U - kt^m xt^{-k-1}U' = at^{-2k+mn+m} \frac{d}{dz} U^n \frac{dU}{dz},$$

т. е. является обыкновенным дифференциальным уравнением

$$\frac{d}{dz} U^n \frac{dU}{dz} + \frac{k}{a} z U' - \frac{m}{a} U = 0. \quad (9.134)$$

При различных значениях свободного параметра m получаются различные точные решения вида (9.131) уравнения (9.132).

Если выбрать $k = 0$, что соответствует $m = -\frac{1}{n}$, то получающееся уравнение допускает понижение порядка следующим образом (посредством замены $U^n U' = f(U)$):

$$f' f = -\frac{1}{na} U^{n+1}.$$

Отсюда

$$f^2 = -\frac{2}{an(n+2)} U^{n+2} + C$$

и при $C = 0$

$$f = \pm \sqrt{-\frac{2}{an(n+2)}} U^{-\frac{n}{2}+1}.$$

Следовательно,

$$U(z) = \left(\pm \frac{n}{2} \sqrt{-\frac{2}{an(n+2)}} z + C \right)^{\frac{2}{n}}.$$

Таким образом, одно из решений уравнения (9.132)

$$u(x, t) = t^{-\frac{1}{n}} \left(\pm n \sqrt{-\frac{1}{2an(n+2)}} x + C \right)^{\frac{2}{n}}.$$

Уравнение имеет другие автомодельные решения (см. также задачу 9.315).

Найти автомодельные решения уравнений 9.315–9.325

9.315. $u_t = a \frac{\partial}{\partial x} u^n \frac{\partial u}{\partial x}.$

9.316. $u_t = a \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{u^2} \frac{\partial u}{\partial x}, \quad a > 0.$

9.317. $u_t = ax^n \frac{\partial}{\partial x} u^m \frac{\partial u}{\partial x}.$

9.318. $u_t = \frac{a}{x^n} \frac{\partial}{\partial x} x^n u^m \frac{\partial u}{\partial x}.$

9.319. $u_t = au_x^n u_{xx}.$

9.320. $u_{tt} = a \frac{\partial}{\partial x} u^m \frac{\partial u}{\partial x}.$

9.321. $u_{tt} = ax^n u^m u_{xx}.$

9.322. $u_{tt} = u_{xx} + (x^2 - t^2)f(u).$

9.323. $u_{tt} = a^2 \frac{\partial}{\partial x} u^m \frac{\partial u}{\partial x}.$

9.324. $u_{xy} = ax^r u^n.$

Пример 9.22. Исходя из структуры правой части уравнения

$$u^2 = a \left[\frac{\partial}{\partial x} x^n \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} y^n \frac{\partial u}{\partial y} \right]$$

можно попытаться преобразовать его правую часть посредством замены типа $\xi = x^\alpha + y^\alpha$ или замены в более общей форме

$$\xi = h^\gamma, \quad h = A(x^\alpha + y^\alpha),$$

где коэффициент A и показатели α, γ — неизвестные числа.

Из формул дифференцирования по x

$$\frac{\partial}{\partial x} = \gamma h^{\gamma-1} h_x \frac{\partial}{\partial \xi},$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \gamma h^{\gamma-1} h_x \frac{\partial}{\partial \xi} x^n \gamma h^{\gamma-1} h_x \frac{\partial}{\partial \xi} = \gamma^2 x^n h^{2\gamma-2} h_x^2 \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + h \frac{\partial}{\partial \xi}$$

и из аналогичных формул дифференцирования по y следует, что коэффициент при $u_{\xi\xi}$ в преобразованном уравнении равен

$$a(x^n \gamma^2 h^{2\gamma-2} h_x^2 + y^n \gamma^2 h^{2\gamma-2} h_y^2) =$$

$$= a\gamma^2 h^{2\gamma-2} A^2 \alpha^2 (x^{n+2\alpha-2} + y^{n+2\alpha-2}) = \frac{a\gamma^2 A^2 \alpha^2 (x^{n+2\alpha-2} + y^{n+2\alpha-2})}{h^{2-2\gamma}}.$$

Если потребовать, чтобы $n + 2\alpha - 2 = \alpha$, $2 - 2\gamma = 1$, $Aa\gamma^2\alpha^2 = 1$, то этот коэффициент станет равным единице, так что $\alpha = 2 - n$, $\gamma = \frac{1}{2}$, $A = \frac{4}{a(2-n)^2}$. Теперь коэффициент при u_ξ вполне определен и, как показывают более длительные выкладки, равен константе. Таким образом, итогом введения новой переменной является уравнение

$$u^2 = u_{\xi\xi} + \frac{B}{\xi} u_\xi, \quad B = \frac{2+n}{2-n}, \quad \xi = \left[\frac{4(x^{2-n} + y^{2-n})}{a(2-n)^2} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

В данном случае существует степенное решение $u(\xi) = K\xi^p$, подстановка которого в уравнение преобразует его к виду

$$K^2 \xi^{2p} = Kp(p-1)\xi^{p-2} + KBp\xi^{p-2}$$

и превращает в тождество, если $2p = p - 2$, $K = p(p-1) + pB$.

Таким образом, $u(x, y) = \frac{2a(n-1)(n-2)}{x^{2-n} + y^{2-n}}$.

Найти какие-нибудь точные решения нелинейных уравнений 9.325–9.342, предварительно уменьшив их размерность с помощью подходящей замены.

9.325. $u_{xx} + u_{yy} = au^n.$

9.326. $u_{xx} + u_{yy} = ae^{\sigma u}.$

9.327. $u_t = au(u_{xx} + u_{yy}) + b(u_x^2 + u_y^2).$

9.328. $u_t = au(u_{xx} + u_{yy}) - a(u_x^2 + u_y^2) + f(t)$; дать также решение для $f(t) = be^{-kt}$.

$$9.329. \quad u_t = \left(\frac{\partial}{\partial x} a x^n \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} b y^m \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} c z^p \frac{\partial u}{\partial z} \right) + k u \ln u.$$

$$9.330. \quad u_t = u \left(\frac{\partial}{\partial x} a e^{\alpha x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} b e^{\beta y} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} c e^{\gamma z} \frac{\partial u}{\partial z} \right).$$

$$9.331. \quad a e^{\alpha x} u_{xx} + b e^{\beta y} u_{yy} = c u^m.$$

$$9.332. \quad a e^{\alpha x} u_{xx} + b e^{\beta y} u_{yy} = c e^{\sigma u}.$$

$$9.333. \quad a \frac{\partial}{\partial x} u^n \frac{\partial u}{\partial x} + b \frac{\partial}{\partial y} u^n \frac{\partial u}{\partial y} + c \frac{\partial}{\partial z} u^n \frac{\partial u}{\partial z} = d u^m.$$

$$9.334. \quad \frac{\partial}{\partial x} a x^n \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} b y^m \frac{\partial u}{\partial y} = c u^p.$$

$$9.335. \quad \frac{\partial}{\partial x} a x^n \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} b y^m \frac{\partial u}{\partial y} = c e^{\sigma u}.$$

$$9.336. \quad a x^n u_{xx} + b y^m u_{yy} = c u^p.$$

$$9.337. \quad a x^n u_{xx} + b y^m u_{yy} = c e^{\sigma u}.$$

$$9.338. \quad \frac{\partial}{\partial x} a e^{\sigma x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} b e^{\mu y} \frac{\partial u}{\partial y} = c u^m.$$

$$9.339. \quad u_t = \frac{\partial}{\partial x} a e^{\sigma x} u^m \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} b u^m \frac{\partial u}{\partial y}.$$

$$9.340. \quad u_t = u^k \left[a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y} b e^{\sigma y} \frac{\partial u}{\partial y} \right].$$

$$9.341. \quad u_t = u \left(a \frac{\partial}{\partial x} x^n \frac{\partial u}{\partial x} + b \frac{\partial}{\partial y} y^m \frac{\partial u}{\partial y} + c \frac{\partial}{\partial z} e^{\sigma z} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + k u^2.$$

$$9.342. \quad u_{tt} = u \left(a \frac{\partial}{\partial x} e^{\alpha x} \frac{\partial u}{\partial x} + b \frac{\partial}{\partial y} e^{\beta y} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + k u^2.$$

Пример 9.23. Преобразование годографа. Суть метода заключается в изменении ролей переменных в дифференциальных уравнениях: в уравнении с неизвестной функцией $u = u(x, y)$ проводится замена $x = x(u, y)$, где u и y — независимые переменные, в системе уравнений относительно функций $u = u(x, y)$, $v = v(x, y)$ осуществляется замена $x = x(u, v)$, $y = y(u, v)$, где u и v — независимые переменные. Метод эффективен, если нелинейные уравнения преобразуются в линейные; решения получают в неявном виде.

Решить задачу Коши

$$\begin{cases} u_x + v u_y = 0, \\ v_x + u v_y = 0, \end{cases}$$

где $1 < x$, $0 < y$, $u(x, 0) = x$, $v(x, 0) = -x$.

Для вывода формул перехода к новым переменным следует продифференцировать по x и y функции $x = x(u, v)$ и $y = y(u, v)$ в которых u и v зависят от x и y :

$$\begin{aligned} 1 &= x_u u_x + x_v v_x, & 0 &= y_u u_x + y_v v_x & \text{— дифференцирование по } x, \\ 0 &= x_u u_y + x_v v_y, & 1 &= y_u u_y + y_v v_y & \text{— дифференцирование по } y. \end{aligned}$$

Отсюда

$$u_x = \frac{y_v}{J}, \quad u_y = -\frac{x_v}{J}, \quad v_x = -\frac{y_u}{J}, \quad v_y = \frac{x_u}{J}, \quad J = x_u y_v - x_v y_u. \quad (9.135)$$

Задача Коши приобретает форму

$$\begin{cases} ux_u - y_u = 0, \\ vx_v - y_v = 0, \end{cases} \quad (9.136)$$

где $1 < u$, $-\infty < y < \infty$, $x|_{v=-u} = u$, $y|_{v=-u} = 0$.

Результатом исключения функции $y(u, v)$ из системы (9.136) является уравнение $(u - v)x_{uv} = 0$. Согласно начальным условиям $v \neq u$, следовательно, $x_{uv} = 0$. Функция $x(u, v)$ определяется последовательным интегрированием:

$$\frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{\partial x}{\partial u} \right) = 0 \implies \frac{\partial x}{\partial u} = f(u) \implies x(u, v) = \int f(u) du + f_2(v)$$

и равна

$$x(u, v) = f_1(u) + f_2(v), \quad f_1 \in C^2, f_2 \in C^2.$$

Зная решение $x = x(u, v)$ системы (9.136), можно найти второе решение $y = y(u, v)$:

$$y_u = ux_u \implies y_u = u f_1'(u) \implies y = \int_{u_0}^u \tau f_1'(\tau) d\tau + h(v),$$

$$y_v = vx_v \implies h'(v) = v f_2'(v) \implies h(v) = \int_{v_0}^v \tau f_2'(\tau) d\tau + C.$$

Итак, найдено общее решение системы (9.136)

$$\begin{aligned} x(u, v) &= f_1(u) + f_2(v), \\ y(u, v) &= \int_{u_0}^u \tau f_1'(\tau) d\tau + \int_{v_0}^v \tau f_2'(\tau) d\tau + C. \end{aligned} \quad (9.137)$$

Если $y = 0$, то

$$\begin{aligned} u &= f_1(u) + f_2(-u), \\ 0 &= \int_{u_0}^u \tau f_1'(\tau) d\tau + \int_{v_0}^{-u} \tau f_2'(\tau) d\tau + C. \end{aligned}$$

Конструкция второго уравнения упрощается после операций дифференцирования и интегрирования:

$$u f_1'(u) + u f_2'(-u) = 0 \implies f_1'(u) + f_2'(-u) = 0 \implies f_1(u) - f_2(-u) = C_1.$$

Из первого и второго преобразованных уравнений следует, что

$$f_1(u) = \frac{u + C_1}{2}, \quad f_2(-u) = \frac{u - C_1}{2}.$$

Эти функции, внесенные в соотношения (9.137), выделяют решение (в неявном виде) поставленной задачи Коши:

$$x = \frac{u - v}{2}, \quad y = \frac{u^2 - v^2}{4}.$$

В данном случае функции u и v можно выразить через x и y и представить решение в явном виде

$$u = x + \frac{y}{x}, \quad v = -x + \frac{y}{x}.$$

Применяя преобразование годографа, решить уравнения или системы уравнений 9.343–9.361 при указанных условиях.

9.343. Найти общее решение уравнения

$$u_t + uu_x = 0, \quad x \in (-\infty; \infty),$$

и решить задачу Коши при условии $u(x, 0) = kx$.

9.344. $u_t + u^2 u_x = 0$, $-\infty < x < \infty$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_0 \operatorname{arctg} x$.

9.345. $u_t + uu_x = 0$, $-\infty < x < \infty$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_0(x)$.

9.346. Найти общее решение уравнения

$$u_t + f(u)u_x = 0.$$

9.347. $u_t + f(u)u_x = 0$, $-\infty < x < \infty$, $0 < t$,
 $u(x, 0) = u_0(x)$.

9.348. $yuu_x + xu_y = 0$, $-\infty < x < \infty$, $1 < y$,
 $u(x, 1) = 1 + x^2$.

9.349. $yu_x + xuu_y = 0$, $1 < x$, $1 < y$,
 $u(1, y) = 1 + y^2$.

9.350. $\cos yu_x - 4 \operatorname{sh} 2xu_y = 0$, $-\infty < x < \infty$, $0 < y$,
 $u(x, 0) = 2 \operatorname{sh} 2x$.

9.351. $uu_x + 2e^{-y}u_y = 0$, $-\infty < x < \infty$, $0 < y$,
 $u(x, 0) = 1 + x$.

9.352. $e^{2y}uu_x + e^xu_y = 0$, $-\infty < x < y < \infty$,
 $u(x, x) = \operatorname{sech} x$.

9.353. $(1 + yu)u_x + (1 + xu)u_y = 0$, $1 < x$, $0 < y$,
 $u(x, 0) = \frac{2}{x}$.

9.354. $u_x - 2yu_y = 2e^{-u}$, $0 < x$, $1 < y$,
 $u(x, 1) = \ln(1 + 4x)$.

9.355. $u_{xx} - u_y u_x^2 = 0$, $0 < y < x$,
 $u(x, 0) = \sqrt{2x}$.

9.356. $u_y^2 u_x - u_{yy} = 0$, $x < 0$, $0 < y$,
 $u(0, y) = \sqrt[4]{y}$.

9.357. Найти общее решение уравнения

$$u_x u_{xt} - u_t u_{xx} = 0.$$

9.358. Преобразовать в линейное нелинейное уравнение

$$u_t u_x^2 = f(x, t) u_{xx}.$$

9.359. Найти точные решения нелинейного уравнения

$$u_t u_x^2 = a u_{xx}, \quad a > 0.$$

9.360.
$$\begin{cases} u_x + v u_y = 0, \\ v_x + u v_y = 0, \end{cases}$$

где $-\infty < x < \infty$, $0 < y$, $u(x, 0) = x$, $v(x, 0) = 2x$.

$$9.361. \quad \begin{cases} u_x + v^2 u_y = 0, \\ v_x + u^2 v_y = 0, \end{cases}$$

где $0 < x, 0 < y, u(x, 0) = x, v(x, 0) = x^2$.

9.362. Найти общее решение системы уравнений

$$\begin{cases} u_x + u^2 v_y = 0, \\ v_x + v^2 u_y = 0. \end{cases}$$

9.363. Найти частное решение предыдущей задачи, если

$$1 < x, 1 < y, \quad u(1, y) = \frac{1}{\sqrt{y}}, \quad v(1, y) = y.$$

9.364. Сформировать нелинейную систему из двух уравнений с двумя неизвестными функциями $u(x, t)$ и $v(x, t)$, эквивалентную уравнению

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} f(u) \frac{\partial u}{\partial x},$$

и преобразовать ее в систему линейных уравнений.

9.365. Найти частное решение уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} u \frac{\partial u}{\partial x}$$

в виде $x = P(u, v), y = Q(u, v)$, где P и Q — многочлены не выше четвертой степени, v — параметр.

9.366. Найти частное решение уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} u^2 \frac{\partial u}{\partial x}$$

в виде $x = P(u, v), y = Q(u, v)$, где P и Q — многочлены не выше пятой степени, v — параметр.

9.367. Ввести нелинейную систему из двух уравнений с двумя неизвестными функциями $u(x, y)$ и $v(x, y)$, эквивалентную уравнению

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y} f(u) \frac{\partial u}{\partial y} = 0,$$

и преобразовать ее в систему линейных уравнений.

9.368. Найти частное решение уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} u \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

в виде $x = P(u, v)$, $y = Q(u, v)$, где P и Q — многочлены не выше третьей степени, v — параметр.

9.369. Найти частное решение уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} u^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

в виде $x = P(u, v)$, $y = Q(u, v)$, где P и Q — многочлены не выше четвертой степени, v — параметр.

9.370. Получить нелинейную систему из двух уравнений с двумя неизвестными функциями $u(x, y)$ и $v(x, y)$, эквивалентную уравнению

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[f_1(u) \frac{\partial}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[f_2(u) \frac{\partial}{\partial y} \right] = 0,$$

и преобразовать ее в систему линейных уравнений.

9.371. Найти частное решение уравнения

$$\frac{\partial}{\partial x} u^2 \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} u \frac{\partial}{\partial y} = 0$$

в виде $x = P(u, v)$, $y = Q(u, v)$, где P и Q — многочлены не выше пятой степени, v — параметр.

9.372. Найти точные решения уравнения Бюргерса

$$u_t = u_{xx} + uu_x,$$

применив подстановку Коула–Хопса $u = \frac{2}{v} \frac{\partial v}{\partial x}$.

9.373. Найти точные решения уравнения

$$u_t = au_{xx} + bu_x^2,$$

применив подстановку $u = \frac{a}{b} \ln |v|$.

9.374. Найти точные решения уравнения

$$u_t = au_{xx} + bu_x^2 + cu_x + d,$$

применив подстановку $u = \frac{a}{b} \ln |v|$.

9.5. Ответы

9.3. Построение мажорантного ряда для ряда Неймана основано на неравенстве (9.6). Из оценки

$$|K1| \leq \int_x^\infty |K(x, \xi, k)| d\xi \leq M \int_x^\infty (\xi - x) |u(\xi)| d\xi$$

следует, что (далее для упрощения записи значок «+» у функции $U_j^+(x)$ опущен)

$$|\mathcal{K}1| \leq M \cdot \begin{cases} U_1(x), & 0 \leq x, \\ U_1(x) - xU_0(x), & x < 0. \end{cases}$$

Если $x \geq 0$, то

$$\begin{aligned} |\mathcal{K}^2 1| &\leq \int_x^\infty |K(x, \xi, k)| \cdot |(\mathcal{K}1)(x, \xi, k)| d\xi \leq M^2 \int_x^\infty (\xi - x) |u(\xi)| U_1(\xi) d\xi \leq \\ &\leq M^2 \int_x^\infty \xi |u(\xi)| U_1(\xi) d\xi \leq M^2 \int_x^\infty \left(-\frac{\partial U_1}{\partial \xi} \right) U_1(\xi) d\xi \leq \frac{M^2 U_1^2(x)}{2!}. \end{aligned}$$

При $x < 0$

$$\begin{aligned} |\mathcal{K}^2 1| &= \left| \int_x^0 K \mathcal{K}1 d\xi + \int_0^\infty K \mathcal{K}1 d\xi \right| \leq \\ &\leq M^2 \left(\int_x^0 (\xi - x) |u(\xi)| (U_1(\xi) - \xi U_0(\xi)) d\xi + \int_0^\infty (\xi - x) |u(\xi)| U_1(\xi) d\xi \right) = \\ &= M^2 \left(\int_x^\infty (\xi - x) |u(\xi)| U_1(\xi) d\xi - \int_x^0 \xi (\xi - x) |u(\xi)| U_0(\xi) d\xi \right) \leq \\ &\leq M^2 \left(\int_x^\infty |\xi| |u(\xi)| U_1 d\xi - x \int_x^\infty |u(\xi)| U_1 d\xi - x \int_x^\infty |\xi| |u(\xi)| U_0 d\xi \right) \leq \\ &\leq M^2 \left(\frac{U_1^2(x)}{2} - 2xU_0(x)U_1(x) \right). \end{aligned}$$

При переходе к последнему звену цепочки неравенств использована монотонность $U_j(\xi) \leq U_j(x)$ при $x \leq \xi$. Далее методом математической индукции доказываются неравенства

$$|\mathcal{K}^m 1| \leq \begin{cases} \frac{M^m U_1^m(x)}{m!}, & 0 \leq x, \\ \frac{M^m U_1^m(x)}{m!} - \frac{mx}{(m-1)!} U_0(x) U_1^{m-1}(x), & x < 0. \end{cases}$$

9.5. 1) $W = -2ik$; 2) $W = 2ik$.

У к а з а н и е. Применить асимптотические оценки (9.11).

9.8. **У к а з а н и е.** Для вывода соотношений (9.16) применить формулы (9.14), (9.9), а для вывода соотношения (9.17) — формулы $W[f^-(x, k), f^-(x, -k)] = 2ik$ (задача 9.5 и (9.13)).

9.10. **У к а з а н и е.** Воспользоваться свойством (9.17).

9.11. **Р е ш е н и е.** Пусть коэффициент $a(k_n) = 0$, где $k_n = \alpha_n + i\beta_n$, $\beta > 0$ (задача 9.10). Так как вронскиан (9.14) равен нулю, то $f^-(x, k_n) = b_n f^+(x, k_n) = \psi_n(x)$. Асимптотическое представление (см. (9.11))

$$\psi_n(x) = \begin{cases} e^{-i(\alpha_n + i\beta_n)x} + o(e^{\beta_n x}), & x \rightarrow -\infty, \\ b_n e^{i(\alpha_n + i\beta_n)x} + o(e^{-\beta_n x}), & x \rightarrow +\infty, \end{cases}$$

позволяет заключить, что $\psi_n(x) \in L_2(\mathbb{R})$, т.е. $\psi_n(x)$ — собственная функция, а k_n — собственное значение. Так как k_n^2 — вещественное число, то $\alpha_n = 0$.

Обратно, если $k_n^2 = -\beta_n^2$ (β_n — вещественное число) — собственное значение, то собственная функция имеет вид $\psi_n(x) = f^-(x, i\beta_n) = b_n f^+(x, i\beta_n)$ (пример 9.3) и формула (9.14) дает $a(i\beta_n) = 0$.

9.12. Решение. Пусть $k_n = i\beta_n$ — нуль функции $a(k)$. Требуется доказать, что $\dot{a}(k_n) \neq 0$, где $\dot{a}(k)$ — производная по k . Исходным пунктом служит система тождеств

$$\begin{aligned} -\frac{d^2 f^+}{dx^2} + u f^+ &= k^2 f^+ + 2k f^+, \\ -\frac{d^2 f^-}{dx^2} + u f^- &= k^2 f^-, \end{aligned}$$

первое из которых — результат дифференцирования уравнения (9.20) по k при $\lambda = k^2$, $\psi(x) = f^+(x, k)$, а второе представляет собой уравнение (9.20), в котором $\lambda = k^2$, $\psi(x) = f^-(x, k)$. Если первое тождество умножить на f^- , второе — на f^+ и взять разность, то получится соотношение

$$\frac{dW[f^-, f^+]}{dx} = -2ik f^+ f^-.$$

Отсюда при $k = -i\beta_n$

$$W[f^-(x, i\beta_n, f^+(x, i\beta_n))] \Big|_x^\infty = -2i\beta_n b_n \int_x^\infty (f^+(\xi, i\beta_n))^2 d\xi.$$

Аналогично,

$$W[f^+(x, i\beta_n, f^-(x, i\beta_n))] \Big|_{-\infty}^x = -2i\beta_n b_n \int_{-\infty}^x (f^+(\xi, i\beta_n))^2 d\xi.$$

Почленное сложение последних двух соотношений и преобразование левой части на основе (9.14) к виду

$$-\frac{d}{dk} W[f^-, f^+] \Big|_{k=i\beta_n} 2ia(i\beta_n) + 2i^2 \beta_n \dot{a}(i\beta_n)$$

приводит к результату

$$\dot{a}(i\beta_n) = -ib_n \int_{-\infty}^\infty [f^+(\xi, i\beta_n)]^2 d\xi \neq 0. \quad (9.138)$$

9.13. Указание. Применить (9.138).

9.14. Указание к п. 2. Используя (9.18), доказать, что $a(k)$ имеет в полуплоскости $\text{Im } k \geq 0$ конечное число нулей.

9.18. Решение, п. 2. Если существует оператор Ω в форме (9.26), то

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\Omega f &= -f''(x) + \frac{d}{dx} [f(x)K(x, x)] + f(x)K_x(x, x) + \\ &+ u(x)f(x) - \int_x^\infty K_{xx}(x, y)f(y)dy + u(x) \int_x^\infty K(x, y)f(y)dy, \\ \Omega\mathcal{L}_0 f &= -f''(x) + f'(x)K(x, x) - f(x)K_y(x, x) - \int_x^\infty K_{yy}(x, y)f(y)dy. \end{aligned}$$

Так как эти выражения равны, то

$$\begin{aligned} K_{xx} - K_{yy} &= u(x)K, \quad x < y, \\ \frac{dK(x, x)}{dx} &= -\frac{1}{2}u(x) \implies K(x, x) = \frac{1}{2} \int_x^\infty u(\xi) d\xi, \\ \forall C: \lim_{\substack{x+y \rightarrow \infty \\ y-x=C}} K(x, y) &= 0; \end{aligned} \quad (9.139)$$

последнее условие есть следствие равномерного на $\overline{H}$ стремления функции $K(x, y) \rightarrow 0$ при $y \rightarrow \infty$. Полученная задача представляет собой задачу Гурса (8.35), которая имеет единственное решение (пример 8.10), принадлежащее $\mathcal{E}(\Delta)$ (задача 8.312).

9.19. $s = \left\{ R(k) = -\frac{iU_0}{2k + iU_0} \right\}$, дискретного спектра нет.

9.20. $R(k) = \frac{iU_0 e^{-2ikl} \operatorname{tg} 2\chi l}{2k\chi - i(k^2 + \chi^2) \operatorname{tg} 2\chi l}$, $\chi = \sqrt{k^2 + U_0}$, $\beta_n > 0$ — корни уравнения $(\chi \operatorname{tg} \chi l - \beta)(\beta \operatorname{tg} \chi l + \chi) = 0$, $\chi = \sqrt{U_0 - \beta^2}$, $c_n^2 = \frac{\beta_n^2(U_0 - \beta_n^2)}{U_0(1 + \beta_n l)} e^{2\beta_n l}$, $n = \overline{1, N}$.

9.21. $R(k) = \frac{\Gamma(ikl) \Gamma\left(\frac{1+\sigma}{2} - ikl\right) \Gamma\left(\frac{1-\sigma}{2} - ikl\right)}{\pi \Gamma(-ikl)} \cos \frac{\pi\sigma}{2}$, $n = 1, 2, \dots, N < \frac{1+\sigma}{2}$.

У к а з а н и е. Последовательные замены $x = \xi l$, $2\eta = 1 + \operatorname{th} \xi$, $\psi = [\eta(1 - \eta)]^{-ikl/2} v$ сводят уравнение Шредингера к гипергеометрическому уравнению с параметрами $\alpha = \frac{1+\sigma}{2} - ikl$, $\beta = \frac{1-\sigma}{2} - ikl$, $\gamma = 1 - ikl$. Решение имеет вид

$$\psi = (1 - \eta)^{-\frac{ikl}{2}} \left[A \eta^{-\frac{ikl}{2}} F(\alpha, \beta, \gamma, \eta) + B \eta^{\frac{ikl}{2}} F(\alpha - \gamma + 1, \beta - \gamma + 1, 2 - \gamma, \eta) \right].$$

Если $x \rightarrow -\infty$, то $\eta \approx \exp(2x/l)$, поэтому $\psi = A \exp(-ikx) + B \exp(ikx)$, откуда $A = 1$, $B = 0$. Если $x \rightarrow +\infty$, то $1 - \eta \approx \exp(-2x/l)$, т.е. $\eta \rightarrow 1$. Для вычисления $F(\alpha, \beta, \gamma, 1)$ применить (1.159), т. 1.

9.22. Нет. Потенциал (9.28) не отражает те волны, для которых $2l\sqrt{k^2 + U_0} = \pi n$, $n \in \mathbb{N}$.

9.23. $l^2 U_0 = N(N + 1)$, $N \in \mathbb{N}$.

9.24. $R(k) = 0$, $\beta_n = \frac{n}{l}$, $c_n^2 = \frac{(N + n)!}{l(N - n)!(n - 1)!n!}$, $n = \overline{1, N}$.

9.26. $u(x) = -\frac{d^2 \ln \Delta}{dx^2}$, $\Delta = \det A$, $(A)_{ij} = \delta_{ij} + \frac{c_i c_j}{\beta_i + \beta_j} e^{-(\beta_i + \beta_j)x}$, $i, j = \overline{1, N}$.

У к а з а н и е. При $g_j(x) = c_j \exp(-\beta_j x)$ уравнение ГЛМ (9.32) совпадает с уравнением (4.33) т. 1.

9.27. $\mathcal{A} = -D$, $\mathcal{L} = -D^2 - u$.

9.28. Р е ш е н и е. Пара Лакса $(\mathcal{L} - \mathcal{A})$ состоит из операторов $\mathcal{L} = -D^2 - u$ и $\mathcal{A} = \alpha_1(D^3 + bD + Db)$, который определен формулой (9.41) при $m = 1$. Коммутатор

$$[\mathcal{L}, \mathcal{A}]\psi = \alpha_1[(4b_x - 3u_x)\psi_{xx} + (4b_{xx} - 3u_{xx})\psi_x + (b_{xxx} - u_{xxx} - 2bu_x)\psi]$$

будет оператором умножения, если $4b_x - 3u_x = 0$, откуда $b = \frac{3}{4}u + f(t)$. При $\alpha_1 = 4$ и $f(t) = 0$ уравнение (9.40) принимает форму $u_t + 6uu_x + u_{xxx} = 0$, а оператор $\mathcal{A}$ имеет вид (9.42).

9.29. $\mathcal{A} = -16D^5 - 20(uD^3 + D^3u) + 5[(D^2u - 3u^2)D + D(D^2u - 3u^2)]$.

9.30. $R(k, t) = R(k, 0)e^{8ik^3t}$, $c_n^2(t) = c_n^2(0)e^{8\beta_n^3t}$, $n = 1, 2, \dots, N$.

Решение. Функция $\psi(x, t)$, удовлетворяющая уравнению Шредингера $\mathcal{L}(t)\psi = k^2\psi$, где $\mathcal{L}(t)$ имеет вид (9.36), есть также решение уравнения (9.39). Пусть функция $\psi(x, t) = h(k, t)f^-(x, k, t)$, тогда согласно формулам (9.13), (9.11)

$$\psi(x, t) = \begin{cases} h(k, t)e^{-ikx}, & x \rightarrow \infty, \\ h(k, t)(a(k, t)e^{-ikx} + b(k, t)e^{ikx}), & x \rightarrow +\infty. \end{cases}$$

При $x \rightarrow \pm\infty$ уравнение (9.39), в котором оператор $\mathcal{A}$ определен выражением (9.42), переходит в $\psi_t = -4\psi_{xxx}$. Функция $\psi(x, t)$ удовлетворяет последнему уравнению при условиях

$$h_t e^{-ikx} = -4(-ik)^3 e^{-ikx}, \\ (h_t a + h a_t) e^{-ikx} + (h_t b + h b_t) e^{ikx} = -4(-ik)^3 h a e^{-ikx} - 4(ik)^3 h b e^{ikx}.$$

Отсюда $a_t = 0$, $b_t = 8ik^3b$, следовательно,

$$a(k, t) = a(k, 0), \quad b(k, t) = b(k, 0)e^{8ik^3t}, \quad R(k, t) = R(k, 0)e^{8ik^3t}.$$

В случае дискретного спектра

$$\psi_n(x, t) = \begin{cases} h(i\beta_n, t)e^{\beta_n x}, & x \rightarrow -\infty, \\ h(i\beta_n, t)b_n(t)e^{-\beta_n x}, & x \rightarrow +\infty. \end{cases}$$

Аналогичные выкладки дают:

$$b_n(t) = b_n(0)e^{8\beta_n^3t}, \quad c_n^2(t) = c_n^2(0)e^{8\beta_n^3t}, \quad n = 1, 2, \dots, N.$$

9.31. $(k, t) = R(k, 0)e^{32i\beta_n^5t}$, $c_n^2(t) = c_n^2(0)e^{32\beta_n^5t}$, $n = 1, 2, \dots, N$.

9.32. $u(x, t) = \frac{2}{l^2 \operatorname{ch}^2\left(\frac{x}{l} - \frac{4t}{l^3}\right)}$, $v_0 = 2a_0$.

Решение. Потенциалу $-u(x, 0)$ соответствуют данные рассеяния (задача 9.24)

$$s(0) = \left\{ R(k, 0) = 0, \quad \beta_1 = \frac{1}{l}, \quad c_1^2(0) = \frac{2}{l} \right\},$$

а потенциалу $u(x, t)$ — данные рассеяния (задача 9.30)

$$s(t) = \left\{ R(k, t) = 0, \quad \beta_1 = \frac{1}{l}, \quad c_1^2(t) = \frac{2}{l} e^{\frac{8t}{l^3}} \right\}.$$

Функция $-u(x, t)$ определяется формулой (задача 9.26)

$$-u(x, t) = -2 \frac{d^2}{dx^2} \ln \det A,$$

где матрица $A = \left(1 + \exp\left(-\frac{2x}{l} + \frac{8t}{l^3}\right)\right)$.

9.33. $u(x, t) = \frac{2}{\operatorname{ch}^2(x - 16t)}$.

$$9.34. 1) u(x, t) = \frac{2\beta^2}{\operatorname{ch}^2(\beta x - 4\beta^3 t + \delta)}; \quad 2) u(x, t) = \frac{2\beta^2}{\operatorname{ch}^2(\beta x - 16\beta^5 t + \delta)}.$$

$$9.35. 1) \zeta(x, t) = \frac{\zeta_0}{\operatorname{ch}^2 \left[\sqrt{\frac{3\zeta_0}{4h^3}} (x - Vt) + \delta \right]}, \quad V = a \left(1 + \frac{\zeta_0}{2h} \right), \quad \text{где } a = \sqrt{gh};$$

$$2) \zeta_0 = \frac{2h^3}{3l^2} N(N+1).$$

У к а з а н и е. Сделать замену: $\xi = x - at$, $\tau = t$.

9.36.

$$u(x, t) = 2(\beta_2^2 - \beta_1^2) \frac{\beta_1^2 \operatorname{cosech}^2 \eta_2 + \beta_1^2 \operatorname{sech}^2 \eta_1}{(\beta_2 \operatorname{cth} \eta_2 - \beta_1 \operatorname{th} \eta_1)^2}, \quad (9.140)$$

$$\eta_j = \beta_j x - 4\beta_j^3 t - \delta_j, \quad \delta_j = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{c_j^2}{2\beta_j} \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_2 + \beta_1} \right), \quad j = 1, 2.$$

Р е ш е н и е. Потенциал $u(x, t)$ восстанавливается по данным рассеяния (задача 9.30)

$$s(t) = \{R(k, t) = 0, \beta_1, \beta_2, c_1^2 e^{8\beta_1^3 t}, c_2^2 e^{8\beta_2^3 t}\}, \quad 0 < \beta_1 < \beta_2,$$

с помощью формулы $u(x, t) = 2 \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\Delta} \frac{d\Delta}{dx} \right)$, в которой $\Delta = \det A$,

$$(A)_{ij} = \delta_{ij} + \frac{c_i c_j}{\beta_i + \beta_j} e^{\alpha_i + \alpha_j}, \quad \alpha_i = -\beta_i x + 4\beta_i^3 t, \quad i, j = 1, 2.$$

Пусть $p_1 = \frac{c_1^2}{2\beta_1}$, $p_2 = \frac{c_2^2}{2\beta_2}$, $p^2 = p_1 p_2 \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_2 + \beta_1} \right)^2$, $p = e^{\varphi_1}$, $\sqrt{\frac{p_2}{p_1}} = e^{\varphi_2}$, $\gamma_1 = \alpha_2 + \alpha_1 + \varphi_1$, $\gamma_2 = \alpha_2 - \alpha_1 + \varphi_2$, тогда

$$\Delta = 1 + p_1 e^{2\alpha_1} + p_2 e^{2\alpha_2} + p^2 e^{2(\alpha_1 + \alpha_2)} = 2\sqrt{p_1 p_2} e^{\alpha_1 + \alpha_2} \left(\operatorname{ch} \gamma_2 + \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_2 + \beta_1} \operatorname{ch} \gamma_1 \right),$$

$$\frac{d\Delta}{dx} = -(\beta_1 + \beta_2) \Delta - 2\sqrt{p_1 p_2} e^{\alpha_1 + \alpha_2} (\beta_2 - \beta_1) (\operatorname{sh} \gamma_1 + \operatorname{sh} \gamma_2), \quad \delta_{1,2} = \frac{\varphi_1 \mp \varphi_2}{2},$$

$$u(x, t) = 2 \frac{d}{dx} \left(\frac{\Delta_x}{\Delta} \right) = -2 \frac{d}{dx} \left[\beta_1 + \beta_2 + \frac{\beta_2^2 - \beta_1^2}{\beta_2 \operatorname{cth}(\alpha_2 + \delta_2) - \beta_1 \operatorname{th}(\alpha_1 + \delta_1)} \right].$$

Структура решения (9.139) упрощается при $t \rightarrow \pm\infty$. Пусть сначала $t \rightarrow -\infty$. Для значений x и t , при которых $\eta_1 = C_1$, величина

$$\eta_2 = -4(\beta_2^2 - \beta_1^2)\beta_2 t + \frac{1}{\beta_1}(\delta_1\beta_2 - \delta_2\beta_1) + \frac{\beta_2}{\beta_1} C_1 \rightarrow +\infty,$$

следовательно,

$$u(x, t) = \frac{2(\beta_2^2 - \beta_1^2)\beta_1^2 \operatorname{sech}^2 \eta_1}{(\beta_2 - \beta_1 \operatorname{th} \eta_1)^2} = \frac{2\beta_1^2}{\operatorname{ch}^2(\beta_1 x - 4\beta_1^3 t - \delta_1 - \varphi)}, \quad \varphi = \frac{1}{2} \ln \frac{\beta_2 + \beta_1}{\beta_2 - \beta_1}.$$

Для значений x и t , при которых $\eta_2 = C_2$, величина $\eta_1 \rightarrow -\infty$, поэтому

$$u(x, t) = \frac{2(\beta_2^2 - \beta_1^2)\beta_2^2 \operatorname{cosech}^2 \eta_2}{(\beta_2 \operatorname{cth} \eta_2 + \beta_1)^2} = \frac{2\beta_2^2}{\operatorname{ch}^2(\beta_2 x - 4\beta_2^3 t - \delta_2 + \varphi)}.$$

Итак, решение состоит из двух солитонов; второй, имеющий большую скорость, следует за первым.

Если $t \rightarrow +\infty$, то

$$u(x, t) = \frac{2\beta_1^2}{\operatorname{ch}^2(\beta_1 x - 4\beta_1^3 t - \delta_1 - v f)} + \frac{2\beta_2^2}{\operatorname{ch}^2(\beta_2 x - 4\beta_2^3 t - \delta_2 + v f)}.$$

Таким образом, в процессе движения двух солитонов происходит их взаимодействие, в результате которого второй солитон опережает первый; форма и скорость солитонов не изменяются, сдвиги фаз второго и первого солитонов -2φ и 2φ соответственно.

9.37. Решение. С учетом зависимости данных рассеяния от t (задача 9.30) функция $u(x, t)$ определяется формулой (задача 9.26) $u(x, t) = 2 \frac{d^2}{dx^2} \ln \Delta$, в которой

$$\Delta = \det(I + A) = \det(\delta_{ij} + q_{ij} e^{\alpha_i + \alpha_j}) = e^{2 \sum_{m=1}^N \alpha_m} \det \left(e^{-2\alpha_j} \delta_{ij} + q_{ij} \right),$$

$$q_{ij} = \frac{c_i c_j}{\beta_i + \beta_j}, \quad \alpha_i = -\beta_i(x - 4\beta_i^2 t), \quad i, j = 1, 2, \dots, N.$$

Выражение для функции $u(x, t)$ упрощается при больших по модулю значениях t . Если $\alpha_k = C_k$, то при $t \rightarrow \pm\infty$ остальные величины

$$\alpha_j = 4\beta_j(\beta_j^2 - \beta_k^2)t + \frac{\beta_j}{\beta_k} C_k \rightarrow \begin{cases} \mp\infty, & j < k, \\ \pm\infty, & j > k. \end{cases}$$

Пусть $t \rightarrow +\infty$, тогда в диагональных элементах $\exp(-2\alpha_j) + q_{jj}$ определителя $\det(\delta_{ij} \exp(-2\alpha_i) + q_{ij})$ останется первое слагаемое при $j < k$, второе — при $j > k$, оба слагаемые при $j = k$. Если затем вынести за знак определителя множители $\exp(-2\alpha_1), \exp(-2\alpha_2), \dots, \exp(-2\alpha_{k-1})$, то в строках с номерами $i = 1, 2, \dots, k-1$ главными членами будут единицы, расположенные на главной диагонали (остальные элементы с увеличением t стремятся к нулю). Поэтому

$$\Delta = e^{2 \sum_{m=k+1}^N \alpha_m} D_{k+1} + e^{2 \sum_{m=k}^N \alpha_m} D_k,$$

где

$$D_k = \prod_{i=k}^N c_i^2 \cdot \det B, \quad (B)_{ij} = \frac{1}{\beta_i + \beta_j}, \quad i, j = k, k+1, \dots, N.$$

Для вычисления $\det B$ удобно привлечь более общий определитель G с элементами $1/(\beta_i + x_j)$, $i, j = 1, 2, \dots, n$. Такой определитель равен отношению многочленов степеней $n-1$ и n относительно β_j, x_j и обращается в нуль при $\beta_i = \beta_k$ или $x_j = x_m$, где $1 \leq k, m \leq n$. Поэтому

$$\det G = C_n \frac{\prod_{i=1}^{n-1} \prod_{j=i+1}^n (\beta_i - \beta_j)(x_i - x_j)}{\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n (\beta_i + x_j)}.$$

При $x_k = \beta_k$

$$\det G = \frac{C_n}{2^n \beta_1 \beta_2 \dots \beta_n} \prod_{i=1}^{n-1} \prod_{j=i+1}^n \left(\frac{\beta_i - \beta_j}{\beta_i + \beta_j} \right)^2.$$

Для определения постоянной C_n нужно умножить обе части последнего равенства на произведение $2^n \beta_1 \beta_2 \dots \beta_n$ и перейти к пределу при $\beta_j \rightarrow \infty$, $j = 2, 3, \dots, n$. В результате $C_n = 1$,

$$D_k = \frac{c_k^2 c_{k+1}^2 \dots c_N^2}{2^{N-k+1} \beta_k \beta_{k+1} \dots \beta_N} \prod_{i=k}^{N-1} \prod_{j=i+1}^N \left(\frac{\beta_i - \beta_j}{\beta_i + \beta_j} \right)^2.$$

Так как

$$\frac{d\Delta}{dx} = -2 \left(\sigma_{k+1} e^{2 \sum_{m=k+1}^N \alpha_m} D_{k+1} + \sigma_k e^{2 \sum_{m=k}^N \alpha_m} D_k \right), \quad \sigma_k = \sum_{j=k}^{j=N} \beta_j,$$

поэтому

$$\begin{aligned} u(x, t) &= -4 \frac{d}{dx} \frac{\sigma_{k+1} D_{k+1} + \sigma_k D_k e^{2\alpha_k}}{D_{k+1} + D_k e^{2\alpha_k}} = \frac{8\beta_k^2}{\left(\sqrt{\frac{D_{k+1}}{D_k}} e^{-\alpha_k} + \sqrt{\frac{D_k}{D_{k+1}}} e^{\alpha_k} \right)^2} = \\ &= \frac{2\beta_k^2}{\operatorname{ch}^2(\alpha_k - \varphi_k^+)} = \frac{2\beta_k^2}{\operatorname{ch}^2(\beta_k x - \beta_k^3 t + \varphi_k^+)}, \quad \varphi_k^+ = \frac{1}{2} \ln \frac{c_k^2}{2\beta_k} \prod_{j=k+1}^N \left(\frac{\beta_j + \beta_k}{\beta_j - \beta_k} \right)^2. \end{aligned}$$

Таким образом, при достаточно большом фиксированном значении $t > 0$ функция $u(x, t)$ отлична от нуля в окрестности точек $x_k = 4\beta_k^2 t - \frac{1}{\beta_k} \varphi_k^+$ (вне этих окрестностей $u(x, t)$ экспоненциально мала), т.е. является суперпозицией N солитонов. Солитоны движутся в положительном направлении оси Ox и расположены в порядке возрастания скоростей $v_k = 4\beta_k^2$, где $k = 1, 2, \dots, N$.

Аналогично, при $t \rightarrow \infty$ и $\alpha_k = C_k$

$$u(x, t) = \frac{2\beta_k^2}{\operatorname{ch}^2(\beta_k x - 4\beta_k^3 t + \varphi_k^-)}, \quad \varphi_k^- = \frac{1}{2} \ln \frac{c_k^2}{2\beta_k} \prod_{j=1}^{k-1} \left(\frac{\beta_k + \beta_j}{\beta_k - \beta_j} \right)^2,$$

т.е. солитоны расположены в порядке убывания скоростей.

Полный сдвиг фаз k -го солитона

$$\Delta\varphi_k = \varphi_k^+ - \varphi_k^- = \ln \prod_{j=k+1}^N \left(\frac{\beta_j + \beta_k}{\beta_j - \beta_k} \right) - \ln \prod_{j=1}^{k-1} \left(\frac{\beta_k + \beta_j}{\beta_k - \beta_j} \right).$$

Сравнение со сдвигом фаз при взаимодействии двух солитонов (задача 9.36) показывает, что $\Delta\varphi_k$ — сумма сдвигов фаз при взаимодействии k -го солитона с теми, которые сначала ему предшествуют (их $k-1$), и с теми, которым он предшествует (их $N-k$).

9.38. У к а з а н и е. Интегральное уравнение (6.54) для функции $f^+(x, k)$ заменой $\chi = f^+ e^{-ikx}$ привести к виду

$$\chi(x, k) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \int_x^\infty P(x, \xi, k) e^{-ik(\xi-x)} \chi(\xi, k) d\xi \quad (9.141)$$

и решать методом последовательных приближений. Для исследования сходимости ряда Неймана установить оценку

$$\| \mathcal{K}^n \chi_0 \| \leq \begin{cases} \frac{V^n(x)}{n!}, & 0 \leq \beta, \\ F(x) e^{2\beta x} \frac{V^{n-1}(x)}{(n-1)!}, & \beta = \operatorname{Im} k, \end{cases}$$

где

$$-\beta_0 < \beta < x, \quad \chi_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad V(x) = 2M \int_x^\infty e^{-2\beta_0|\xi|} d\xi, \quad F(x) = 2M \int_x^\infty e^{-2\beta_0|\xi| - 2\beta\xi} d\xi.$$

9.42. $W[f^+, \tilde{f}^+] = -1$, $W[f^-, \tilde{f}^-] = 1$.

9.43. У к а з а н и е. Исключить χ_2 (χ_1) из системы (9.141); интеграл в полученном уравнении для χ_1 (χ_2) проинтегрировать по частям и воспользоваться оценкой (9.49).

9.44. Р е ш е н и е. 1) Существование матрицы S — следствие линейной независимости f^+ и $\tilde{f}^+$ (задача 9.42); 2) так как $\det(f^- \tilde{f}^-) = \det(f^+ \tilde{f}^+) \cdot \det S$, то $\det S = -1$; 3) формулы следуют из представлений (9.52) и оценок (9.50).

9.45. Р е ш е н и е. Функции f^-, g^- удовлетворяют уравнениям $\mathcal{L}_j \psi = k\psi$, где $j = 1, 2$, или в подробной записи (верхний индекс у f и g временно опущен)

$$\begin{aligned} f_{1x} - q_1 f_2 + ik f_1 &= 0, \\ -f_{2x} - r_1 f_1 + ik f_2 &= 0, \\ g_{1x} - q_2 g_2 + ik g_1 &= 0, \\ -g_{2x} - r_2 g_1 + ik g_2 &= 0. \end{aligned}$$

Если 1-е и 3-е уравнения умножить, соответственно, на g_1, f_1 и результаты сложить, затем подобную процедуру проделать со 2-м и 4-м уравнениями, то получатся тождества

$$\begin{aligned} (f_1 g_1)_x - (q_1 f_2 g_1 + q_2 f_1 g_2) + 2ik f_1 g_1 &= 0, \\ -(f_2 g_2)_x - (r_1 f_1 g_2 + r_2 f_2 g_1) + 2ik f_2 g_2 &= 0. \end{aligned} \quad (9.142)$$

Посредством аналогичных действий из 1-го, 4-го и 2-го, 3-го уравнений получаются еще два тождества

$$\begin{aligned} (f_1 g_2)_x - (q_1 f_2 g_2 + r_2 f_1 g_1) &= 0, \\ -(f_2 g_1)_x - (q_2 f_2 g_2 + r_1 f_1 g_1) &= 0. \end{aligned} \quad (9.143)$$

Асимптотика (9.50) решений Йоста такова, что

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f_1 g_2 = \lim_{x \rightarrow -\infty} f_2 g_1 = 0.$$

Благодаря этому тождества (9.143) можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} f_1(x, k) g_2(x, k) &= \int_{-\infty}^x (q_1 f_2 g_2 + r_2 f_1 g_1) d\xi, \\ f_2(x, k) g_1(x, k) &= \int_{-\infty}^x (q_2 f_2 g_2 + r_1 f_1 g_1) d\xi. \end{aligned} \quad (9.144)$$

При $x \rightarrow +\infty$ левые части формул (9.144) имеют пределы $a_1 b_2$ и $a_2 b_1$ (см. задачу 9.44.3). Равенства (9.54) являются результатом сложения и вычитания предельных (при $x \rightarrow +\infty$) выражений (9.144). Если теперь взять решения Йоста $\tilde{f}^-, \tilde{g}^-$, то повторение проделанных выкладок приведет к равенствам (9.55).

9.47. У к а з а н и е. 1) Решения Йоста в форме (6.54) подставить в (9.52). Решение п. 2. Выражение для $b(k)$, полученное в предыдущем пункте, после подстановки в него f_1^- в форме (6.54) и интегрирования по частям, преобразуется к виду

$$\begin{aligned} b(k) = \frac{1}{2ik} \left[\int_{-\infty}^{\infty} e^{-2ik\xi} r'(\xi) d\xi + \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2ik\xi} r'(\xi) d\xi \int_{-\infty}^{\xi} e^{ik\eta} q(\eta) f_2^-(\eta, k) d\eta + \right. \\ \left. + \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik\xi} r(\xi) q(\xi) f_2^-(\xi, k) d\xi \right]. \end{aligned}$$

Последние два интеграла содержат функцию f_2^- , поэтому их порядок $O\left(\frac{1}{k}\right)$ (задача 9.43). Такой же порядок имеет первый интеграл, что проверяется интегрированием по частям.

9.48. У к а з а н и е, п. 1. Записать уравнение (9.44) в форме $M(k)\psi(x, k) = 0$, где

$$\mathcal{M}(k) = \begin{pmatrix} D + ik & -q \\ -\bar{q} & -D + ik \end{pmatrix}.$$

Применив преобразование $A\overline{\mathcal{M}}(k)A = \mathcal{M}(\bar{k})$ (матрица A определена в примере 9.7), показать, что функция $\psi(x, k)$ удовлетворяет также уравнению $\mathcal{M}(k)A^\tau\overline{\psi}(x, \bar{k}) = 0$. Затем установить формулы

$$\tilde{f}^+(x, k) = A^\tau \tilde{f}^+(x, \bar{k}), \quad \tilde{f}^-(x, k) = A \tilde{f}^-(x, \bar{k}) \quad (9.145)$$

и воспользоваться разложениями (9.52).

9.49. У к а з а н и е. Функции $K_1, K_2, (\tilde{K}_1, \tilde{K}_2)$ являются решением задачи Гурса (8.46), что доказывается подстановкой $f^+ (\tilde{f}^+)$ в форму (9.56) в уравнение (9.44).

9.50. У к а з а н и е. Соотношение $\tilde{K} = A^\tau \overline{K}$ получается из представлений (9.56) после подстановки функции $\tilde{f}^+$ в форму (9.145); см. также задачу 9.48.

9.51.

$$1) K(x, y) - \overline{F}(x + y) \left(\frac{1}{0} \right) + \int_x^\infty A \overline{K}(x, z) \overline{F}(y + z) dz = 0; \quad (9.146)$$

$$2) K(x, y) - F(x + y) \left(\frac{1}{0} \right) - \int_x^\infty A K(x, z) F(y + z) dz = 0; \quad (9.147)$$

3) уравнение имеет вид (9.147), при этом $\overline{K} = K, \overline{F} = F$; функции K_1, K_2 удовлетворяют уравнениям

$$K_1(x, y) - F(x + y) + \int_x^\infty \int_x^\infty K_1(x, s) F(s + z) F(y + z) ds dz = 0, \quad (9.148)$$

$$K_2(x, y) + \int_x^\infty F(x + s) F(y + s) ds + \\ + \int_x^\infty \int_x^\infty K_2(x, s) F(s + z) F(y + z) ds dz = 0. \quad (9.149)$$

9.52.

$$1) q(x) = -2\overline{g}^\tau(x)A^{-1}(x)\overline{g}(x), \quad A = I + \overline{H}H, \quad (9.150)$$

$$g_j = \sqrt{\overline{c}_j} e^{ik_j x}, \quad h_{mn} = i \frac{\sqrt{c_m \overline{c}_n} e^{i(k_m - \overline{k}_n)x}}{k_m - \overline{k}_n};$$

$$2) q(x) = 2 \frac{d}{dx} \arctg \frac{\operatorname{Im} \det(I - iH)}{\operatorname{Re} \det(I - iH)}, \quad (9.151)$$

$$h_{mn} = i \frac{\sqrt{c_m \overline{c}_n} e^{i(k_m + k_n)x}}{k_m + k_n}, \quad j, m, n = \overline{1, N},$$

где $\overline{c}_m = c_m$, если $\operatorname{Re} k = 0$, $c_1 = \overline{c}_2$, если $k_{1,2} = \pm\alpha + i\beta$, $m, n = \overline{1, N}$.

У к а з а н и е. 1) См. задачу 4.358. 2) Р е ш е н и е. 2) Уравнения (9.148), (9.149) совпадают с уравнениями (4.34), (4.35), в которых

$$u(x, y) = K_{1,2}(x, y), \quad K(x, y) = \overline{K}(x, y) = F(x + y), \\ g_j(x) = \sqrt{c_j} \exp(ik_j x), \quad j = \overline{1, N}.$$

Следовательно,

$$K_1(x, x) = g^T(x) A^{-1}(x) g(x) = \sum_{j,k=1}^N g_j(A^{-1})_{jk} g_k = - \sum_{j,k=1}^N (A^{-1})_{jk} h'_{kj} = -\text{tr}(H'A^{-1}), \\ K_2(x, x) = \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \ln \Delta, \quad \Delta = \det(I + H^2).$$

С другой стороны, $K_1(x, y)$ и $K_2(x, y)$ представляет собой решение задачи Гурса (8.46) (см. задачу 9.49). Из второго уравнения системы (8.46) при $x = y$ следует, что

$$\frac{d}{dx} K_2(x, x) = r(x) K_1(x, x) = -\frac{1}{2} r(x) q(x) = \frac{1}{2} q^2(x),$$

откуда

$$q^2(x) = 2 \frac{d}{dx} K_2(x, x) = \frac{d^2}{dx^2} \ln \det(I + H^2).$$

Вместе с тем $q(x) = -2K_1(x, x) = 2\text{tr}(A^{-1}H')$. Более удобное выражение для $q(x)$ можно получить, составив сумму

$$q^2 + iq' = 2 \frac{d}{dx} K_2(x, x) - 2i \frac{d}{dx} K_1(x, x) = -2i \frac{d}{dx} (A^{-1}H' + iA^{-1}HH') = \\ = -2i \frac{d}{dx} \text{tr}(A^{-1}(I + iH)H') = -2i \frac{d}{dx} \text{tr}[(I - iH)^{-1}(I + iH)^{-1}(I + iH)H'] = \\ = -2 \frac{d}{dx} \text{tr}[(I - iH)^{-1}H'] = -2 \frac{d}{dx} \text{tr}[(I - iH)^{-1}(I - iH)'] = \\ = 2 \frac{d^2}{dx^2} \ln \det(I - H).$$

В результате

$$iq' = 2 \frac{d^2}{dx^2} \ln \det(I - iH) - \frac{d^2}{dx^2} \ln \det(I + H^2) = \frac{d^2}{dx^2} \ln \frac{\det(I - iH)}{\det(I + iH)},$$

откуда

$$q(x) = \frac{1}{i} \frac{d}{dx} \ln \frac{\det(I - iH)}{\det(I + iH)} = 2 \frac{d}{dx} \arctg \frac{\text{Im} \det(I - iH)}{\text{Re} \det(I - iH)},$$

постоянная интегрирования равна нулю, так как $q(x)$ и $H(x)$ стремятся к нулю при $x \rightarrow \infty$. Из свойства $\overline{a}(k) = a(-k)$ (задача 9.48.3) следует, что $\overline{a}(k) = -\dot{a}(-k)$. Пусть $k_m = i\beta_m$, тогда $\overline{a}(i\beta_m) = -\dot{a}(i\beta_m)$ и $\overline{b}_m = b_m$, поэтому

$$\overline{c}_m = \frac{i\overline{b}_m}{\overline{a}(i\beta_m)} = -\frac{ib_m}{\dot{a}(i\beta_m)} = c_m.$$

Если $k_{1,2} = \pm\alpha + i\beta$, то $\overline{a}(k_1) = -\dot{a}(-\overline{k}_1) = -\dot{a}(k_2)$, и $\overline{b}_1 = b_2$, следовательно,

$$c_1 = -\frac{ib_1}{\dot{a}(k_1)} = \frac{i\overline{b}_2}{\overline{a}(k_2)} = \overline{c}_2.$$

$$9.53. 1) \mathcal{A} = \begin{pmatrix} \pm 2iq^2k - 4ik^3 & -q_{xx} \mp 2q^3 + 2iq_xk + 4qk^2 \\ \pm q_{xx} + 2q^3 \pm 2iq_xk \mp 4qk^2 & \mp 2iq^2k + 4ik^3 \end{pmatrix};$$

$$2) \mathcal{A} = \begin{pmatrix} \frac{i}{4k} \cos u & \frac{i}{4k} \sin u \\ \frac{i}{4k} \sin u & -\frac{i}{4k} \cos u \end{pmatrix}.$$

У к а з а н и я. 1) Решать систему (9.68) в виде многочленов третьей степени по k при условии $r = \mp q$, $\bar{q} = q$; 2) Решение системы (9.68) представить в виде $U = U_0/k$, $V = V_0/k$, $W = W_0/k$, полагая $r = -q = \frac{1}{2}u_x$, $U_0 = \frac{i}{4} \cos u$, $\bar{q} = q$; уравнение СГ является эволюционным для u_x .

9.54. $a(k, t) = a(k, 0)$, $b(k, t) = b(k, 0)e^{-2U_\infty(k)t}$, $b_j(t) = b_j(0)e^{-2U_\infty(k_j)t}$, $U_\infty(k) = \lim_{|x| \rightarrow \infty} U$, $j = 1, 2, \dots, N$; величина $U_\infty(k)$ равна: 1) $-4ik^3$; 2) $-2ik^2$; 3) $i/4k$.

9.55. $u(x, t) = \frac{2\beta e^{i(\delta - 2\alpha x - 4(\alpha^2 - \beta^2)t)}}{\operatorname{ch}(2\beta x + 8\alpha\beta t + \varepsilon)}$, $\beta > 0$, $\alpha + i\beta$ — простой нуль $a(k)$.

Р е ш е н и е. Функция $u(x, t)$ определяется формулой (9.150), в которой $N = 1$, $c = c(0) \exp(4ik^2t)$ (задача 9.54), $g = \sqrt{c} \exp(ikx)$, $h = \frac{|c| \exp(-2\beta x)}{2\beta}$. Следовательно,

$$u(x, t) = \frac{-2\bar{g}^2}{1 + |h|^2} = \frac{-2c(0)e^{-2i\alpha x - 2\beta x - 4i(\alpha^2 - \beta^2)t - 8\alpha\beta t}}{1 + \frac{1}{4\beta^2}|c(0)|^2 e^{-4\beta x - 16\alpha\beta t}}.$$

При $-\frac{\bar{c}(0)}{2\beta} = e^{i\delta - \varepsilon}$ получается выражение, приведенное в ответе.

9.56. $u(x, t) = \frac{\pm 2\beta}{\operatorname{ch}(2\beta x - 8\beta^3 t + \varepsilon)}$, где $\beta > 0$, $i\beta$ — простой нуль функции $a(k)$; $v_0 = 4\beta^2$, $u_0 = 2\beta$. У к а з а н и е. Применить формулу (9.151).

9.57. $u(x, t) = \pm(\beta_2^2 - \beta_1^2) \frac{\beta_2 \operatorname{ch} 2\eta_1 + \beta_1 \operatorname{ch} 2\eta_2}{(\beta_2 + \beta_1)^2 \operatorname{ch}^2(\eta_2 - \eta_1) + (\beta_2 - \beta_1)^2 \operatorname{sh}^2(\eta_2 + \eta_1)},$

$$u(x, t) = \pm(\beta_2^2 - \beta_1^2) \frac{\beta_2 \operatorname{ch} 2\eta_1 - \beta_1 \operatorname{ch} 2\eta_2}{(\beta_2 + \beta_1)^2 \operatorname{sh}^2(\eta_2 - \eta_1) + (\beta_2 - \beta_1)^2 \operatorname{ch}^2(\eta_2 + \eta_1)},$$

где $\eta_j = \beta_j + 4\beta_j^3 t + \delta_j$, δ_j — вещественные константы, $j = 1, 2$, сдвиги фаз $\Delta\varphi_{1,2} = \mp 2 \ln \frac{\beta_2 + \beta_1}{\beta_2 - \beta_1}$.

У к а з а н и е. Применить формулу (9.151) и рассмотреть случаи $c_1(0)c_2(0) > 0$ и $c_1(0)c_2(0) < 0$.

9.58. $u(x, t) = \pm 4\beta \operatorname{sech} \mu \frac{\cos \nu - \frac{\beta}{\alpha} \sin \nu \cdot th \mu}{1 + \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2 \nu \operatorname{sech}^2 \mu}$, где $\mu = 2\beta x + 8\beta(3\alpha^2 - \beta^2)t +$

$+\delta$, $\nu = 2\alpha x + 8\alpha(\alpha^2 - 3\beta^2)t + \varepsilon$, δ и ε — вещественные константы. Фазовая скорость $4(\alpha^2 - 3\beta^2)$, скорость огибающей $4(3\alpha^2 - \beta^2)$.

У к а з а н и е. Воспользоваться формулой (9.151), в которой $\bar{c}_2 = c_1$, $k_2 = -\bar{k}_1$.

9.59. $u(x, t) = 4 \operatorname{arctg} e^{\pm(2\beta x + \frac{t}{2\beta} + \delta)}$, $\beta > 0$, δ — вещественная константа.

Решение. Данные рассеяния $s(0) = \{R(k, 0) = 0, i\beta, c(0)\}$ соответствуют потенциалу $q(x, 0) = -\frac{1}{2}u_x(x, 0)$ (задача 9.53, п. 2). Потенциал $q(x, t) = -\frac{1}{2}u_x(x, t)$ восстанавливается по формуле (9.151), где $c(t) = c(0) \exp\left(-\frac{t}{2\beta}\right)$ (задача 9.54, п. 3), $c(0)$ — вещественная константа (задача 9.52, п. 2). Таким образом,

$$u_x(x, t) = -2q(x, t) = -4 \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{arctg} \frac{c(0)}{2\beta} e^{-2\beta x - \frac{t}{2\beta}}.$$

Если $c(0) > 0$, то $c_0 = 2\beta e^{-\delta}$ и $u(x, t) = -4 \operatorname{arctg} \exp(-\delta - 2\beta x - \frac{t}{2\beta}) + C$, где $C = u(+\infty, t) + 2\pi = 2\pi$. Следовательно,

$$u(x, t) = 4 \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} e^{-(\delta + 2\beta x + \frac{t}{2\beta})} \right) = 4 \operatorname{arctg} e^{-(2\beta x + \frac{t}{2\beta} + \delta)}.$$

Если $c(0) < 0$, то решения нет. В случае 2) решение строится аналогично.

$$\mathbf{9.60.} \quad u(x, t) = \pm \operatorname{arctg} \left(\frac{\beta_2 + \beta_1}{\beta_2 - \beta_1} \frac{\operatorname{sh}(\eta_1 - \eta_2)}{\operatorname{ch}(\eta_1 + \eta_2)} \right),$$

$\eta_j = \beta_j x + \frac{t}{4\beta_j} + \delta_j$, $j = 1, 2$, $\delta_{1,2}$ — вещественные константы.

Решение. $u_x(x, t) = -2q(x, t)$, где $q(x, t)$ выражается формулой (9.151), в которой $c_j(t) = c_j(0)p(-\frac{t}{2\beta_j})$, $c_j(0)$ — вещественные числа, $j = 1, 2$. Элементы матрицы

$$h_{mn} = \frac{\sqrt{c_m c_n} e^{-(\beta_m + \beta_n)x}}{\beta_m + \beta_n}, \quad m, n = 1, 2,$$

определитель

$$\det(I - iH) = 1 - \frac{c_1 c_2}{4\beta_1 \beta_2} \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_2 + \beta_1} \right)^2 e^{-2(\beta_1 + \beta_2)x} - i \left(\frac{c_1}{2\beta_1} e^{-2\beta_1 x} + \frac{c_2}{2\beta_2} e^{-2\beta_2 x} \right).$$

Если $c_1 c_2 < 0$, то $u_x(x, t) = \pm 4 \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{arctg} \frac{e^{-2\eta_1} - e^{-2\eta_2}}{1 + e^{-2\eta_1 - 2\eta_2 - \varepsilon}}$, $\eta_j = \beta_j x + \frac{t}{4\beta_j} + \varepsilon_j$, $e^{-2\varepsilon_j} = \frac{|c_j(0)|(\beta_2 - \beta_1)}{2\beta_j(\beta_2 + \beta_1)}$, $j = 1, 2$. Отсюда

$$u(x, t) = \pm 4 \operatorname{arctg} \left(e^{\varepsilon} \frac{\operatorname{sh}(\eta_1 - \eta_2)}{\operatorname{ch}(\eta_1 + \eta_2)} \right) + C,$$

где $C = u(\pm\infty, t) = 0$. Если $c_1 c_2 > 0$, то решение разрывно. Взаимодействие кинков исследуется так же, как в задаче (9.38).

$$\mathbf{9.61.} \quad u(x, t) = \pm 4 \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh} \frac{v(\tau - \tau_0)}{\sqrt{1 - v^2}}}{v \operatorname{ch} \frac{\xi - \xi_0}{\sqrt{1 - v^2}}}, \quad v = \frac{1 - 4\beta_1^2}{1 + 4\beta_2^2}, \quad \beta_1 \neq \beta_2;$$

$$u(x, t) = \pm 4 \operatorname{arctg} \frac{\tau - \tau_0}{\operatorname{ch}(\xi - \xi_0)}, \quad \beta_1 = \beta_2 = \frac{1}{2}.$$

$$\mathbf{9.62.} \quad u(x, t) = \pm 4 \operatorname{arctg} \frac{\beta}{\alpha} \frac{\cos\left(2\alpha x - \frac{\alpha t}{2|k_1|^2} + \delta_1\right)}{\operatorname{ch}\left(2\beta x - \frac{\beta t}{2|k_1|^2} + \delta_2\right)}, \quad \delta_{1,2} — \text{вещественные параметры};$$

$$u(\xi, \tau) = \pm 4 \operatorname{arctg} \left[\frac{\beta}{\alpha} \frac{\cos \alpha((2-\nu)\xi + \nu(\tau - \tau_0))}{\operatorname{ch} \beta(\nu(\xi - \xi_0) + (2-\nu)\tau)} \right], \quad \nu = 1 + \frac{1}{4|k_1|^2}, \quad |k_1| \neq \frac{1}{2};$$

$$u(\xi, \tau) = \pm 4 \operatorname{arctg} \left[\frac{\sqrt{1-v^2}}{v} \frac{\cos(v(\tau - \tau_0))}{\operatorname{ch}(\sqrt{1-v^2}(\xi - \xi_0))} \right], \quad v = 2\alpha.$$

9.64. У к а з а н и е. Воспользоваться соответствием между АПБ (9.80) и соотношениями (9.79).

9.65. Р е ш е н и е. Умножение одного из уравнений (9.80) (они в данном случае одинаковы) на $q_1 + q_2$ и интегрирование дает

$$(q_1 + q_2)^2 + \left(\int_x^\infty (q_1^2 - q_2^2) d\xi \right)^2 + 4ik \int_x^\infty (q_1^2 - q_2^2) d\xi = 0,$$

где $k = k_1 = -\tilde{k}_1$ (задача 9.48, п. 2)). Если решить квадратное уравнение относительно интеграла и продифференцировать результат, то получится уравнение

$$q_1 - q_2 = \pm \frac{(q_1 + q_2)_x}{\sqrt{(2ik)^2 - (q_1 + q_2)^2}},$$

интегрирование которого приводит к ответу.

9.68. С м. о т в е т к задаче 9.56. У к а з а н и е. Решение уравнения $u = -w_x$, где w — решение системы

$$w_x = -2\beta \sin w,$$

$$w_t = -4\beta^2 w_x.$$

9.70. Р е ш е н и е. В данном случае $r = -\bar{q}$, $\bar{q} = q = -\frac{1}{2}u_x$; пусть $w_x = -q$, тогда $u = -2w$ и АПБ (9.82) примет вид

$$\left(\frac{u_1 + u_2}{2} \right)_x = 2ik \sin \frac{u_1 - u_2}{2}.$$

В результате дифференцирования по t и применения уравнения $u_{xt} = \sin u$ получается соотношение

$$\frac{1}{2}(\sin u_1 + \sin u_2) = ik \cos \frac{u_1 - u_2}{2} \cdot (u_1 - u_2)_t,$$

откуда

$$\sin \frac{u_1 + u_2}{2} = ik(u_1 - u_2)_t.$$

$$\mathbf{9.73} \quad u(x, t) = \pm 4 \operatorname{arctg} \frac{2\beta x - \frac{t}{2\beta}}{\operatorname{ch}(2\beta x + \frac{t}{2\beta} + \delta)}.$$

У к а з а н и е. Применить формулу (9.83), которая при $k_2 \rightarrow k_1 = i\beta$, $w_0 = 0$ переходит в

$$\operatorname{tg} \frac{u}{4} = -\frac{\beta}{2} \frac{\partial u_1}{\partial \beta},$$

где u_1 — однокинковое решение (см. задачу 9.59).

$$\mathbf{9.74.} \quad iu_{2x} = -u_{1y} + k \sin \frac{u_2 - u_1}{2} - \frac{1}{k} \sin \frac{u_1 + u_2}{2},$$

$$iu_{2y} = -iu_{1x} + k \sin \frac{u_2 - u_1}{2} + \frac{1}{k} \sin \frac{u_1 + u_2}{2},$$

$$u(x, y) = \pm 4 \operatorname{arctg} e^{x \sin \varphi + y \cos \varphi + \delta}, \quad 0 < \varphi < \pi.$$

У к а з а н и е. В уравнении СГ и в АПБ (9.85) сделать замену переменных $2x \rightarrow x + iy$, $2y \rightarrow x - iy$. Вещественное решение получается при $|k| = 1$.

9.75. Регулярное решение дано в ответе к задаче 9.55, сингулярное решение

$$u(x, t) = \frac{2\beta e^{i(\delta_1 - 2\alpha x - 4(\alpha^2 - \beta^2)t)}}{\operatorname{sh}(2\beta x + 8\alpha\beta t + \delta_2)}.$$

У к а з а н и е. Функция $u(x, t)$ — решение системы

$$\begin{aligned} u_x - u \int_x^\infty |u|^2 d\xi + 2i\bar{k}_1 u &= 0, \\ iuu_t + u_x^2 + u_2 |u|^2 &= 0. \end{aligned} \quad (9.152)$$

Первое уравнение получается из АПБ (9.80) при $r_1 = -\bar{q}_1$, $r_2 = -\bar{q}_2$, $q_1 = 0$, $q_2 = u$, $k_1 = \bar{k}_1$, $k_1 = \alpha + i\beta$, $\beta > 0$ (задача 9.58, п.1). Второе уравнение есть НУШ, в котором u_{xx} взята из продифференцированного первого уравнения. Следствием (9.152) является система

$$\begin{cases} w_x = w^2 - 4\beta^2, \\ w_t = 4\alpha w_x, \\ w = \int_x^\infty |u|^2 d\xi - 2\beta. \end{cases}$$

Ее решение определяет $|u|$. Чтобы найти $\arg u = \varphi(x, t)$, нужно в уравнения системы (9.152) подставить $u = |u| \exp(i\varphi)$.

9.76. Р е ш е н и е. Для построения АПБ (9.87) используется та же идея, которая приводит к АПБ (9.80). Пусть f_1^- и f_2^- (далее f_1 и f_2) — решения Йюста уравнения (9.27) для потенциалов $-u_1$ и $-u_2$ соответственно, тогда

$$\begin{aligned} f_{1xx} + (k^2 + u_1)f_1 &= 0, \\ f_{2xx} + (k^2 + u_2)f_2 &= 0, \end{aligned} \quad (9.153)$$

$$\begin{aligned} (f_{1xx}f_2)_x + (k^2 + u_1)(f_1f_2)_x + u_{1x}f_1f_2 &= 0, \\ (f_1f_{2xx})_x + (k^2 + u_2)(f_1f_2)_x + u_{2x}f_1f_2 &= 0. \end{aligned} \quad (9.154)$$

Перекрестное умножение уравнений (9.153) сначала на f_2 и f_1 и почленное вычитание, затем — на f_{2x} и f_{1x} с последующим сложением приводят к соотношениям

$$(f_{1x}f_2 - f_1f_{2x})_x + (u_1 - u_2)f_1f_2 = 0, \quad (9.155)$$

$$(f_{1x}f_{2x})_x + k^2(f_1f_2)_x + u_1f_1f_{2x} - u_2f_{1x}f_2 = 0. \quad (9.156)$$

Уравнения (9.154) и (9.156) являются источниками формулы

$$\begin{aligned} (f_{1xx}f_2 + f_1f_{2xx} - 2f_{1x}f_{2x})_x + (u_{1x} + u_{2x})f_1f_2 + \\ + (u_1 - u_2)(f_{1x}f_2 - f_1f_{2x}) = 0. \end{aligned} \quad (9.157)$$

Интегрирование по x от $-\infty$ до ∞ соотношений (9.155) и (9.157) с использованием разложения (9.13) и асимптотических представлений (9.11) превращает их в равенства

$$\begin{aligned} 2ika_1a_2(R_2 - R_1) &= - \int_{-\infty}^{\infty} (u_1 - u_2)f_1f_2d\xi, \\ -4k^2a_2(R_2 + R_1) &= - \int_{-\infty}^{\infty} (u_{1x} + u_{2x})f_1f_2d\xi - \int_{-\infty}^{\infty} (u_1 - u_2)(f_{1x}f_2 - f_1f_{2x})d\xi. \end{aligned}$$

Если второй интеграл во втором равенстве проинтегрировать по частям, применяя (9.155), и результат сложить с первым равенством, умноженным на $2k_1 > 0$, то получится соотношение, аналогичное (9.75),

$$4ka_1a_2 [ik_1(R_2 - R_1) - k(R_2 + R_1)] = \\ = - \int_{-\infty}^{\infty} \left[2k_1(u_1 - u_2) + u_{1x} + u_{2x} - (u_1 - u_2) \int_x^{\infty} (u_1 - u_2) d\xi \right] f_1 f_2 dx.$$

Отсюда

$$R_2 = -\frac{k + ik_1}{k - ik_1} R_1, \quad (9.158)$$

$$u_{1x} + u_{2x} + (u_1 - u_2) \left(2k_1 - \int_x^{\infty} (u_1 - u_2) d\xi \right) = 0. \quad (9.159)$$

Введение потенциальных функций

$$w_i = \frac{1}{2} \int_x^{\infty} u_i d\xi + C_i, \quad i = 1, 2, \quad C_1 - C_2 = -k_1,$$

преобразует уравнение (9.159) в первое уравнение системы (9.87). Второе АПБ получается взятием разности уравнений КдФ для $u_i = -2w_{ix}$, $i = 1, 2$, и интегрированием по x .

$$\mathbf{9.77.} \quad u(x, t) = \frac{2\beta^2}{\operatorname{ch}^2(\beta x - 4\beta^3 t + \delta_1)}, \quad u(x, t) = \frac{2\beta^2}{\operatorname{sh}^2(\beta x - 4\beta^3 t + \delta_2)}.$$

У к а з а н и е. Так как $u_1 = 0$ — решение уравнения КдФ, то при $w_1 = 0$, $w_2 = w$, $k_1 = \beta$ АПБ (9.87) принимают вид

$$w_x = w^2 - \beta^2, \quad w_t = -4\beta^2 w_x.$$

Решение первого уравнения имеет две формы

$$\operatorname{barcth} w = -\beta^2 x + C_1(t), \quad \operatorname{barccth} w = -\beta^2 x + C_2(t)$$

с произвольными функциями $C_{1,2}(t)$, которые определяются после подстановки во второе уравнение.

9.78. У к а з а н и е. Воспользоваться соответствием между АПБ (9.159) и соотношением (9.158).

9.80. См. ответ к задаче 9.36.

У к а з а н и е. В качестве w_1 и w_2 взять регулярное и сингулярное односолитонные решения (задача 9.36), $w_0 = 0$.

$$\mathbf{9.81.} \quad u(x, t) = \frac{2\beta^2}{\operatorname{ch}^2(\beta x - 16\beta^5 t + \delta_1)}, \quad u(x, t) = \frac{2\beta^2}{\operatorname{sh}^2(\beta x - 16\beta^5 t + \delta_2)}.$$

У к а з а н и е. Потенциальная функция w — решение системы

$$w_x = w^2 - \beta^2, \\ w_t = -16\beta^4 w.$$

9.82. 1) $\sigma = 1$, $\alpha = 1$, $\beta = \pm i$; $\sigma = -1$, $\alpha = -1$, $\beta = \pm 1$;

$$2) \sigma = 1, \begin{cases} \beta v_x + v^2 - u = 0, \\ v_t + 6v^2 v_x + v_{xxx} = 0; \end{cases} \quad \sigma = -1, \begin{cases} \beta v_x - v^2 - u = 0, \\ v_t - 6v^2 v_x + v_{xxx} = 0; \end{cases}$$

$$3) \sigma = 1, \quad v = \frac{\beta}{x + C}; \quad \sigma = -1, \quad v = \frac{-\beta}{x + C}.$$

$$9.83. \quad v_x = -\frac{1}{2\nu}vu, \quad v_t = \nu v_{xx}.$$

$$9.84. \quad u(x, t) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x-\xi}{t} e^{-\Phi(x, \xi, t)} d\xi}{\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\Phi(x, \xi, t)} d\xi},$$

$$\Phi(x, \xi, t) = \frac{1}{2\nu} \left[\left(\frac{x-\xi}{2t} \right)^2 + \int_0^\xi u_0(\eta) d\eta \right].$$

9.85. У к а з а н и е. Из условий интегрируемости $v_{xt} = v_{tx}$, $u_{xt} = u_{tx}$ следует, что $u_{xt} = \exp(\alpha u)$, если $v_{xt} = 0$, и наоборот.

$$9.86. \quad u(x, t) = f(x) - g(t) - \frac{2}{\alpha} \ln \left[k \int_{x_0}^x e^{\alpha f(\xi)} d\xi + \frac{\alpha}{2k} \int_{t_0}^t e^{-\alpha g(\tau)} d\tau \right],$$

где $f, g \in C^1$, k — параметр. У к а з а н и е. Соотношения (9.89), в которых $u(x, t)$ — решение уравнения Лиувилля, а $v(x, t) = f(x) + g(t)$ — общее решение волнового уравнения $v_{xt} = 0$, записать в виде

$$\begin{aligned} -\frac{\alpha}{2}(u - f(x))_x e^{-\frac{\alpha}{2}(u - f(x) + g(t))} &= k e^{\alpha f(x)}, \\ -\frac{\alpha}{2}(u - g(t))_t e^{-\frac{\alpha}{2}(u - f(x) + g(t))} &= \frac{\alpha}{2k} e^{-\alpha g(t)}, \end{aligned}$$

откуда

$$d e^{-\frac{\alpha}{2}(u - f(x) + g(t))} = k e^{\alpha f(x)} dx + \frac{\alpha}{2k} e^{-\alpha g(t)} dt.$$

9.88. Р е ш е н и е. Пусть $X = (x_1, x_2)$, $K = (k, -k^3)$ — двухмерные векторы. Из определения многочлена $P(x_1, x_2)$ вытекает, что

$$P(-x) = P(x), \text{ следовательно, } P(0) = 0, \quad P(K) = 0. \quad (9.160)$$

В силу свойства (9.98)

$$P(D_x, D_t) e^{\eta_1} \cdot e^{\eta_2} = \frac{P(K_1 - K_2)}{P(K_1 + K_2)} P(D_x, D_t) e^{\eta_1 + \eta_2} \cdot 1. \quad (9.161)$$

Многочлен $P(K_1 + K_2)$ — однородный симметрический многочлен 4-й степени. Он обращается в нуль при $k_1 = -k_2$, $k_1 = 0$, $k_2 = 0$ и не меняет форму при замене $k_i \rightarrow -k_i$, $i = 1, 2$, поэтому $P(K_1 + K_2) = k_1 k_2 (k_1 + k_2)^2$. Отсюда

$$\frac{P(K_1 - K_2)}{P(K_1 + K_2)} = - \left(\frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \right)^2 = -e^{A_{12}}. \quad (9.162)$$

Соотношение (9.100) устанавливается аналогично. Снова применяется свойство (9.98), на основании которого

$$p_{123} P(D_x, D_t) e^{\eta_1 + \eta_2 + A_{12}} \cdot e^{\eta_3} = \left[p_{123} \frac{P(K_1 + K_2 - K_3)}{P(K_1 + K_2 + K_3)} e^{A_{12}} \right] P(D_x, D_t) e^{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3} \cdot 1.$$

Выражение в квадратных скобках

$$p_{123} \frac{P(K_1 + K_2 - K_3)}{P(K_1 + K_2 + K_3)} e^{A_{12}} = -p_{123} \frac{P(K_1 + K_2 - K_3)}{P(K_1 + K_2 + K_3)} \frac{P(K_1 - K_2)}{P(K_1 + K_2)} = \frac{Q_1(k_1, k_2, k_3)}{Q_2(k_1, k_2, k_3)}$$

есть отношение двух однородных симметричных многочленов 16-й степени. Многочлен Q_1 , получающийся в результате действия оператора p_{123} на многочлен $P(K_1 + K_2 - K_3)P(K_1 - K_2)P(K_2 + K_3)P(K_3 + K_1)$, обращается в нуль

при $k_1 + k_2 + k_3 = 0$, $k_i \pm k_j = 0$, $i \neq j$, $k_i = 0$, $i = 1, 2, 3$, и не меняет знак при $k_i \rightarrow k_j$, $i \neq j$. Следовательно,

$$Q_1 = c_1 k_1^2 k_2^2 k_3^2 (k_1 + k_2)(k_2 + k_3)(k_3 + k_1)(k_1 - k_2)^2 (k_2 - k_3)^2 (k_3 - k_1)^2 (k_1 + k_2 + k_3).$$

Многочлен $P(K_1 + K_2 + K_3) = 0$ при $k_1 + k_2 + k_3 = 0$ и $k_i + k_j = 0$, $i \neq j$, поэтому

$$Q_2 = c_2 k_1^2 k_2^2 k_3^2 (k_1 + k_2)^3 (k_2 + k_3)^3 (k_3 + k_1)^3 (k_1 + k_2 + k_3).$$

Таким образом,

$$p_{123} \frac{P(K_1 + K_2 - K_3)P(K_1 - K_2)}{P(K_1 + K_2 + K_3)P(K_1 + K_2)} = c \left[\frac{(k_1 - k_2)(k_2 - k_3)(k_3 - k_1)}{(k_1 + k_2)(k_2 + k_3)(k_3 + k_1)} \right]^2. \quad (9.163)$$

При $k_3 \rightarrow 0$ соотношение (9.163) принимает вид

$$\frac{P(K_1 - K_2)}{P(K_1 + K_2)} = -c \left(\frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \right)^2, \quad \text{откуда } c = 1.$$

9.90. У к а з а н и е. Применить (9.102).

9.91. У к а з а н и е. Воспользоваться формулой обмена (9.103) при $D_1 = \gamma D_z$, $D_2 = D_3 = 0$, $a = G/F$, $b = c = F$, $d = 1$.

9.92. У к а з а н и е. Сравнить коэффициенты при одинаковых степенях γ в формуле (9.105), преобразованной с помощью (9.101).

9.93. Вывод формулы (9.110). Пусть $\varepsilon_2 = \varepsilon$, а остальные параметры равны нулю, тогда формула обмена примет вид

$$cd e^{2\varepsilon D_x} a \cdot b = e^{\varepsilon D_x} (e^{\varepsilon D_x} a \cdot d) \cdot (e^{\varepsilon D_x} c \cdot b).$$

Разложение в степенные ряды

$$\begin{aligned} cd(1 + 2\varepsilon D_x + 2\varepsilon^2 D_x^2 + \dots) a \cdot b &= \left(1 + \varepsilon D_x + \frac{\varepsilon^2}{2} D_x^2 + \dots \right) \times \\ &\times \left[\left(1 + \varepsilon D_x + \frac{\varepsilon^2}{2} D_x^2 + \dots \right) a \cdot d \right] \cdot \left[\left(1 + \varepsilon D_x + \frac{\varepsilon^2}{2} D_x^2 + \dots \right) c \cdot b \right] \end{aligned}$$

и приравнивание коэффициентов при ε^2 приводит к тождеству

$$\begin{aligned} 2cd D_x^2 a \cdot b &= \frac{1}{2} ad D_x^2 c \cdot b + (D_x a \cdot d)(D_x c \cdot b) + \frac{1}{2} cb D_x^2 a \cdot d + \\ &+ D_x(ad \cdot D_x c \cdot b) + D_x(D_x a \cdot d) \cdot cb + \frac{1}{2} D_x^2 ad \cdot cb. \end{aligned} \quad (9.164)$$

Если $\varepsilon_3 = \varepsilon$, а остальные параметры равны нулю, то в результате аналогичных выкладок получается тождество

$$\begin{aligned} 2ab D_x^2 c \cdot d &= \frac{1}{2} ad D_x^2 c \cdot b + (D_x a \cdot d)(D_x c \cdot b) + \frac{1}{2} cb D_x^2 a \cdot d - \\ &- D_x(ad \cdot D_x c \cdot b) - D_x(D_x a \cdot d) \cdot cb + \frac{1}{2} D_x^2 ad \cdot cb. \end{aligned} \quad (9.165)$$

Тождество (9.110) есть почленная разность (9.164) и 9.165).

9.96. См. ответ к задаче 9.60. У к а з а н и е. Двухкинковое решение получается при $g_1 = e^{\eta_1} + e^{\eta_2}$, $\eta_j = \beta_j x + \frac{t}{\beta_j} + \delta_j$, $j = 1, 2$, $f_1 = 0$; f_2 определяется из третьего уравнения системы (9.119), а f_m , g_{m-1} равны нулю при $m \geq 3$.

9.97. См. ответы к задачам (9.58), (9.59). У к а з а н и е. Посредством подстановки $u = G/F$ уравнение сводится к системе

$$\begin{aligned}(D_t + D_x^3)G \cdot F &= 0, \\ D_x^2 F \cdot G &= 2G^2,\end{aligned}$$

решение которой имеет форму рядов

$$\begin{aligned}F &= 1 + \varepsilon^2 f_2 + \varepsilon^4 f_4 + \dots, \\ G &= \varepsilon g_1 + \varepsilon^3 g_3 + \dots.\end{aligned}$$

Односолитонное решение получится, если

$$g_1 = e^\eta, \quad \eta = kx - k^3 t + \delta.$$

В этом случае $f_2 = \frac{1}{4k^2} e^{2\eta}$, а остальные функции равны нулю. Для построения двухсолитонного решения нужно взять функцию

$$g_1 = e^{\eta_1} + e^{\eta_2}, \quad \eta_i = k_i x - k_i^3 t + \delta_i, \quad i = 1, 2,$$

с которой связаны не равные нулю функции g_3, f_2, f_4 ; при этом

$$\begin{aligned}F &= 1 + \varepsilon^2 \left(\frac{e^{\eta_1}}{4k_1^2} + \frac{e^{\eta_2}}{4k_2^2} + \frac{2e^{\eta_1+\eta_2}}{(k_1+k_2)^2} + \frac{\varepsilon^4}{16k_1^2 k_2^2} \left(\frac{k_1-k_2}{k_1+k_2} \right)^2 e^{2(\eta_1+\eta_2)} \right), \\ G &= \varepsilon(e^{\eta_1} + e^{\eta_2}) + \frac{\varepsilon^3}{4} \left(\frac{k_1-k_2}{k_1+k_2} \right)^2 \left(\frac{1}{k_1^2} e^{\eta_1} + \frac{1}{k_2^2} e^{\eta_2} \right) e^{\eta_1+\eta_2}.\end{aligned}$$

9.98. См. ответ к задаче 9.55. У к а з а н и е. Введением новой функции $u = G/F$, где F — вещественная функция, уравнение сводится к системе

$$\begin{aligned}(iD_t + D_x^2)G \cdot F &= 0, \\ D_x^2 F \cdot F &= 2G\overline{G}.\end{aligned}$$

9.99. У к а з а н и е. Посредством замены $u = G/F$ перейти к системе

$$\begin{aligned}D_x D_t F \cdot F &= \alpha G^2, \\ D_x D_t F \cdot G &= FG.\end{aligned}$$

9.100. Односолитонное решение $u(x, t) = 2\beta_2 \operatorname{sech}(\beta x - 4\beta_3 t + \delta)$; двухсолитонное решение приведено в ответе к задаче 9.36.

Р е ш е н и е. Уравнение КдФ заменой $u = v_x$ с последующим интегрированием преобразуется к виду $v_t + 3v_x^2 + v_{xxx} = 0$, затем с помощью подстановки $v = G/F$ и формул (9.106)–(9.108) трансформируется в уравнение

$$\frac{1}{F^2} (D_t + D_x^3) G \cdot F + \frac{3}{F^4} (D_x G \cdot F) (D_x^2 F \cdot F - D_x G \cdot F) = 0,$$

которое приводит к системе

$$\begin{aligned}D_x^2 F \cdot F - D_x G \cdot F &= 0, \\ (D_t + D_x^3) G \cdot F &= 0.\end{aligned}$$

Преобразование первого уравнения системы с помощью свойства (9.96) к виду $D_x(2F_x - G) \cdot F = 0$ показывает, что $G = 2F_x$ — решение этого уравнения. Таким образом, система сводится к одному уравнению

$$P(D_x, D_t) F \cdot F = 0 \tag{9.166}$$

(многочлен $P(x_1, x_2)$ имеет вид (9.99)), решение F которого определяет функцию $u(x, t) = 2(\ln F)_{xx}$. Если

$$F = 1 + \varepsilon f_1 + \varepsilon^2 f_2 + \varepsilon^3 f_3 + \dots \quad (9.167)$$

подставить в (9.166), то для $f_1, f_2, f_3, \dots$ получится система

$$\begin{aligned} P(D_x, D_t) f_1 \cdot 1 &= 0, \\ 2P(D_x, D_t) f_2 \cdot 1 &= -P(D_x, D_t) f_1 \cdot F_1, \\ 2P(D_x, D_t) f_3 \cdot 1 &= -2P(D_x, D_t)(2f_2 \cdot f_1 + f_1 \cdot f_2), \end{aligned} \quad (9.168)$$

и т. д. Первое уравнение системы имеет экспоненциальное решение

$$f_1 = e^\eta, \quad \eta = kx + \omega t + \delta.$$

В самом деле, в силу (9.98)

$$P(D_x, D_t) e^\eta \cdot 1 = P(k, \omega) e^\eta = (k\omega + k^4) e^\eta = 0,$$

если $\omega = -k^3$. Правая часть второго уравнения обращается в нуль, так как (см. (9.160))

$$P(D_t, D_x) e^\eta \cdot e^\eta + P(0, 0) e^{2\eta} = 0.$$

Поэтому все уравнения системы (9.168) превращаются в тождества, если

$$f_1 = e^{kx - k^3 t + \delta}, \quad f_m = 0, \quad m \geq 2,$$

что приводит к ответу при $k = 2\beta$.

Двухсолитонное решение порождается функцией

$$f_1 = e^{\eta_1} + e^{\eta_2}, \quad \eta_j = k_j x - k_j^3 t + \delta_j, \quad j = 1, 2,$$

которая удовлетворяет первому уравнению системы (9.168). Вследствие соотношений (9.161) и (9.162) правая часть второго уравнения может быть представлена в форме

$$-P(D_x, D_t) f_1 \cdot f_1 = -2P(D_x, D_t) e^{\eta_1} \cdot e^{\eta_2} = 2P(D_x, D_t) e^{\eta_1 + \eta_2 + A_{12}} \cdot 1,$$

откуда следует, что $f_2 = \exp(\eta_1 + \eta_2 + A_{12})$ — его решение. Правая часть третьего уравнения равна нулю, следовательно, функции $f_1, f_2, f_m = 0$, где $m \geq 3$, являются решением системы. Остается применить формулу $u = 2(\ln F)_{xx}$ при $k_j = 2\beta_j, j = 1, 2$.

9.101. У к а з а н и е. Решение 1-го уравнения системы (9.168) следует взять в форме

$$f_1 = \sum_{i=1}^N e^{\eta_i}, \quad \eta_i = k_i x - k_i^3 t + \delta_i.$$

Тогда правая часть второго уравнения преобразуется с помощью (9.88) к виду

$$\begin{aligned} -2P(D_x, D_t) f_1 \cdot f_1 &= -2P(D_x, D_t) \sum_{1 \leq i < j}^N e^{\eta_i} \cdot e^{\eta_j} - \\ &\quad - 2P(D_x, D_t) \left(\sum_{1 \leq i < j}^N e^{\eta_i + \eta_j + A_{ij}} \right) \cdot 1, \end{aligned}$$

стало быть,

$$f_2 = \sum_{1 \leq i < j}^N e^{\eta_i + \eta_j + A_{ij}}$$

— решение второго уравнения. Для правой части третьего уравнения после применения (9.99) получается следующее выражение:

$$\begin{aligned} -2P(D_x, D_t) f_2 \cdot f_1 &= -2P(D_x, D_t) \sum_{1 \leq i < j < k}^N p_{ijk} (e^{\eta_i + \eta_j + A_{ij}} \cdot e^{\eta_k}) = \\ &= -2P(D_x, D_t) \left(\sum_{1 \leq i < j < k}^N e^{\eta_i + \eta_j + \eta_k + A_{ij} + A_{jk} + A_{ki}} \right) \cdot 1. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$f_3 = \sum_{1 \leq i < j < k}^N e^{\eta_i + \eta_j + \eta_k + A_{ij} + A_{jk} + A_{ki}}$$

— решение 3-го уравнения. Если предположить, что $f_4, f_5, \dots, f_N$ имеют аналогичную структуру, то ряд (9.167) сведется к конечной сумме F_N , которую можно записать в виде (9.121). Для обоснования формулы (9.121) нужно доказать, что F_N удовлетворяет уравнению (9.166). Одно из доказательств этого факта приведено в [1].

9.102. При $\lambda_{1,2} = \frac{1}{4}k_{1,2}^2$

$$F_1 = e^{\frac{\eta_1}{2}} + e^{-\frac{\eta_1}{2}}, \quad (9.169)$$

$$F_2 = (k_2 - k_1) \left(e^{\frac{\eta_1 + \eta_2}{2}} + e^{-\frac{\eta_1 + \eta_2}{2}} \right) + (k_2 + k_1) \left(e^{\frac{\eta_1 - \eta_2}{2}} + e^{-\frac{\eta_1 - \eta_2}{2}} \right), \quad (9.170)$$

где $\eta_j = k_j x - k_j^3 t + \delta_j$, $j = 1, 2$. У к а з а н и е. Решение $u = 0$ уравнения (9.1) соответствует решению $F_0 = 1$ уравнения (9.120).

9.103. Р е ш е н и е. Необходимо проверить, что функции F_N и F_{N+1} , определенные выражением (9.124), удовлетворяют уравнениям (9.122) и (9.123). Пусть

$$a_{ij} = \frac{\varepsilon_i k_i - \varepsilon_j k_j}{k_i^2 - k_j^2}, \quad A_N = \frac{\prod_{i \leq j}^N a_{ij}}{\prod_{i=1}^N \varepsilon_i k_i}, \quad \sigma_N = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \eta_i, \quad (9.171)$$

тогда выражение (9.124) примет более компактный вид

$$F_N = \sum_{\varepsilon} A_N e^{\sigma_N}. \quad (9.172)$$

В силу свойства (9.98) левая часть (9.122) равна

$$D_x^2 F_N \cdot F_{N+1} = \sum_{\varepsilon} \sum_{\varepsilon'} A_N A_{N+1} e^{\sigma_N} e^{\sigma_{N+1}} \left(\frac{\varepsilon_{N+1} k_{N+1}}{2} \right)^2 = \frac{k_{N+1}^2}{4} F_N F_{N+1},$$

следовательно, при $\lambda_{N+1} = \frac{1}{4}k_{N+1}^2$ уравнение становится тождеством. При подстановке F_N и F_{N+1} в левую часть уравнения (9.123) получается выражение

$$\left(-\frac{\varepsilon_{N+1}^3 k_{N+1}^3}{2} + 3\lambda_N \frac{\varepsilon_{N+1} k_{N+1}}{2} + \frac{\varepsilon_{N+1}^3 k_{N+1}^3}{8} \right) F_N F_{N+1},$$

тождественно равное нулю, так как при $\lambda_N = \frac{1}{4}k_{N+1}^2$ сумма в его скобках равна нулю.

9.104.

$$F_1 = \frac{1}{k_1} \left(e^{\frac{\eta_1}{2}} - e^{-\frac{\eta_1}{2}} \right) \quad (9.173)$$

$$F_2 = \frac{1}{k_1 k_2 (k_1^2 - k_2^2)} \left[(k_1 - k_2) \left(e^{\frac{\eta_1 + \eta_2}{2}} - e^{-\frac{\eta_1 + \eta_2}{2}} \right) - (k_1 + k_2) \left(e^{\frac{\eta_1 - \eta_2}{2}} - e^{-\frac{\eta_1 - \eta_2}{2}} \right) \right]. \quad (9.174)$$

Решение. 1) Так как $u = 2(\ln F)_{xx}$, то

$$2(\ln(e^{ax+b} F))_{xx} = 2\left(a + \frac{F_x}{F}\right)_x = 2\left(\frac{F_x}{F}\right)_x = 2(\ln F)_{xx}.$$

Решение. 2) Если распорядиться фазовой постоянной δ_1 в выражении (9.169) для F_1 так, чтобы $\delta_1 = \alpha_1 + \beta_1$, где $\exp(-\beta_1) = -1$, то

$$\begin{aligned} e^{\frac{\eta_1}{2}} + e^{-\frac{\eta_1}{2}} &\sim 1 + e^{-\eta_1} = 1 - e^{-(k_1 x - k_1^3 t + \alpha_1)} = \\ &= 1 - e^{-\zeta_1} \sim e^{\frac{\zeta_1}{2}} - e^{-\frac{\zeta_1}{2}} \sim \frac{1}{k_1} \left(e^{\frac{\zeta_1}{2}} - e^{-\frac{\zeta_1}{2}} \right). \end{aligned}$$

У к а з а н и е. 3) В выражении (9.121) ввести $\varepsilon_i = 2\mu_i - 1$ и выбрать фазовые постоянные $\delta_i = \alpha_i + \beta_i$ так, чтобы

$$e^{\beta_i} = - \prod_{j=1, j \neq i}^N \left(\frac{k_i + k_j}{k_i - k_j} \right).$$

9.105. Решение. Так как функции, входящие в (9.125), связаны АПБ через (9.122), то

$$\begin{aligned} \left(D_x^2 - \frac{1}{4} k_N^2 \right) F_{N-1} \cdot F_N &= 0, \\ \left(D_x^2 - \frac{1}{4} k_N^2 \right) \tilde{F}_N \cdot F_{N+1} &= 0, \\ \left(D_x^2 - \frac{1}{4} k_{N+1}^2 \right) F_N \cdot F_{N+1} &= 0, \\ \left(D_x^2 - \frac{1}{4} k_{N+1}^2 \right) F_{N-1} \cdot \tilde{F}_N &= 0. \end{aligned}$$

Из первых двух уравнений в результате перекрестного умножения на $\tilde{F}_N F_{N+1}$, $F_{N-1} F_N$ и почленного вычитания следует, что

$$\tilde{F}_N F_{N+1} (D_x^2 F_{N-1} \cdot F_N) - F_{N-1} F_N (D_x^2 \tilde{F}_N \cdot F_{N+1}) = 0. \quad (9.175)$$

Применение тождества (9.110), в котором $a = F_{N-1}$, $b = F_N$, $c = \tilde{F}_N$, $d = F_{N+1}$, позволяет преобразовать (9.175) к виду

$$D_x \left[(D_x F_{N-1} \cdot F_{N+1}) \cdot \tilde{F}_N F_N + F_{N-1} F_{N+1} \cdot (D_x \tilde{F}_N \cdot F_N) \right] = 0. \quad (9.176)$$

Аналогично устанавливается (на базе 3-го и 4-го уравнений) соотношение

$$D_x \left[(D_x F_N \cdot \tilde{F}_N) \cdot F_{N-1} F_{N+1} + F_N \tilde{F}_N \cdot (D_x F_{N-1} \cdot F_{N+1}) \right] = 0. \quad (9.177)$$

Почленная разность (9.176) и (9.177) с учетом свойства (9.94) приводит к уравнению

$$D_x (D_x F_{N+1} \cdot F_{N-1}) \cdot F_N \tilde{F}_N = 0,$$

которое становится тождеством, если (см. (9.95))

$$D_x F_{N+1} \cdot F_{N-1} = C_N F_N \tilde{F}_N. \quad (9.178)$$

Чтобы вычислить C_N , нужно в (9.178) подставить функции F в форме (9.172). Из определения A_N (см. (9.171)) следует, что

$$A_{N+1} = A_N \frac{\prod_{i=1}^N a_{i,N+1}}{k_{N+1} \varepsilon_{N+1}} = A_N \frac{\prod_{i=1}^{N-1} a_{i,N+1}}{k_{N+1} \varepsilon_{N+1}} a_{N,N+1}, \quad A_{N-1} \frac{\prod_{i=1}^N a_{i,N+1}}{k_{N+1} \varepsilon_{N+1}} = \tilde{A}_N.$$

Поэтому и вследствие свойства (9.97)

$$\begin{aligned} D_x F_{N+1} \cdot F_{N-1} &= \sum_{\varepsilon} \sum_{\varepsilon'} A_{N+1} A_{N-1} D_x e^{\sigma_{N+1}} \cdot e^{\sigma_{N-1}} = \\ &= \sum_{\varepsilon} \sum_{\varepsilon'} A_N \tilde{A}_N e^{\sigma_N} e^{\tilde{\sigma}_N} \frac{\varepsilon_N k_N - \varepsilon_{N+1} k_{N+1}}{k_N^2 - k_{N+1}^2} (\varepsilon_N k_N + \varepsilon_{N+1} k_{N+1}) = \frac{1}{2} F_N \tilde{F}_N, \end{aligned}$$

откуда $C_N = 1/2$.

9.106. Решение. Уравнение (9.125), в котором $F_0 = 1$, $F_1 = F_1(k_1)$ имеет вид (9.173), $\tilde{F}_1 = F_1(k_2)$, запишется в форме

$$\frac{\partial F_2}{\partial x} = \frac{1}{k_1 k_2} \left(e^{\frac{\eta_1}{2}} - e^{-\frac{\eta_1}{2}} \right) \left(e^{\frac{\eta_2}{2}} - e^{-\frac{\eta_2}{2}} \right).$$

Его решение $F_2 = f(t)$, где F_2 задана выражением (9.174), должно удовлетворять уравнению (9.122), подстановка в которое приводит к тождеству

$$\frac{k_1^2 - k_2^2}{4} F_1 f = 0, \text{ откуда } f = 0.$$

9.107. $\Phi_0 = 1$, $u_0 = 0$; $\Phi_1 = x + c$, $u_1 = -\frac{2}{(x+c)^2}$;

$$\Phi_2 = x^3 + 12t + c, \quad u_2 = -\frac{6x(x^3 - 24t - 2c)}{(x^3 + 12t + c)^2}.$$

У к а з а н и е. Решать систему (9.168) в классе полиномов.

9.108. $\Phi_0 = 1$, $\Phi_1 = x$, $\Phi_2 = \frac{x^3}{6} + 2t$.

У к а з а н и е. Перейти к пределу при $K \rightarrow 0$ в выражениях (9.173), (9.174).

9.109. У к а з а н и е. Записать функцию F_N в виде

$$F_N = \frac{G_N}{\prod_{i=1}^N k_i \prod_{i < j}^N (k_i^2 - k_j^2)},$$

где

$$G_N(k_1, k_2, \dots, k_N) = \sum_{\varepsilon = \pm 1} \prod_{i < j}^N (\varepsilon_i k_i - \varepsilon_j k_j) \frac{\exp\left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \eta_i\right)}{\prod_{i=1}^N \varepsilon_i},$$

и показать, что G_N обращается в нуль при $k_i = 0$, $k_i = \pm k_j$, $i, j = 1, 2, \dots, N$.

9.110. У к а з а н и е. Перейти к пределу при $K \rightarrow 0$ в (9.123) и (9.125).

9.111. $\Theta_2 = x^3 + 12t$, $\Theta_3 = x^6 + 60x^3t - 720t^2$, $\Theta_4 = x^{10} + 180x^7t + 302400xt^3$.

У к а з а н и е. Записать рекуррентную формулу для Φ_N в виде

$$a_{N+1} a_{N-1} D_x \Theta_{N+1} \cdot \Theta_{N-1} = \frac{1}{2} a_N^2 \Theta_N^2$$

и показать, что $2(2N+1)a_{N+1}a_{N-1} = a_N^2$. Для построения Θ_N применить представление (9.127). Например, при $N=4$ в рекуррентные формулы подставить уже известные многочлены Θ_2, Θ_3 , тогда

$$\Theta_4 = x^{10} + \alpha x^7 t + \beta x^4 t^2 + \gamma x t^3.$$

9.112. 1. $u_1(x, t) = \frac{k^2}{2} \operatorname{sech}^2\left(\frac{k}{2}x + \sigma \frac{k}{2}\sqrt{k^2+1}t + \delta\right), \quad \sigma = \pm 1,$

$$u_2(x, t) = \frac{l + k_1^2 \sqrt{m} \operatorname{ch} \frac{\gamma_2}{2} + k_2^2 \sqrt{m} \operatorname{ch} \frac{\gamma_1}{2}}{\left(\sqrt{m} \operatorname{ch} \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} + \operatorname{ch} \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2}\right)^2},$$

$$m = \frac{3(k_1 - k_2)^2 + \left(\sigma_1 \sqrt{k_1^2 + 1} - \sigma_2 \sqrt{k_2^2 + 1}\right)^2}{3(k_1 + k_2)^2 + (\sigma_1 \sqrt{k_1^2 + 1} - \sigma_2 \sqrt{k_2^2 + 1})^2},$$

$$l = \frac{3(k_1^2 - k_2^2)^2 + (k_1^2 + k_2^2) \left(\sigma_1 \sqrt{k_1^2 + 1} - \sigma_2 \sqrt{k_2^2 + 1}\right)^2}{3(k_1 + k_2)^2 + (\sigma_1 \sqrt{k_1^2 + 1} - \sigma_2 \sqrt{k_2^2 + 1})^2},$$

$$\gamma_i = k_i x + \sigma_i k_i \sqrt{k_i^2 + 1} t + \delta_i, \quad \sigma_i = \pm 1, \quad i = 1, 2.$$

2. $u(x, t) = -\frac{2}{(x \pm t)^2}.$

У к а з а н и е. Замена $u = v_x$, интегрирование по x и подстановка $v = G/F$ приводят к уравнению (см. (9.107), (9.109)).

$$\begin{aligned} \frac{1}{F^2}(D_t^2 - D_x^2 - D_x^4)G \cdot F - \frac{G}{F^3}(D_t^2 - D_x^2 - D_x^4)F \cdot F + \\ + \frac{G}{F^4}(D_x G \cdot F - D_x^2 F \cdot F) \left(\frac{G}{F} D_x^2 F \cdot F - D_x^2 G \cdot F \right) = 0. \end{aligned}$$

Последнее слагаемое обращается в нуль, если $G = 2F_x$, т.е. $u = 2(\ln F)_{xx}$, тогда первое слагаемое

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{(D_t^2 - D_x^2 - D_x^4)F \cdot F}{F^2} = 0,$$

откуда $(D_t^2 - D_x^2 - D_x^4)F \cdot F = 0$. При $f_1 = e^{\eta_1}$ получается односолитонное решение, при $f_1 = e^{\eta_1} + e^{\eta_2}$ — двухсолитонное.

9.113. 1. $u_1(x, t) = \frac{k^2}{2} \operatorname{sech}^2 \frac{k}{2}(x + py - \omega t + \delta), \quad \omega = k^2 + \sigma p^2,$

$$u_2(x, t) = \frac{l + k_1^2 \sqrt{m} \operatorname{ch} \frac{\eta_2}{2} + k_2^2 \sqrt{m} \operatorname{ch} \frac{\eta_1}{2}}{\left(\sqrt{m} \operatorname{ch} \frac{\eta_1 + \eta_2}{2} + \operatorname{ch} \frac{\eta_1 - \eta_2}{2}\right)^2},$$

$$m = \frac{3(k_1 - k_2)^2 - \sigma(p_1 - p_2)^2}{3(k_1 + k_2)^2 - \sigma(p_1 - p_2)^2},$$

$$l = \frac{3(k_1^2 - k_2^2)^2 - \sigma(k_1^2 + k_2^2)(p_1 - p_2)^2}{3(k_1 + k_2)^2 - \sigma(p_1 - p_2)^2},$$

$$\eta_j = k_j(x + p_j y - \omega_j t + \delta_j), \quad \omega_j = k_j^2 + \sigma p_j^2, \quad j = 1, 2.$$

2. $u(x, y, t) = -\frac{2}{[x + py - (k^2 + \sigma p^2)t]^2}.$

У к а з а н и е. В результате замены $u = v_x$, интегрирования по x и подстановки $v = G/F$ получается уравнение

$$\frac{1}{F^2}(D_x D_t + D_x^4 + \sigma D_y^2)G \cdot F - \frac{G}{F^3}(D_x D_t + D_x^4 + \sigma D_y^2)F \cdot F + \\ + \frac{G}{F^4}(D_x^2 G \cdot F - \frac{G}{F} D_x^2 F \cdot F)(D_x G \cdot F - D_x^2 F \cdot F) = 0.$$

Последнее слагаемое равно нулю, если $G = 2F_x$, т.е. $u = 2(\ln F)_{xx}$.

$$\mathbf{9.114.} \quad 1) u(x, t) = \frac{2k^2}{\operatorname{ch}^2(kx + \frac{kt}{4k^2 - 1} + \delta)}; \quad 2) u(x, t) = \frac{2k^2}{\operatorname{ch}^2(kx - 16k^5 t + \delta)}.$$

У к а з а н и я. 1) Уравнение записать в виде

$$u_t - u_{xxt} + 3 \left(u \int_x^\infty u_t d\xi \right)_x + u_x = 0.$$

2) Уравнению придать форму

$$u_t + 15(u^3)_x + 15(uu_x)_x + u_{xxxx} = 0$$

и применить формулы (9.106), (9.108) и формулу

$$\frac{\partial^5 F_x}{\partial x^5 F} = \frac{D_x^6 F \cdot F}{2F^2} - \frac{15}{2} \frac{(D_x^2 F \cdot F)(D_x^4 F \cdot F)}{F^4} + 15 \frac{(D_x^2 F \cdot F)^3}{F^6},$$

способ получения которой дан в указании к задаче 9.92.

$$\mathbf{9.115.} \quad e^{-br_n} - 1 = \frac{m}{ab} \frac{\omega^2}{\operatorname{ch}^2(kx \pm \omega t + \delta)}, \quad \omega = \sqrt{\frac{ab}{m}} \operatorname{sh} k.$$

При $b > 0$ — волна сжатия, при $b < 0$ — волна разрежения; $v = \omega l/k$, $h = 2l/k$. С ростом амплитуды скорость волны увеличивается, ширина уменьшается.

У к а з а н и е. Конструкция уравнения (9.129) подсказывает необходимую замену $u_n = (\ln F_n)_{\tau\tau}$, применение которой совместно с (9.96), (9.115) приводит к билинейному уравнению

$$D_\tau^2 F_n \cdot F_n = 4sh^2 \left(\frac{1}{2} D_n \right) F_n \cdot F_n.$$

Согласно теории возмущений

$$F_n = 1 + \varepsilon f_{n1} + \varepsilon^2 f_{n2} + \dots;$$

односолитонное решение получается при

$$f_{n1} = e^{\alpha x + \beta \tau}.$$

$$\mathbf{9.116.} \quad u(x, t) = \frac{a}{b} \ln |Ax + B| + C; \quad u(x, t) = A^2 bt + Ax + C;$$

$$u(x, t) = -\frac{a^2 A^2 t}{b} + \frac{a}{b} \ln |\sin(Ax + B)| + C;$$

$$u(x, t) = -\frac{a^2 A^2 t}{b} + \frac{a}{b} \ln |\operatorname{ch}(Ax + B)| + C, \quad A, B, C — \text{п. п.}$$

$$\mathbf{9.117.} \quad u(x, t) = pt + \frac{a}{b} \ln(A + Be^{-\frac{c}{a}x}), \quad A, B — \text{п. п.}$$

$$\mathbf{9.118.} \quad u(x, t) = Ae^{ct} - \frac{p}{c}t - \frac{c}{4b}(x + B)^2 + \frac{a}{2b} - \frac{p}{c^2}, \quad A, B — \text{п. п.}$$

- 9.119.** $u(x, t) = \left(\frac{a^2 A^2}{b} + c \right) t + \frac{a}{b} \ln \sin(Ax + B) + C;$
 $u(x, t) = \left(\frac{a^2 A^2}{b} + c \right) t + \frac{a}{b} \ln \operatorname{sh}(Ax + B) + C,$
 $u(x, t) = \left(\frac{a^2 A^2}{b} + c \right) t + \frac{a}{b} \ln \operatorname{sh}(Ax + B) + C,$
 $u(x, t) = ct + \frac{a}{b} \ln(Ax + B) + C, A, B, C - \text{п. п.}$
- 9.120.** $u(x, t) = Ax + aA^2 t + B, A, B - \text{п. п.}$
- 9.121.** $u(x, t) = A \exp \left(\frac{2(a+b)t}{3a+2b} \right) - \frac{cx^2}{2(3a+2b)} + Bx - \frac{3a+2b}{2c} \left(\frac{p}{a+b} + B^2 \right),$
 $A, B \text{ суть п. п.}$
- 9.122.** $u(x, t) = \frac{ct^{n+1}}{n+1} + (a+b)A^2 t + Ax + B, A, B - \text{п. п.}$
- 9.123.** $u(x, t) = At + \left[\frac{A(k+1)}{a(1-n)} \right] \frac{1}{1+k} \frac{kx^{\frac{k-n+1}{k}}}{k-n+1} + B, A, B - \text{п. п.}$
- 9.124.** $u(x, t) = ae^{2\sigma A} t + Ax^2 + Bx + C, A, B, C - \text{п. п.}$
- 9.125.** $u(x, t) = ae^{6at} + Ax^3 + C_1 x^2 + C_2 x + C_3, A, C_1, C_2, C_3 - \text{п. п.}$
- 9.126.** $u(x, t) = \frac{Aa}{\sigma} t + \frac{1}{\sigma} (x+B) \ln A(x+B) - \frac{x}{\sigma} + C, A, B, C - \text{п. п.}$
- 9.127.** $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A\sigma(x+B)^2}{2(2b-\sigma A)(C-At)}, A, B, C - \text{п. п.}$
- 9.128.** $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{x^3 + C_1 x^2 + C_2 x + C_3}{C - 6at}, C, C_1, C_2, C_3 - \text{п. п.}$
- 9.129.** $u(x, t) = B + at + \ln |Ax + C|, A, B, C - \text{п. п.}$
- 9.130.** $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{\alpha x^2 + Ax + B}{C - a\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\alpha t)} - \frac{bt^2}{2}, \alpha = \sqrt{\frac{b\sigma}{2}}, A, B, C - \text{п. п.}$
- 9.131.** $u(x, t) = \ln \frac{1 + C_1 e^{ax} + C_2 e^{-ax}}{a^2(C+t)}, C, C_1, C_2 - \text{п. п.}$
- 9.132.** $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{\sin(px+a) + B}{C - B\sigma bt}, p = \sqrt{\frac{b\sigma}{a}}, \frac{b\sigma}{a} > 0;$
 $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{\operatorname{sh}(px+a) + B}{C - B\sigma bt}, p = \sqrt{-\frac{b\sigma}{a}}, \frac{-b\sigma}{a} > 0; B, C - \text{п. п.}$
- 9.133.** $u(x, t) = A + at + \ln(B_1 \cos kx + B_2 \sin kx), a = k^2 > 0;$
 $u(x, t) = A + at + \ln(B_1 \operatorname{ch} rk + B_2 \operatorname{sh} kx), -a = k^2 > 0, A, B_1, B_2 - \text{п. п.}$
- 9.134.** $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{C_1 + C_2 x^{1-n} - b\sigma x^{2-n}}{a(2-n)(1 + Ae^{-b\sigma t})}, A, C_1, C_2 - \text{п. п.}$
- 9.135.** $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{x^{-n}}{(b\sigma - an)(A - \sigma t)}, A - \text{п. п.}$
- 9.136.** $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{Ae^{k_1 x} + Be^{k_2 x} + e^{\alpha x}}{C - b\sigma t}, k_{1,2} = -\frac{\alpha}{2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2}{4} - \frac{b\sigma}{a}}, A, B, C - \text{п. п.}$
- 9.137.** $u(x, y, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{C_1 x^2 + C_2 xy + C_3 y^2 + C_4 x + C_5 y + C_6}{C_7 - 2a)C_1 + C_3)t}, C_1, C_2, \dots, C_7 - \text{п. п.}$
- 9.138.** $u(x, t) = F(A)t + \frac{Ax^2}{2} + Bx + C, A, B, C - \text{п. п.}$

$$9.139. u(x, t) = F(A)t + \frac{Ax^n}{n!} + \sum_{k=0}^{n-1} C_k x^k, \quad A, C_1, C_2, \dots, C_{n-1} - \text{п. п.}$$

$$9.140. u(x, t) = \frac{ct^{n+1}}{(n+1)(n+2)} + \frac{A^2 a^2 t^2}{2b} + Bt + C + \frac{a}{b} \ln \operatorname{sh}(Ax + D);$$

$$u(x, t) = \frac{ct^{n+1}}{(n+1)(n+2)} + \frac{A^2 a^2 t^2}{2b} + Bt + C + \frac{a}{b} \ln \operatorname{ch}(Ax + D);$$

$$u(x, t) = \frac{ct^{n+1}}{(n+1)(n+2)} - \frac{A^2 a^2 t^2}{2b} + Bt + C + \frac{a}{b} \ln \sin(Ax + D);$$

$$u(x, t) = \frac{ct^{n+1}}{(n+1)(n+2)} + At + B + \frac{a}{b} \ln(Cx + D);$$

$$u(x, t) = \frac{ct^{n+1}}{(n+1)(n+2)} + \frac{ba^2 t^2}{2} + Bt + Ax + C, \quad A, B, C, D - \text{п. п.}$$

$$9.141. u(x, t) = A \operatorname{ch} \sqrt{c} t + C \operatorname{sh} \sqrt{c} t - \frac{k}{\omega^2 + c} (t \sin \omega t + \frac{2\omega}{\omega^2 + c} \cos \omega t) - \frac{\lambda}{c}, \quad c > 0;$$

$$u(x, t) = A \cos \sqrt{-c} t + C \sin \sqrt{-c} t - \frac{k}{\omega^2 + c} (t \sin \omega t + \frac{2\omega}{\omega^2 + c} \cos \omega t) - \frac{\lambda}{c},$$

$$c < 0, -c \neq \omega^2; u(x, t) = A \cos \omega t + C \sin \omega t + \frac{kt}{4\omega^2} (\sin \omega t - \omega t \cos \omega t) - \frac{\lambda}{c},$$

$$-c = \omega^2, \quad A, B, C, \lambda - \text{п. п.}$$

$$9.142. u(x, t) = \frac{1}{2} a A^2 t^2 + Bt + Ax + C, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.143. u(x, t) = \varphi(t) - \frac{bx^2}{6a} + Bx - \frac{3(c + aB^2)}{6a},$$

$$\varphi(t) = C_1 \cos \sqrt{\frac{2b}{3}} t + C_2 \sin \sqrt{\frac{2b}{3}} t, \quad b > 0;$$

$$\varphi(t) = C_1 \operatorname{ch} \sqrt{-\frac{2b}{3}} t + C_2 \sin \sqrt{-\frac{2b}{3}} t, \quad -b > 0, \quad B, C_1, C_2 - \text{п. п.}$$

$$9.144. u(x, t) = \frac{1}{2} a A^2 t^2 + Bt + \frac{1}{2} A x^2 + Cx + D, \quad A, B, C, D - \text{п. п.}$$

$$9.145. u(x, t) = \frac{At^2}{2} + Bt + \left[\frac{A(k+1)}{a(1-n)} \right]^{\frac{1}{k+1}} \frac{kx^{\frac{k-n+1}{k}}}{r-n+1} + C, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.146. u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{B^2 \operatorname{sh}^2(Ax + D)}{aA^2 \operatorname{ch}^2(Bt + C)}; \quad u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{B^2 \cos^2(Ax + D)}{aA^2 \operatorname{ch}^2(Bt + C)};$$

$$u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{B^2 \operatorname{ch}^2(Ax + D)}{aA^2 \operatorname{sh}^2(Bt + C)}; \quad u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{B^2 (x + D)^2}{aA^2 \operatorname{ch}^2(Bt + C)};$$

$$u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{B^2 \operatorname{ch}^2(Ax + D)}{aA^2 \cos^2(Bt + C)}; \quad u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{\operatorname{ch}^2(Ax + D)}{aA^2 (t + C)^2},$$

$$A, B, C, D - \text{п. п.}$$

$$9.147. u(x, t) = A e^{-at} + \frac{1}{\sigma} \ln(Cx + D) + B, \quad A, B, C, D - \text{п. п.}$$

$$9.148. u(x, t) = A \operatorname{erf} \left(\frac{at}{\sqrt{2}} \right) + \frac{1}{\sigma} \ln(C_1 x^2 + C_2 x + C_3) + B, \quad A, B, C_1, C_2, C_3 - \text{п. п.}$$

$$9.149. u(x, t) = \frac{aAt^2}{2\sigma} + Bt + \frac{1}{A\sigma} (Ax + D) \ln(Ax + D) - \frac{x}{\sigma} + C, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.150. u(x, t) = \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{at}{2}} \right) + \frac{1}{\sigma} \ln(Ax + B) + C, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.151. u(x, t) = At + B + \frac{1}{\sigma} \ln(Cx + D); \quad u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{x^2 + Bx + C}{a(t + A)};$$

$$u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{Dx^2 + Bx + C}{a \cos^2(Dt + A)}; \quad u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{Dx^2 + Bx + C}{a \operatorname{sh}^2(Dt + A)};$$

$$u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{Dx^2 + Bx + C}{a \operatorname{ch}^2(Dt + A)}, \quad A, B, C, D - \text{п. п.}$$

$$9.152. u(x, t) = At^2 + Dt + f(x), \text{ где } f(x) \text{ задана параметрически:}$$

$$x(\xi) = \frac{1}{2A} \left(C - \frac{1}{2A} \cos \xi \right),$$

$$f(\xi) = \frac{1}{2a} (\sin \xi - \xi \cos \xi) + D.$$

У к а з а н и е. Второе слагаемое $f(x)$ решения $u(x, t = \varphi(t) + f(x)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению $f'' \sin f' = \lambda$, порядок которого можно понизить, полагая $f'(x) = \xi(f)$. Из соотношений $\sin \xi d\xi = \lambda dx$ и $df = \xi dx$ можно выразить x и f через ξ .

$$9.153. u(x, y, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A^2(C_2xy - C_1x^2 - C_3y^2 + C_4x + C_5y + C_6)}{(aC_1 + bC_3) \operatorname{ch}^2(At + B)};$$

$$u(x, y, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A(C_1x^2 + C_2xy + C_3y^2 + C_4x + C_5y + C_6)}{(aC_1 + bC_3) \cos^2(At + B)};$$

$$u(x, y, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A(C_1x^2 + C_2xy + C_3y^2 + C_4x + C_5y + C_6)}{(aC_1 + bC_3) \operatorname{sh}^2(At + B)};$$

$$u(x, y, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A(C_1x^2 + C_2xy + C_3y^2 + C_4x + C_5y + C_6)}{(aC_1 + bC_3)(t + B)^2},$$

$$A, D, C_1, C_2, \dots, C_6 - \text{п. п.}$$

$$9.154. u(x, y) = -\frac{r(x + C)^2}{4p} - \frac{r(y + D)^2}{4q} - \frac{1}{2} \left(\frac{b}{q} + \frac{a}{p} \right) \frac{s}{r}, \quad C, D - \text{п. п.}$$

$$9.155. u(x, y, z) = \exp \left[\frac{p(x + C_1)^2}{4a} + \frac{p(y + C_2)^2}{4b} + \frac{p(z + C_3)^2}{4c} - \frac{q}{p} + \frac{3}{2} \right],$$

$$C_1, C_2, C_3 - \text{п. п.}$$

$$9.156. u(x, y) = A \sin \alpha x - \frac{a}{A \alpha^2 \beta^2} e^{\beta u} + C_1x + C_2y + C_3, \quad A, C_1, C_2, C_3 - \text{п. п.}$$

$$9.157. u(x, y) = \frac{B e^{-\alpha x}}{\alpha^2 A} \left(x + \frac{2}{\alpha} \right) - \frac{b e^{k+2}}{B(k+1)(k+2)} + C + C_1y + C_2,$$

$$A, B, C, C_1, C_2 - \text{п. п.}$$

$$9.158. u(x, y) = \frac{Cx^{m+2}}{(m+1)(m+2)} - \frac{by^{n+2}}{C(k+1)(k+2)} + C_1x + C_2y + C_3,$$

$$C, C_1, C_2, C_3 - \text{п. п.}$$

$$9.159. u(x, y) = A \left[\frac{x}{2} \ln(x^2 + 1) + \operatorname{arctg} x - x \right] -$$

$$- \frac{b\sqrt{\pi}}{2\alpha a A} \left[y \operatorname{erf}(\alpha y) - \frac{1 - e^{-\alpha^2 y^2}}{\alpha \sqrt{\pi}} \right] + C_1x + C_2y + C_3, \quad A, C_1, C_2, C_3 - \text{п. п.}$$

$$9.160. u(x, y) = A \int_0^x (x - \xi) f(\xi) d\xi + \frac{1}{A \sigma^2} e^{\sigma y + Bx + Cy + D}, \quad A, B, C, D - \text{п. п.}$$

$$9.161. u(x, y) = \frac{C_1 y^{r+2}}{(k+1)(k+2)} - \frac{1}{C_1} \int_0^x (x - \xi) \frac{g(\xi)}{f(\xi)} d\xi + C_3x + C_4,$$

$$C_1, C_2, C_3, C_4 - \text{п. п.}$$

$$9.162. u(x, y) = Ae^{\sigma y} + By - \frac{1}{A\sigma^2} \int_0^x (x-\xi) \frac{g(\xi)}{f(\xi)} d\xi + Cx + D, \quad A, B, C, D - \text{п. п.}$$

$$9.163. u(x, y) = C_1 \int_0^x (x-\xi) \frac{f_1(\xi)}{g_1(\xi)} d\xi - \frac{1}{C_1} \int_0^y (y-\eta) \frac{g_2(\eta)}{f_2(\eta)} d\eta + C_2x + C_3y + C_4, \\ C_1, C_2, C_3, C_4 - \text{п. п.}$$

$$9.164. u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A^2 \operatorname{sh}^2(Cy + D)}{aC^2 \operatorname{ch}^2(Ax + B)}; \quad u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A^2 \cos^2(Cy + D)}{aC^2 \operatorname{ch}^2(Ax + B)}; \\ u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A^2 \operatorname{ch}^2(Cy + D)}{aC^2 \operatorname{sh}^2(Ax + B)}; \quad u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A^2 (y + D)^2}{a \operatorname{ch}^2(Ax + B)}; \\ u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A^2 \operatorname{ch}^2(Cy + D)}{aC^2 \cos^2(Ax + B)}; \quad u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{\operatorname{ch}^2(Cy + D)}{aC^2 (x + B)^2}, \\ A, B, C, D - \text{п. п.}$$

$$9.165. u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A^2 y^2 + C_1 y + C_2}{a \operatorname{ch}^2(Ax + B)}; \quad u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A^2 y^2 + C_1 y + C_2}{a \operatorname{sh}^2(Ax + B)}; \\ u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{-A^2 y^2 + C_1 y + C_2}{a \cos^2(Ax + B)}; \quad u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{-A^2 y^2 + C_1 y + C_2}{a(x + B)}, \\ A, B, C_1, C_2 - \text{п. п.}$$

$$9.166. u(x, t) = \frac{(x + C)^2}{A - 18at}, \quad A, C - \text{п. п.}$$

$$9.167. u(x, t) = \frac{\lambda x^{-n+2}}{(n-1)(-n+2)}, \quad \text{если } n \neq 1; \quad u(x, t) = \frac{x \ln x - x + A}{B - at}, \quad \text{если } n = 1, \\ u(x, t) = \frac{\ln |x| + Ax + B}{C + at}, \quad \text{если } n = 2; \quad u(x, t) = \frac{e^{-\alpha x} + Ax + B}{C - \alpha^2 at}, \\ A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.195. u(x, t) = \frac{(x + A)^2}{a(t + B)^2}, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.168. u(x, t) = \left[\frac{m(x - A)^2}{2a(n + 2)(B - t)} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.169. u(x, t) = e^{bt} (Ax + B)^{\frac{1}{m+1}}, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.170. u(x, t) = e^{f(t)} (Ax + B)^{\frac{1}{m+1}}, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.171. u(x, t) = B e^{Ax + A^2(1+a)t}, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.172. u(x, t) = A \exp \left(bt - \frac{cx^2}{2a} + Bx \right), \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.173. u(x, t) = A \exp \left(\frac{1}{2} - \frac{A}{4} (x + A)^2 + B e^t \right), \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.174. u(x, t) = \frac{e^{-\alpha x} + Ax + B}{C - \alpha^2 at}, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.175. \text{Если } m \neq 1, \text{ то } u(x, t) = e^{bt} (Ax^{1-m} + B)^{\frac{1}{n+1}}; \\ \text{если } m = 1, \text{ то } u(x, t) = e^{bt} (A \ln |x| + B)^{\frac{1}{n+1}}, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.176. u(x, t) = A e^{bt + Bx^{1-n}}, \quad \text{если } n \neq 1; \\ u(x, t) = A x e^{bt}, \quad \text{если } n = 1, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.177. u = \frac{be^{\alpha x} + Bx + C}{Ae^{-bt} - \alpha^2}, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.178. u(x, t) = \left(\frac{x^{2-k}}{A+\alpha t} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad A - \text{п. п.}$$

$$9.179. u(x, t) = \frac{be^{-\alpha x}}{Ceabt + \alpha a}, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.180. u(x, t) = \frac{2At + a}{(x+B)^2}; \quad u(x, t) = \frac{2aA^2t + B}{(x+B)^2}; \quad u(x, t) = \frac{2aA^2t + B}{\operatorname{sh}^2(Ax + C);}$$

$$u(x, t) = \frac{B - 2aA^2t}{\operatorname{ch}^2(Ax + C)}, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.181. u(x, t) = \frac{\ln|x| + Ax + B}{C + at}, \quad \text{если } n=1; \quad u(x, t) = \frac{\ln|x| + Ax + B}{C + at}, \quad \text{если } n=2;$$

$$u(x, t) = \frac{Ax^{-n+2} + Ax + B}{C + (n+1)(n-2)t}, \quad \text{если } n \neq 1; 2, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.182. u(x, t) = \left[\frac{m^2 x^{-n}}{n(n+m)(C+x)} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad C - \text{п. п.}$$

$$9.183. u(x, t) = \left[\frac{px^{2-n}}{A+bt} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad p = \frac{Bm}{a(n-2)(2+m-n-nm)}, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.184. u(x, t) = \left[\frac{\left(\sqrt{\frac{2A}{2-x}} x + A \right)^2}{B+Ct} \right]^{\frac{1}{k}}, \quad A, B, C, - \text{п. п.}$$

$$9.185. u(x, t) = \left[\frac{mBx^2}{2a(nm+m+2)(A-Bt)} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.186. u(x, t) = \varphi(t)f_j(x), \quad j = 1, 2, 3, \quad \text{где } f_1(x) = \pm \left(\frac{A}{\sqrt{\mu}} \cos(2\sqrt{\mu}x + C) \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\mu = \frac{b}{a} > 0; \quad f_2(x) = \pm \left(\frac{A}{\sqrt{\mu}} \operatorname{sh}(2\sqrt{\nu}x + C) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \nu = -\frac{b}{a} > 0;$$

$$f_3(x) = \pm \left(\frac{A}{\sqrt{\mu}} \operatorname{sh}(2\sqrt{\nu}x + C) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \nu = -\frac{b}{a} > 0, \quad A, C - \text{п. п.}$$

$$9.187. u(x, t) = \frac{A \sin \lambda x + B \cos \lambda x}{\sqrt{A^2 + B^2 + Ce^{kt}}}; \quad u(x, t) = \frac{Ax + B}{\sqrt{C - \frac{2aA^2}{k^2}t}}; \quad k = \frac{2a\lambda^2}{a^2},$$

$$u(x, t) = Ae^{Ax+aA^2t}, \quad A, B, C, \lambda - \text{п. п.}$$

$$9.188. u(x, t) = \varphi(t)(x+C), \quad \text{где } \varphi(t) \text{ задана неявно:}$$

$$\frac{1}{a\varphi} + \frac{2b}{a^2} \ln \left| \frac{2b\varphi - a}{\varphi} \right| = t + C_1, \quad C, C_1 - \text{п. п.}$$

$$9.189. u(x, t) = \left[\frac{A + \frac{m(2m+3)}{m+1} x^{\frac{m+1}{2m+3}}}{x^{\frac{m}{2m+3}} (B - 2a(m+2)t)} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad A, B - \text{п. п.}$$

Р е ш е н и е. Подстановка $u(x, t) = \varphi(t)f(x)$ в уравнение приводит к тождеству

$$\frac{\varphi'}{\varphi^{m+1}} = \frac{a}{f} \frac{d}{dx} (x^m f^m f') = \lambda,$$

из которого следует $\varphi(t) = (C - m\lambda t)^{-\frac{1}{m}}$, где C и λ — произвольные постоянные, и уравнение

$$\frac{d}{dx} (x^m f^m f') = \lambda.$$

В результате замены $\xi = x^{1-n}$, $g = f^{m+1}$ получается уравнение Эмдена–Фаулера $g'' + A\xi^p g^q = 0$, где $A = -\frac{\lambda(m+1)}{A(n-1)^2}$, $p = \frac{n}{1-n}$, $q = \frac{1}{m+1}$. В новых переменных $\xi = \zeta^\alpha$, $g = h(\zeta)\zeta^\beta$ уравнение приобретает форму

$$\zeta^{\beta-2\alpha+2}h'' + (2\beta+1-\alpha)\zeta^{1-2\alpha+\beta}h' + \beta(\beta-\alpha)\zeta^{\beta-2\alpha}h + A\alpha^2\zeta^{p\alpha+q\beta}h^q = 0.$$

Если $2\beta - \alpha + 1 = 0$, $\beta(\beta - \alpha) = 0$, откуда $\alpha = \beta = 1$, то снова возникает уравнение Эмдена–Фаулера $h'' + A\zeta^{-p-q-3}h^q = 0$. В данном случае $p + q + 3 = \frac{n}{1-n} + \frac{1}{m+1} + 3 = 0$, так что $h(\zeta)$ — решение уравнения $h'' + Ah\frac{1}{m+1} = 0$, которое заменами $h'(\zeta) = v(h)$, $v^2(h) = w(h)$ преобразуется в уравнение с разделяющимися переменными $w' = -2Ah\frac{1}{m+1}$. Отсюда

$$w = \frac{2\lambda(m+1)^2}{a(m+2)((n-1)^2)}h^{\frac{m+2}{m+1}} + C_2$$

и при $C_2 = 0$

$$v(h) = \pm \frac{m+1}{n-1} \sqrt{\frac{2\lambda}{a(m+2)}} h^{\frac{m+2}{2(m+1)}}.$$

Так как $v(h) = h'(\zeta)$, то

$$h = \left(C_1 \pm \frac{m}{2(n-1)} \sqrt{\frac{2\lambda}{a(m+2)}} \zeta \right)^{\frac{2(m+1)}{m}}.$$

В старых переменных

$$f(x) = x^{\frac{1-n}{m+1}} \left[\left(C_2 + \frac{m}{2(n-1)} \sqrt{\frac{2\lambda}{a(m+2)}} x^{n-1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{m}}, \text{ где } c_2 = \pm C_1.$$

Итак,

$$u(x, t) = \frac{\left(C_1 + \frac{m(2m+3)}{m+1} \sqrt{\frac{\lambda}{2a(m+2)}} x^{\frac{m+1}{2m+3}} \right)^{\frac{2}{m}}}{x^{\frac{1}{2m+3}} (C - \lambda mt)^{\frac{1}{m}}}.$$

Чтобы получить ответ, нужно разделить числитель и знаменатель на $\sqrt{\frac{\lambda}{2a(m+2)}}$ и переобозначить постоянные.

$$\mathbf{9.190.} \quad u(x, t) = B(\omega t + A)^{-\frac{1}{m}} x^{\frac{2-n}{m}}, \quad A = \left(\frac{\omega m}{a(n-2)(2+m-n-nm)} \right)^{\frac{1}{m}};$$

$$\text{если } n = \frac{3m+4}{m+1}, \text{ то } u(x, t) = x^{\frac{1}{m+1}} \left[\frac{(B + \frac{m+2}{x})^2}{C - 2am(m+1)} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad B, C - \text{ п. п.}$$

У к а з а н и е. См решение предыдущей задачи.

$$\mathbf{9.191.} \quad u(x, t) = C e^{i(Ax + (a|C|^{2m} - A^2)t + B)}, \quad \text{Im } a = 0,$$

$$u(x, t) = \pm \left[-\frac{(n+1)A^2}{a \operatorname{ch}^2(Anx + C)} \right]^{\frac{1}{2n}} e^{i(A^2 t + B)}, \quad \frac{n+1}{a} > 0;$$

$$u(x, t) = \pm \left[-\frac{(n+1)A^2}{a \operatorname{sh}^2(Anx + C)} \right]^{\frac{1}{2n}} e^{i(A^2 t + B)}, \quad \frac{n+1}{a} < 0;$$

$$u(x, t) = \pm \left[-\frac{(n+1)A^2}{a \sin^2(Anx + C)} \right]^{\frac{1}{2n}} e^{i(A^2 t + B)}, \quad \frac{n+1}{a} < 0, \quad A, B, C - \text{ п. п.}$$

$$\mathbf{9.192.} \quad u(x, t) = C e^{i(Ax + (aC^2 + bC + c - A^2)t + B)}, \quad A, B, C - \text{ п. п.}$$

$$9.193. \quad u(x, t) = Ae^{i(Bx + (kA^2 - B^2)t + C)}; \quad u(x, t) = \sqrt{\frac{2}{k}} \frac{Aei(A^2t + B)}{\operatorname{ch}(Ax + C)}, \quad k > 0;$$

$$u(x, t) = \pm \sqrt{-\frac{2}{k}} \frac{Aei(A^2t + B)}{\operatorname{sh}(Ax + C)}, \quad k < 0;$$

$$u(x, t) = \pm \sqrt{-\frac{2}{k}} \frac{Aei(A^2t + B)}{\sin(Ax + C)}, \quad k < 0, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.194. \quad u(x, t) = Ce^{i(Ax + (aC^2 + b - A^2)t + B)}; \quad u(x, t) = \sqrt{\frac{2}{a}} \frac{Ae^{i(b + A^2)t + B}}{\operatorname{ch}(Ax + C)}; \quad a > 0,$$

$$u(x, t) = \pm \sqrt{-\frac{2}{a}} \frac{Ae^{i(b + A^2)t + B}}{\operatorname{sh}(Ax + C)}; \quad a < 0,$$

$$u(x, t) = \pm \sqrt{-\frac{2}{a}} \frac{Ae^{i(b - A^2)t + B}}{\sin(Ax + C)}, \quad a < 0, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.195. \quad u(x, t) = \frac{(x + A)^2}{a(t + B)^2}.$$

$$9.196. \quad u(x, t) = \exp\left(\frac{b}{4}(t + A)^2 - \frac{b}{4a}(x + B)^2\right) - \frac{k}{b} + 1, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.197. \quad u(x, t) = \left(\frac{m + 2}{a(2 - m)}\right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{x + A}{t + B}\right)^{\frac{2}{m}}, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.198. \quad u(x, t) = \left(\frac{2(m + 2)x^{2-n}}{a(2 - n)(2 - n - m)(t + A)^2}\right)^{\frac{1}{m}}, \quad A - \text{п. п.}$$

$$9.199. \quad u(x, t) = \left(\frac{2(m + 1)x^{1-n}}{a(1 - n)(1 - n - m)(t + A)^2}\right)^{\frac{1}{m}}, \quad A - \text{п. п.}$$

$$9.200. \quad u(x, t) = \frac{3\beta^2 e^{-\beta t}}{2a \operatorname{ch}^2\left(\frac{\beta x}{2} + C\right)}; \quad u(x, t) = -\frac{3\beta^2 e^{-\beta t}}{2a \operatorname{sh}^2\left(\frac{\beta x}{2} + C\right)}, \quad C - \text{п. п.}$$

$$9.201. \quad u(x, t) = \frac{at^2 + At + B}{(x + C)^2}; \quad u(x, t) = \frac{aA^2t^2 + Bt + C}{\cos^2(Ax + B)};$$

$$u(x, t) = -\frac{aA^2t^2 + Bt + C}{\operatorname{ch}^2(Ax + B)}; \quad u(x, t) = \frac{aA^2t^2 + Bt + C}{\operatorname{sh}^2(Ax + B)}, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.202. \quad u(x, t) = \frac{(3\beta^2 - b)e^{-\beta t}}{2a \operatorname{ch}^2\left(\frac{1}{2}\sqrt{\beta^2 - bx} + C\right)}; \quad u(x, t) = -\frac{(3\beta^2 - b)e^{-\beta t}}{2a \operatorname{sh}^2\left(\frac{1}{2}\sqrt{\beta^2 - bx} + C\right)};$$

$$u(x, t) = \frac{(3\beta^2 - b)e^{-\beta t}}{2a \cos^2\left(\frac{1}{2}\sqrt{\beta^2 - bx} + C\right)}; \quad u(x, t) = \frac{6e^{-\beta t}}{a(x + C)^2}, \quad \beta = b^2, \quad C - \text{п. п.}$$

$$9.203. \quad u(x, t) = -\frac{(3\beta^2 - b)e^{-\beta x}}{2a \operatorname{ch}^2\left(\frac{1}{2}\sqrt{\beta^2 - bt} + C\right)}; \quad u(x, t) = \frac{(3\beta^2 - b)e^{-\beta x}}{2a \operatorname{sh}^2\left(\frac{1}{2}\sqrt{\beta^2 - bt} + C\right)};$$

$$u(x, t) = -\frac{(3\beta^2 - b)e^{-\beta x}}{2a \cos^2\left(\frac{1}{2}\sqrt{\beta^2 - bt} + C\right)}; \quad u(x, t) = \frac{6e^{-\beta x}}{a(t + C)^2}, \quad \beta = b^2, \quad C - \text{п. п.}$$

$$9.204. \quad u(x, t) = \pm \exp\left(\frac{a}{4}[(x + A)^2 + (y + B)^2] + 1\right), \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.205. \quad u(x, t) = \pm \exp\left(\frac{b}{4}[(y + A)^2 - \frac{ax}{b} + \frac{a^2}{b^3} + \frac{1}{2}]\right), \quad A - \text{п. п.}$$

$$9.206. u(x, t) = \pm \exp\left(\alpha x^2 + \frac{b}{4}(y + A)^2 + \frac{2\alpha}{b}(k + 1) - \frac{q}{b} + \frac{1}{2}\right),$$

$$\alpha = \frac{b \pm \sqrt{b^2 + 16p}}{8}, \quad A - \text{п. п.}$$

$$9.207. u(x, t) = \pm \exp\left(-\frac{ax + by}{m} + \frac{a^2 + b^2}{m^3} - \frac{c}{m}\right).$$

$$9.208. u(x, t) = \pm \exp\left(-\frac{px + qy}{s} + \frac{ap^2 + bq^2}{s^3} - \frac{kp + mq}{s^2} - \frac{r}{s}\right).$$

$$9.209. u(x, t) = \frac{3}{(C-t)^2} \left[\frac{1}{4} \left(\frac{x^2}{a} + \frac{y^2}{b} \right) + C_1 x + C_2 y + aC_1^2 + bC_2^2 \right], \quad C, C_1, C_2 - \text{п. п.}$$

$$9.210. u(x, t) = \frac{(\sqrt{|b|}x \pm \sqrt{a}y)^2 \operatorname{sign} a}{12ab(A-t)}, \quad A - \text{п. п.}$$

$$9.211. u(x, y) = f_j(x)g_k(y), \quad j, k = 1, 2, \quad \text{где}$$

$$f_1(x) = \left(A_1 \cos \sqrt{\frac{\lambda}{a}} x + B_1 \sin \sqrt{\frac{\lambda}{a}} x \right)^{\frac{1}{m+1}}, \quad \frac{\lambda}{a} > 0,$$

$$f_2(x) = \left(A_2 \operatorname{ch} \sqrt{\frac{-\lambda}{a}} x + B_2 \operatorname{sh} \sqrt{\frac{-\lambda}{a}} x \right)^{\frac{1}{m+1}}, \quad \frac{\lambda}{a} < 0,$$

$$g_1(y) = \left(C_1 \cos \sqrt{\frac{\lambda}{b}} y + D_1 \sin \sqrt{\frac{\lambda}{b}} y \right)^{\frac{1}{m+1}}, \quad \frac{\lambda}{b} > 0,$$

$$g_2(y) = \left(C_2 \operatorname{ch} \sqrt{\frac{-\lambda}{b}} y + D_2 \operatorname{sh} \sqrt{\frac{-\lambda}{b}} y \right)^{\frac{1}{m+1}}, \quad \frac{\lambda}{b} < 0;$$

$$u(x, y) = [(Ax + B(Cy + D))]^{\frac{1}{m+1}},$$

$$A, A_1, A_2, B, B_1, B_2, C, C_1, C_2, D, D_1, D_2 - \text{п. п.}$$

$$9.212. u(x, t) = \frac{x + A}{B - bt}, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.213. \text{Если } a \neq 1, \text{ то } u(x, t) = \frac{(1-a)x + A}{Bt^a + bt},$$

$$\text{если } a = 1, \text{ то } u(x, t) = \frac{x + A}{t(Bt^a + b \ln t)}, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.214. u(x, t) = \frac{cx + Ae^{-\frac{bx}{a}} + B}{Ce^{-ct} + B}, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.215. u(x, t) = \frac{ax + b \ln(t + C) + B}{a^2(t + C)}, \quad B, C - \text{п. п.}$$

$$9.216. u(x, t) = (cx + r)t - \frac{bx^2}{2a} + Ax + B, \quad A, B - \text{п. п.}$$

$$9.217. u(x, t) = \frac{C - bcrt - A e^{-ct} + c^2 x}{c(A e^{-ct} - b)};$$

$$u(x, t) = A e^{-\frac{b}{a}x} - \frac{cx}{b} + rt + b, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.218. u(x, t) = -\frac{r}{2c} + p \operatorname{tg}(pct + C) + \frac{B e^{-\frac{\alpha^2 apt}{2c} + \alpha x}}{\cos^k(pct + C)};$$

$$u(x, t) = -\frac{r}{2c} + q \operatorname{th}(qct + C) + \frac{B e^{-\frac{\alpha^2 aqt}{2c} + \alpha x}}{\operatorname{ch}^k(qct + C)};$$

$$u(x, t) = -\frac{r}{2c} + q \operatorname{cth}(qct + C) + \frac{Be^{-\frac{\alpha^2 a q t}{2c} + \alpha x}}{\operatorname{sh}^k(qct + C)},$$

$$p^2 = \frac{r^2 - 4cs}{4c^2}, \quad q^2 = -\frac{r^2 - 4cs}{4c^2}, \quad \alpha^2 = -\frac{c}{a+b}, \quad k = \frac{a+2b}{a+b};$$

если $r^2 = 4sc$, то $u(x, t) = -\frac{r}{2c} - \frac{1}{C-ct} + \frac{Be^{\frac{\alpha^2 a t}{2(a+b)} + \alpha x}}{(C-ct)^k}$, A, B, C — п. п.

У к а з а н и е. Форма решения $u(x, t) = \varphi(t) + \psi(t)e^{\alpha x}$.

9.219. Если $\alpha = \sqrt{\frac{b}{a}}$, то $u(x, t) = \varphi(t) + \psi(t) \cos \alpha x$;
 $u(x, t) = \varphi(t) + \psi(t) \sin \alpha x$; $u(x, t) = \varphi(t) + \psi(t)e^{\pm \alpha x}$;
 если $\alpha = \sqrt{-\frac{b}{a}}$, то $u(x, t) = \varphi(t) + \psi(t) \operatorname{ch} \alpha x$;
 $u(x, t) = \varphi(t) + \psi(t) \operatorname{sh} \alpha x$,

где в каждом случае возможны следующие пары функций:

$$1) \varphi(t) = -\frac{c}{2b} - p \operatorname{th}(pbt + B), \quad \psi(t) = \frac{Ae^{\frac{ct}{2}}}{\operatorname{ch}(pbt + B)},$$

$$2) \varphi(t) = -\frac{c}{2b} - p \operatorname{cth}(pbt + B), \quad \psi(t) = \frac{Ae^{\frac{ct}{2}}}{\operatorname{sh}(pbt + B)},$$

$$3) \varphi(t) = -\frac{c}{2b} - q \operatorname{tg}(qbt + B), \quad \psi(t) = \frac{Ae^{\frac{ct}{2}}}{\cos(qbt + B)},$$

$$4) \varphi(t) = -\frac{c}{2b} - \frac{1}{bt + B}, \quad \psi(t) = \frac{Ae^{\frac{ct}{2}}}{t + B}, \quad p^2 = \frac{c^2 - 4sb}{4b^2}, \quad q^2 = -\frac{c^2 - 4sb}{4b^2},$$

A, B — п. п.

9.220. $u(x, y) = Mx + \psi(x)e^{\pm \sqrt{-b}y}$, где

$$\psi(x) = \sqrt{x} [C_1 J_\nu(\lambda x) + C_2 Y_\nu(\lambda x)], \quad -ab = \lambda^2 > 0;$$

2) $\psi(x) = \sqrt{x} [C_1 I_\nu(\lambda x) + C_2 K_\nu(\lambda x)], \quad ab = \lambda^2 > 0$,
 M — корень уравнения $M^2bc + Mk + r = 0$, C_1, C_2 — п. п.

9.221. 1) $u(x, y) = M + (A \cos \beta x + B \sin \beta x) e^{\pm \sqrt{-b}y}$, $-\alpha^2 = \beta^2 > 0$;

2) $u(x, y) = M + (Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x}) e^{\pm \sqrt{-b}y}$, $\alpha^2 > 0$;

3) $u(x, y) = M + (Ax + B) e^{\pm \sqrt{-b}y}$, $\alpha = 0$,

где M — корень уравнения $M^2bc + Mk + r = 0$, $\alpha^2 = 2Mbc + ab + k$, A, B — п. п.

9.223. $u(x, y, t) = \varphi(t) + \psi(t)f(x, y)$ где

$$1) \varphi(t) = -\frac{k}{2c} - p \operatorname{th}(pct + B), \quad \psi(t) = \frac{Ae^{(\frac{k}{2} - \frac{ac}{b})t}}{\operatorname{sh}(pct + B)},$$

$$2) \varphi(t) = -\frac{k}{2c} - p \operatorname{cth}(pct + B), \quad \psi(t) = \frac{Ae^{(\frac{k}{2} - \frac{ac}{b})t}}{\operatorname{ch}(pct + B)},$$

$$3) \varphi(t) = -\frac{k}{2c} + q \operatorname{tg}(qct + B), \quad \psi(t) = \frac{Ae^{(\frac{k}{2} - \frac{ac}{b})t}}{\cos(qct + B)},$$

$$4) \varphi(t) = -\frac{k}{2c} - \frac{1}{ct + B}, \quad \psi(t) = \frac{Ae^{(\frac{k}{2} - \frac{ac}{b})t}}{t + B},$$

$p^2 = \frac{k^2 - 4cm}{4c^2}$, $q^2 = -\frac{k^2 - 4cm}{4c^2}$, $f(x, y)$ — решение уравнения $\Delta f + \lambda f = 0$, $\lambda = \frac{c}{b}$; некоторые решения могут быть получены методом разделения переменных в форме $f(x, y) = X(x)Y(y)$:

$$\begin{aligned} X'' + \alpha X &= 0, \\ \frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y} + \lambda &= 0 \implies Y'' + \beta Y = 0, \\ \text{где } \alpha + \beta &= \lambda. \end{aligned}$$

Ниже приведены некоторые из решений вида $u = X_i(x)$, $u = Y_j(y)$, $u = X_i(x)Y_j(y)$, $i, j = 0, 1, 2$, где: $X_0 = Ax + B$, если $\alpha = 0$; $X_1 = A \cos \sqrt{\alpha} x + B \sin \sqrt{\alpha} x$, если $\alpha > 0$; $X_2 = A \operatorname{ch} \sqrt{-\alpha} x + B \operatorname{sh} \sqrt{-\alpha} x$, если $\alpha < 0$; $Y_0 = Cy + D$, если $\beta = 0$; $Y_1 = C \cos \sqrt{\beta} y + D \sin \sqrt{\beta} y$, если $\beta > 0$; $Y_2 = C \operatorname{ch} \sqrt{-\beta} y + D \operatorname{sh} \sqrt{-\beta} y$, если $\beta < 0$, A, B, C, D, λ — п.п. (15 решений $f(x, y)$).

9.224. $u(x, y, t) = Ax + By + C - (b + a(\alpha^2 + \beta^2))t$;

$$u(x, y, t) = A - bt + B e^{a(\alpha^2 + \beta^2)(At - \frac{bt^2}{2} + \alpha x + \beta y)};$$

$$u(x, y, t) = \frac{C - b(Bt - 2at^2) + x^2}{B - 2at}; \quad u(x, y, t) = \frac{C - b(Bt - 2at^2) + y^2}{B - 2at};$$

$$u(x, y, t) = C \operatorname{sh}(4Aat + 2B) + \frac{b}{4aA} \operatorname{sh}(4Aat + 2B) \ln |\operatorname{cth}(2Aat + B)| + A \operatorname{th}(2Aat + B)x^2 + A \operatorname{cth}(2Aat + B)y^2;$$

$$u(x, y, t) = C \operatorname{sh}(4Aat + 2B) + \frac{b}{4aA} \operatorname{sh}(4Aat + 2B) \ln |\operatorname{cth}(2Aat + B)| + A \operatorname{cth}(2Aat + B)x^2 + A \operatorname{th}(2Aat + B)y^2;$$

$$u(x, y, t) = C \sin(4Aat + 2B) - \frac{b}{4aA} \sin(4Aat + 2B) \ln |\operatorname{tg}(2Aat + B)| + A \operatorname{ctg}(2Aat + B)x^2 - \operatorname{tg}(2Aat + B)y^2;$$

$$u(x, y, t) = C \sin(4Aat + 2B) - \frac{b}{4aA} \sin(4Aat + 2B) \ln |\operatorname{tg}(2Aat + B)| - A \operatorname{tg}(2Aat + B)x^2 - A \operatorname{tg}(2Aat + B)y^2, \quad A, B, C, \alpha, \beta — \text{п.п.}$$

9.225. $u(x, y, t) = Ax + By + (aA^2 + bB^2)t$, A, B — п.п.

9.226. $u(x, y, t) = A \operatorname{ctg} \theta + B \sin \theta e^{\pm \mu x} \pm \frac{A \sin(\mu y + \mu_0)}{\sin \theta}$;

$$u(x, y, t) = A \operatorname{cth} \theta + B \operatorname{sh} \theta e^{\pm \mu x} \pm \frac{A \sin(\mu y + \mu_0)}{\operatorname{sh} \theta};$$

$$u(x, y, t) = A \operatorname{ctg} \theta + B \sin \theta e^{\pm \mu y} \pm \frac{A \sin(\mu x + \mu_0)}{\sin \theta};$$

$$u(x, y, t) = A \operatorname{cth} \theta + B \operatorname{sh} \theta e^{\pm \mu y} \pm \frac{A \sin(\mu x + \mu_0)}{\operatorname{sh} \theta};$$

$$u(x, y, t) = \frac{A}{\theta} + B \theta e^{\pm \mu x} \pm \frac{A \sin(\mu y + \mu_0)}{\theta};$$

$$u(x, y, t) = \frac{A}{\theta} + B \theta e^{\pm \mu y} \pm \frac{A \sin(\mu x + \mu_0)}{\theta};$$

$$u(x, y, t) = \frac{2A}{\sin 2\theta} + A \operatorname{ctg} \theta \operatorname{ch}(\mu x + \mu_0) \pm A \operatorname{tg} \theta \sin(\mu y + \mu_1);$$

$$u(x, y, t) = \frac{2A}{\operatorname{sh} 2\theta} + A \operatorname{cth} \theta \operatorname{ch}(\mu x + \mu_0) \pm A \sin(\mu y + \mu_1),$$

$$\theta = A\mu^2 at + C; \quad A, B, C, \mu, \mu_0, \mu_1 — \text{п.п.}$$

Ответ относится к решениям вида $u(x, y, t) = \varphi(t) + \psi(t)f(x) + \chi(t)g(y)$. В соответствующем тождестве разделение переменных происходит, если $f'' = \nu f$, $g'' = \nu g$, где ν — любое вещественное число. Получается система уравнений

$$\begin{cases} \varphi' = a\nu(A^2 - \sigma B^2)\psi^2 - a\nu(C^2 + \sigma D^2)\xi^2, \\ \psi' = a\nu\varphi\psi, \\ \chi' = -a\nu\varphi\chi, \end{cases}$$

где $\sigma = \text{sign } \nu$; A, B, C, D — произвольные постоянные.

$$\mathbf{9.227.} \quad \varphi(t) = \frac{-1}{A+4bt}, \quad \psi(t) = \frac{B}{A+4bt}, \quad \chi(t) = -\frac{a}{2b} \ln |A+4bt| - \frac{B^2}{4(A+4bt)} + C, \\ A, B, C - \text{ п. п.}$$

$$\mathbf{9.228.} \quad \varphi(t) = \frac{1}{A-4bt}, \quad \psi(t) = \frac{2ct+B}{A-4bt}, \\ \chi(t) = -\frac{a}{2b} \ln |A-4bt| + \frac{1}{4} \left(\frac{cA}{2b} + B \right)^2 \frac{1}{A-4bt} - \frac{1}{4b} \left(s - \frac{c^2}{4b} \right) (A-4bt) + C, \\ A, B, C - \text{ п. п.}$$

$$\mathbf{9.229.} \quad \varphi(t) = -\frac{1}{A+\mu t}, \quad \psi(t) = \frac{B}{A+\mu t}, \\ \chi(t) = -\frac{B^2}{4(A+\mu t)} + \frac{c(A+\mu t)}{4(a+b)} + \frac{C}{(A+\mu t)^\nu}, \\ \mu = 2(a+2b), \quad \nu = \frac{2}{a+2b}, \quad A, B, C - \text{ п. п.}$$

$$\mathbf{9.230.} \quad \varphi(t) = \frac{c}{Ae^{-ct} - 2a}, \quad \psi = \frac{2bct+B}{Ae^{-ct} - 2a}, \\ \chi(t) = \frac{bt(bct+B) - \frac{s}{c} - Ae^{-ct} - 2ast + C}{Ae^{-ct} - 2a}, \quad A, B, C - \text{ п. п.}$$

$$\mathbf{9.231.} \quad \varphi(t) = \frac{1}{\mu(A-t)}, \quad \psi = \frac{2ct+B}{\mu(A-t)}, \\ \chi(t) = \frac{(2ca+B)^2}{4\mu(A-t)} + \left(\frac{c^2}{\mu} - \frac{\mu s}{4(a+b)} \right) (A-t) - \frac{2c}{\mu} (2cA+B) + \frac{C}{(A-t)^\nu}, \\ \mu = 2(a+2b), \quad \nu = \frac{2}{a+2b}, \quad A, B, C - \text{ п. п.}$$

$$\mathbf{9.232.} \quad \varphi(t) = C_1 e^{bt}, \quad \psi = C_2 e^{bt} + \frac{2aC_1^2}{b} e^{2bt}, \\ \chi(t) = C_3 e^{bt} + \frac{2aC_1 C_2}{b} e^{2bt} + \frac{2a^2 C_1^3}{3b^2} e^{3bt} - \frac{c}{b}, \quad C_1, C_2, C_3 - \text{ п. п.}$$

$$\mathbf{9.233.} \quad \varphi(t) = \frac{1}{C-4bt}, \quad \psi = \frac{A}{C-4bt} - \frac{a \ln |C-4bt|}{b \ln |C-4bt|}, \\ \chi(t) = \left(\frac{A^2}{4} + \frac{a}{2b^2} \right) \frac{1}{C-4bt} - \frac{aA \ln |C-4bt|}{C-4bt} + \frac{a^2 \ln^2 |C-4bt|}{4b^2(C-4bt)} + ct + B, \\ A, B, C - \text{ п. п.}$$

$$\mathbf{9.234.} \quad \varphi(t) = C_1 e^{bt} + C_2 e^{-bt}, \\ \psi = C_3 e^{bt} + C_4 e^{-bt} + \frac{4aC_1^2}{3b^2} e^{2bt} + \frac{4aC_2^2}{3b^2} e^{-2bt} - \frac{8aC_1 C_2}{b^2},$$

$$\begin{aligned}\chi(t) = & C_5 e^{bt} + C_6 e^{-bt} + \frac{2aC_1C_3}{3b^2} e^{2bt} + \frac{2aC_2C_4}{3b^2} e^{-2bt} + \frac{a^2C_1^3}{3b^4} e^{3bt} + \\ & + \frac{a^2C_2^3}{3b^4} e^{-3bt} - \frac{20a^2C_1^2C_2}{3b^3} t e^{bt} + \frac{20a^2C_1C_2^2}{3b^3} t e^{-bt} - \frac{2a(C_2C_3 + C_1C_4)}{b^2}, \\ & C_1, \dots, C_6 - \text{п. п.}\end{aligned}$$

9.235. $\varphi(t) = C_1 \cos \sqrt{2} bt + C_2 \sin \sqrt{2} bt$, $\psi = C_3 \cos bt + C_4 \sin bt$,

$$\begin{aligned}\chi(t) = & \frac{a(C_1^2 - C_2^2)}{\sqrt{2}b} \sin 2\sqrt{2} bt - \frac{\sqrt{2}aC_1C_2}{b} \cos 2\sqrt{2} bt + \\ & + [2a(C_1^2 + C_2^2) + c]t(t + A) + B, \\ & A, B, C_1, \dots, C_4 - \text{п. п.}\end{aligned}$$

9.236. $u(x, y, t) = \varphi(t)x^2 + \psi(t)y^2 + \chi(t)$.

1) $\varphi(t) = A \operatorname{th}(2Aat + B)$, $\psi(t) = A \operatorname{cth}(2Aat + B)$,

$$\chi(t) = \left(\frac{b}{4aA} \ln |\operatorname{cth}(2Aat + B)| + C \right) \operatorname{sh}(4Aat + 2B);$$

2) $\varphi(t) = A \operatorname{cth}(2Aat + B)$, $\psi(t) = A \operatorname{th}(2Aat + B)$,

$$\chi(t) = \left(\frac{b}{4aA} \ln |\operatorname{th}(2Aat + B)| + C \right) \operatorname{sh}(4Aat + 2B);$$

3) $\varphi(t) = -A \operatorname{tg}(2Aat + B)$, $\psi(t) = A \operatorname{ctg}(2Aat + B)$,

$$\chi(t) = \left(C - \frac{b}{4aA} \ln |\operatorname{tg}(2Aat + B)| + C \right) \sin(4Aat + 2B);$$

4) $\varphi(t) = A \operatorname{ctg}(2Aat + B)$, $\psi(t) = -A \operatorname{tg}(2Aat + B)$,

$$\chi(t) = \left(C - \frac{b}{4aA} \ln |\operatorname{ctg}(2Aat + B)| + C \right) \sin(4Aat + 2B);$$

5) $\varphi(t) = 0$, $\psi(t) = (2at + B)^{-1}$, $\chi(t) = \left(C - \frac{b}{2a} \ln |2Aat + B| \right) (2at + B)$;

6) $\varphi(t) = (2at + B)^{-1}$, $\psi = 0$, $\chi(t) = \left(C - \frac{b}{2a} \ln |2Aat + B| \right) (2at + B)$;

7) $u(x, y, t) = \frac{(x \pm y)^2}{A + 4at} + B(A + 4at) e^{-bt}$, $A, B, C - \text{п. п.}$

9.237. $u(x, y, t) = \varphi(t)x^2 + \psi(t)y^2 + xy\xi(t) + \chi(t)$.

$$\varphi(t) = \frac{\mu + C}{2(C - 6\mu t)}, \quad \psi(t) = \frac{1}{C - 6\mu t}, \quad \xi(t) = \frac{\mu - C}{2(C - 6\mu t)},$$

$$\chi(t) = \frac{b}{8\mu} (C - 6\mu t) + \frac{A}{\sqrt[3]{C - 6\mu t}}, \quad \mu = \pm \sqrt{C^2 + 1}, \quad A, C - \text{п. п.}$$

9.238. $u(x, t) = \left(\frac{1}{km} + C e^{\beta t \pm \sqrt{\beta^2 - ak^2 m(m-1)^2} x} \right)^{\frac{1}{1-m}}$; $C, \beta - \text{п. п.}$

9.239. $u(x, t) = \left(\frac{1}{A - mbt} + \frac{B}{(A - mbt)^\mu} \right)^{\frac{1}{m}}$, $\mu = \frac{m+2}{m+1}$, $A, B - \text{п. п.}$

9.240. $u(x, t) = \left[C e^{\frac{k(m-1)}{2(m-1)}(t \pm x)} \pm \frac{1}{k\sqrt{b}} \left(a + \frac{(1-m)}{2} b e^{kt} \right) \right]^{\frac{2}{1-m}}$, $C - \text{п. п.,}$

сочетание знаков — любое.

$$9.241. u(x, t) = [Ae^{\beta t} + Be^{\mu t + \nu x}]^{\frac{2}{1-m}},$$

$$A = \pm \frac{(m-1)\sqrt{b}}{\sqrt{k^2 - a(m+1)^2}}, \quad \mu = \frac{m-1}{4k(m+1)}(k^2 + a(m-1)(m+3)),$$

$$\nu^2 = \left(\frac{m-1}{4k(m+1)}\right)^2 (k^2 - a(m+3)^2)(k^2 - a(m-1)^2), \quad B - \text{п.п.}$$

$$9.242. u(x, y, t) = (A + Be^{aA(\alpha^2 + \beta^2)t + \alpha x + \beta y})^{-1}, \quad A, B, \alpha, \beta - \text{п.п.}$$

9.243. $u(x, y, t) = e^{\int f(t) dt} [\Psi(x, y)]^{\frac{1}{n+1}}$, где Ψ — решение уравнения Лапласа: $\Delta \Psi = 0$; $\Psi(x, y)$ — вещественная или мнимая часть любой аналитической функции: $\Psi = A(x^3 - 3xy^2)$, $\Psi = B(x^2y - y^3)$, $\Psi = Ce^{\mu x} \cos \mu y$, $\Psi = De^{\mu x} \sin \mu y$ и т. п., A, B, C, D, μ — п.п.

$$9.244. u(x, t) = \left(\frac{x^2 + Bx + B^2}{A - \omega t} - \frac{bm^2(A - \omega t)}{4a(1+m)} + \frac{C}{(A - \omega t)^\lambda} \right)^{\frac{1}{m}},$$

$$\omega = \frac{2a(m+2)}{m}, \quad \lambda = \frac{m}{m+2}, \quad A, B, C - \text{п.п.}$$

$$9.245. 1) u(x, t) = \left(\frac{\omega t + C}{\omega t + C)^2 + B} + \frac{\operatorname{ch} \alpha x}{\sqrt{(\omega t + C)^2 + B}} \right)^{-\frac{1}{3}};$$

$$2) u(x, t) = \left(\frac{\omega t + C}{\omega t + C)^2 + B} + \frac{\operatorname{sh} \alpha x}{\sqrt{B - \omega t + C)^2}} \right)^{-\frac{1}{3}};$$

$$3) u(x, t) = \left[\frac{4A^2B^2(\omega t + C)^2}{16A^2B^2(\omega t + C)^2 + D} + 2\sqrt{\frac{AB}{16A^2B^2(\omega t + C)^2 + D}} \times \right. \\ \left. \times (Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x}) \right]^{-\frac{1}{3}},$$

$$\omega = \frac{3m}{2}, \quad \alpha^2 = \frac{9b}{2a}, \quad A, B, C, D - \text{п.п.}$$

$$9.246. 1) u(x, t) = \left(\frac{x^2}{A - kt} + \frac{Bx}{(A - kt)^\mu} \right)^{\frac{1}{m}},$$

$$k = \frac{2a}{m}(mn + m + 2), \quad \mu = \frac{m(n+1)}{mn + m + 2};$$

$$2) \text{ если } mn = -1, \text{ то } u(x, t) = \left(\frac{x^2}{A - kt} + \frac{Bx}{(A - kt)^\mu} \right)^{\frac{1}{m}},$$

$$k = \frac{2a(m+1)}{m}, \quad \mu = \frac{m-1}{m+1};$$

$$3) \text{ если } mn + m + 2 = 0, \text{ то } u(x, t) = (Ax^2 + Ce^{-\frac{4aA}{m}t})^{\frac{1}{m}}, \quad A, B, C - \text{п.п.}$$

$$9.247. u(x, y, t) = [C \operatorname{sh}(4Aat + 2B) + A \operatorname{th}(2Aat + B)x^2 + A \operatorname{cth}(2Aat + B)y^2]^{-1};$$

$$u(x, y, t) = [C \operatorname{sh}(4Aat + 2B) + A \operatorname{cth}(2Aat + B)x^2 + A \operatorname{th}(2Aat + B)y^2]^{-1};$$

$$u(x, y, t) = [C \sin(4Aat + 2B) + A \operatorname{ctg}(2Aat + B)x^2 - \operatorname{tg}(2Aat + B)y^2]^{-1};$$

$$u(x, y, t) = [C \sin(4Aat + 2B) - A \operatorname{tg}(2Aat + B)x^2 + A \operatorname{ctg}(2Aat + B)y^2]^{-1};$$

$$u(x, y, t) = (A + B e \alpha^2 a A t + \alpha x)^{-1}, \quad u(x, y, t) = (A + B e \alpha^2 a A t + \alpha y)^{-1};$$

$$u(x, y, t) = \frac{B - 2at}{A + x^2}; \quad u(x, y, t) = \frac{B - 2at}{A + y^2}, \quad A, B, C, \alpha - \text{п. п.}$$

Имеется также ряд решений $u = \frac{1}{v}$, где v — решение задачи 9.224.

9.248. 1) $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A \sin \mu x + B \cos \mu x + 1}{c + bt}, \quad \mu = \sqrt{\frac{b}{a}}, \quad \frac{b}{a} > 0;$

2) $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{A \operatorname{sh} \mu x + B \operatorname{ch} \mu x + 1}{c + bt}, \quad \mu = \sqrt{-\frac{b}{a}}, \quad -\frac{b}{a} > 0, \quad A, B, C - \text{п. п.}$

9.249. $u(x, t) = A(B e^{\frac{A\omega}{a}(x-\omega t)} - 1), \quad A, B, \omega - \text{п. п.}$

9.250. $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \left[\frac{1}{A-t} \left(\frac{x^{2-n}}{a(2-n)} + \frac{Bx^{1-n}}{1-n} + C \right) \right], \quad A, B, C - \text{п. п.}$

9.251. $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{(x+B)e^{\mu x} + C}{A + a\mu t}; \quad u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{C-x}{a\mu(A-t)}, \quad A, B, C - \text{п. п.}$

9.252. $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \left(A e^{-\frac{\sigma b^2(t \pm x)}{2a}} - \frac{at+c}{b} + \frac{a^2}{\sigma b^3} \right), \quad A - \text{п. п.}$

9.253. $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \left(A e^{\frac{\sigma b^2(x \pm t)}{2a}} - \frac{ax+c}{b} - \frac{a^2}{\sigma b^3} \right), \quad A - \text{п. п.}$

9.254. 1) $u(x, t) = -\frac{1}{\sigma} \ln \left(A e^{\pm \frac{k^2 c - \sigma b^2}{2kc} x + \frac{k^2 c + \sigma b^2}{2kc} t} + \frac{ab\sigma}{k^2 c - \sigma b^2} e^{kt} - \frac{c}{b} \right);$

2) если $\sigma b^2 = k^2 c$, то $u(x, t) = -\frac{1}{\sigma} \ln \left(C e^{kt} + \frac{ka}{2b} (t \pm x) e^{kt} - \frac{b\sigma}{k^2} \right),$
 $A, C - \text{п. п.}$

9.255. 1) $u(x, t) = -\frac{1}{\sigma} \ln \left(A e^{\pm \frac{k^2 c + \sigma b^2}{2kc} x + \frac{k^2 c + \sigma b^2}{2kc} t} - \frac{ab\sigma}{k^2 c - \sigma b^2} e^{kx} - \frac{c}{b} \right);$

2) если $\sigma b^2 + k^2 c = 0$, то $u(x, t) = -\frac{1}{\sigma} \ln \left(C e^{kx} + \frac{ka}{2b} (x \pm t) e^{kt} + \frac{b\sigma}{k^2} \right),$
 $A, C - \text{п. п.}$

9.256. 1) $u(x, t) = -\frac{1}{\sigma} \ln \left(C e^{\pm \frac{\sigma b^2 - 4ak^2}{4ka} x - \frac{\sigma b^2}{4ka} t} + \frac{ab\sigma}{4ak^2 - \sigma b^2} e^{-kt} - \frac{a}{b} e^{kt} \right);$

2) если $\sigma b^2 = 4ak^2$, то $u(x, t) = -\frac{1}{\sigma} \ln \left(A e^{-kt} - \frac{kc}{b} (t \pm x) e^{-kt} - \frac{b\sigma}{4k^2} e^{kt} \right),$
 $A, C - \text{п. п.}$

9.257. 1) $u(x, t) = -\frac{1}{\sigma} \ln \left(C e^{\pm \frac{\sigma b^2 + 4ak^2}{4ka} t + \frac{\sigma b^2}{4ka} x} - \frac{bc\sigma}{4ak^2 + \sigma b^2} e^{-kx} - \frac{a}{b} e^{kx} \right);$

2) если $\sigma b^2 + 4ak^2 = 0$,

то $u(x, t) = -\frac{1}{\sigma} \ln \left(A e^{-kx} - \frac{kc}{b} (x \pm t) e^{-kx} + \frac{b\sigma}{4k^2} e^{kx} \right),$
 $A, C - \text{п. п.}$

9.258. $u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{x^2 + Ax + B}{C - 2at}, \quad A, B, C - \text{п. п.}$

9.259. 1) $u(x, y, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{Ax^2 + By^2 + xy + D}{C - 2a(A+B)t}$, A, B, C — п. п.;

2) $u(x, y, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{\frac{A+\mu}{2}x^2 + \frac{A-\mu}{2}y^2 + w(x, y)}{C - aAt}$, A, B, C, μ — п. п.,

w — решение уравнения $\Delta w = 0$ (см. ответ к задаче 9.241).

9.260. $u = \frac{1}{\sigma} \ln v$, $v = \varphi(t)\Phi(x, y)$, где $\varphi(t) = [(a\lambda \int e^{\sigma F(t)} dt + C)e^{-\sigma F(t)}]^{-1}$,
 $F(t) = \int f(t)dt$, $\Phi(x, y) = -\frac{\lambda+\mu}{2}x^2 - \frac{\lambda-\mu}{2}y^2 + \Psi(xy)$, C, λ, μ — п. п.,
 Ψ — решение уравнения $\Delta \Psi = 0$ (см. ответ к задаче 9.241),
 C, λ, μ — п. п.

9.261. $u(x, t) = \exp \left[\left(Ae^{bt} - \frac{c}{b} \right) x + \frac{aA^2}{b} e^{2bt} - \frac{2acA}{b} t e^{bt} + b e^{bt} - \frac{c^2}{b^3} \right]$, A, B — п. п.

9.262. $u(x, t) = \exp \left[\left(Ae^{bt} - \frac{c}{b} t - \frac{c}{b^2} \right) x + \frac{aA^2}{b} e^{2bt} + B e^{bt} - \frac{b^2 t^2 + 4bt + 4}{b} \right]$,
 A, B — п. п.

9.263. $u(x, t) = \exp \left[\frac{ce^{ct}}{A - be^{ct}} + \frac{Be^{(c-b)t + \alpha x}}{(A - be^{ct})^2} \right]$, A, B — п. п.

9.264. $u(x, t) = \exp \left[\frac{bx^2}{4a(Ce^{-bt} - 1)} - \frac{n+1}{2c} e^{bt} \ln |Ce^{-bt} - 1| + B e^{bt} \right]$, A, B — п. п.

9.265. $u(x, t) = \exp \left[\frac{bx^2}{2a(ce^{-bt^2} - 1)} - \frac{n+1}{2} e^{bt^2} \ln |Ae^{-bt^2} - 1| + B e^{bt} \right]$, A, B — п. п.

9.266. $u(x, t) = \exp \left[\frac{cx^2}{4a(Ae^{-ct} - 1)} - \frac{a+b}{2aA} e^{ct} \ln |Ae^{-ct} - 1| + \frac{p}{\alpha+c} + B e^{ct} \right]$,
 A, B — п. п.

9.267. $u(x, t) = \exp \left[Ae^{bt} x + \frac{aA^2}{b} e^{2bt} + B e^{-bt} - \frac{c}{b^2} (bt + 1) \right]$;
 $u(x, t) = \exp \left[\frac{bx^2}{4a(Ae^{-bt} - 1)} + \frac{Bx}{Ae^{-bt} - 1} + \frac{AB^2}{ab} \frac{e^{bt}}{Ae^{-bt} - 1} - \right.$
 $\left. - \frac{1}{2a} e^{bt} \ln |Ae^{-bt} - 1| - \frac{c}{b^2} (bt + 1) + D e^{bt} \right]$, A, B — п. п.

9.268. $u(x, t) = \exp \left[\frac{ax^2}{(Ce^{-at} - 4)} - \frac{Bx}{(Ce^{-at} - 4)} + \frac{B e^{at}}{aC(Ce^{-at} - 4)} - \right.$
 $\left. - \frac{2}{c} \ln |Ce^{at} - 4| + D e^{bt} \right]$;

$u(x, t) = \exp \left(Ce^{-at} x + \frac{c^2}{a} e^{2at} + B e^{at} \right)$;

$u(x, t) = \exp \left(Ce^{at} - \frac{ax^2}{4} + Bx + \frac{1}{2} - \frac{B^2}{a} \right)$, B, C — п. п.

9.269. $u(x, y) = \frac{1}{b} \exp \left[\frac{a}{8} (x+y)^2 + C(x+y) + \frac{zc^2}{a} + \frac{1}{2} \right]$, C — п. п.

9.270. Если $a \neq -1$, то $u(x, t) = C e^{-\frac{\omega}{a+1}(x-\omega t)}$;

если $a = -1$, то $u(x, t) = \exp(C e^{-\omega(x-\omega t)})$, C, ω — п. п.

$$9.271. \left[\frac{1-m}{2} \sqrt{\frac{2c}{(m+1)(aA^2+bB^2)}} (Ax+By) + C \right]^{\frac{2}{1-m}}, \quad A, B, C - \text{ п. п.}$$

$$9.272. u(x, t) = \frac{a}{b} \ln \left| A e^{-\frac{\omega}{a}(x-\omega t)} + B \right|, \quad A, B, \omega - \text{ п. п.}$$

$$9.273. u(x, t) = \left[\frac{m\omega}{a(m-1)}(x-\omega t) + A \right]^{\frac{1}{m}}, \quad A, \omega - \text{ п. п.}$$

$$9.274. u(x, t) = \left[\frac{m\omega}{a}(x-\omega t) + C \right]^{\frac{1}{m}}, \quad C, \omega - \text{ п. п.}$$

$$9.275. u(x, t) = \left[\frac{Am\omega}{a}(x-\omega t) + B \right]^{\frac{1}{m}}, \quad A = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - \frac{4ab}{\omega^2}}}{2}, \quad B, \omega - \text{ п. п.}$$

$$9.276. u(x, t) = f(x-t), \text{ где } f \text{ задана неявно уравнением } \pm f + \frac{1}{3a} \ln \left| f \mp \frac{1}{3a} \right| = x-t+A, \text{ в котором нужно брать либо верхние, либо нижние знаки, } A - \text{ п. п.}$$

$$9.277. u(x, t) = \pm (C-2(x-t))^{-\frac{1}{2}}, \quad C - \text{ п. п.}$$

$$9.278. u(x, t) = \frac{1}{\sigma} \ln \left(C + \frac{\sigma\omega}{a}(\omega t - x) \right), \quad C, \omega - \text{ п. п.}$$

$$9.279. u(x, t) = \left[\frac{a(m+n-1)^2(Ax+By+C)}{2(m+n+1)(A^2+B^2)} \right]^{\frac{1}{1-m-n}}, \quad A, B, C - \text{ п. п.}$$

$$9.280. u(x, y) = f(Ax+By), \text{ где } f \text{ задана неявно уравнением } \frac{aA^2}{m+1} f^{m+1} + \frac{bB^2}{n+1} f^{n+1} = C(Ax+By) + D, \quad A, B, C, d - \text{ п. п.}$$

$$9.281. u(x, t) = \beta + A e^{\mu x - \omega t}, \text{ где } \beta, \omega, \mu, - \text{ решение системы уравнений: } b\beta^2 + \beta c + d = 0, \omega\beta - d = 0, a\mu^2 + b = 0; \quad A - \text{ п. п.}$$

$$9.282. u(x, t) = C e^{\mu x - \omega t} - \frac{q}{p}, \text{ где } \omega = \frac{aq}{p} \mu^2 - c\mu - p; \quad C, \mu - \text{ п. п.}$$

$$9.283. u(x, t) = (1 + C e^{\mu x - \omega t})^{-1}, \text{ где } \omega, \mu - \text{ решение системы уравнений: } \omega - 2b = 0, a\mu^2 - b = 0; \quad C - \text{ п. п.}$$

$$9.284. u(x, t) = f(x - \omega t), \text{ где функция } f \text{ задана неявно уравнением } 1 + \frac{C}{f} = A \exp \left(\frac{C}{f} - \frac{C^2 \omega}{a}(x - \omega t) \right); \quad A, C, \omega, - \text{ п. п.}$$

$$9.285. u(x, t) = f(z), \quad z = \omega t - x. \text{ Если } m = -1, \text{ то } f(z) = \frac{\omega}{z} + A, \text{ если } m = 1, \text{ то } f \text{ определяется неявно уравнением } f - A \ln |f + A| = \frac{q\omega z}{a} + B, \text{ если } m = 2, \text{ то } f \text{ определяется неявно уравнением } f^2 = \frac{2\omega z}{a} + C \text{ либо уравнением } (f - A)^2 + 2A^2 \ln |f + A| = 4A^2 + \frac{2\omega z}{a} + C; \quad A, B, C, \omega - \text{ п. п.}$$

$$9.286. u(x, t) = \frac{1}{C e^{-\frac{x+t}{2}} - 3b}, \quad u(x, t) = \frac{1}{C e^{\frac{x-t}{2}} + 3b}; \quad C - \text{ п. п.}$$

$$9.287. u(x, t) = \left(\frac{2}{a}(\omega + c)(x - \omega t) + A \right)^{-\frac{1}{2}}; \quad u(x, t) = f(x - \omega t), \text{ где } f \text{ определяется неявно уравнением } \frac{A}{f} - \ln |1 + \frac{A}{f}| = \frac{A^2(\omega + c)z}{a} + B; \quad A, B, \omega - \text{ п. п.}$$

$$\begin{aligned}
 9.288. \quad & u(x, t) = 2A \operatorname{tg}(A(\omega t - x) + B) - \omega; \quad u(x, t) = 2A \operatorname{th}(A(\omega t - x) + B) - \omega, \\
 & u(x, t) = \frac{2\omega}{1 + Ae^{-\omega(x+\omega t)}}, \quad u(x, t) = \frac{2}{x + \omega t + A} + \omega; \\
 & u(x, t) = A \frac{e^{A(x-\omega t)} - B}{e^{A(x-\omega t)} + B} - \omega; \quad A, B, \omega - \text{п. п.}
 \end{aligned}$$

$$9.289. \quad u(x, t) = f(x - \omega t), \text{ где } f \text{ определяется неявно уравнением} \\
 \operatorname{erf}(af) = A + Be^{-\omega(x-\omega t)}; \quad A, B, \omega - \text{п. п.}$$

$$9.290. \quad u(x, t) = \beta + Ce^{\mu x - \omega t}, \text{ где } \beta, \omega, \mu, - \text{решение системы уравнений:} \\
 c\beta^2 + p\beta + q = 0, \quad \mu^2(a + b) + c = 0, \quad \omega = -\frac{\beta bc}{a + b} + \frac{q}{\beta}; \quad C - \text{п. п.}$$

$$\begin{aligned}
 9.291. \quad & u(x, y) = \frac{2}{\beta} \ln \operatorname{tg}(C + kz); \quad u(x, y) = \frac{2}{\beta} \ln \operatorname{th}(C + kz); \\
 & u(x, y) = \frac{2}{\beta} \ln \operatorname{cth}(C + kz), \quad k = \pm \sqrt{\frac{\beta a}{A^2 + B^2}}, \quad z = Ax + By; \quad A, B, C - \text{п. п.}
 \end{aligned}$$

$$9.293. \quad u(x, t) = (\beta + Ce^{\mu x - \omega t})^{\frac{2}{1-m}}, \text{ где } \beta, \omega, \mu, - \text{решение системы уравне-} \\
 \text{ний: } a\beta^2 + b\beta + c = 0, \quad m\beta^2\mu^2 + c(m-1)^2 = 0, \quad \omega = (m-1)(a - \frac{c}{m\beta^2}); \quad C - \text{п. п.}$$

$$\begin{aligned}
 9.294. \quad & u(x, t) = (\beta + Ce^{\mu x - \omega t})^{\frac{2}{1-m}}, \quad \omega = \frac{(m-1)(m+3)a}{2(m+1)}, \\
 & \mu^2 = \frac{(m-1)^2 a}{2(m+1)}, \quad \beta^2 = -\frac{b}{a}; \quad C - \text{п. п.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 9.288. \quad & u(x, t) = 2A \operatorname{tg}(A(\omega t - x) + B) - \omega; \quad u(x, t) = 2A \operatorname{th}(A(\omega t - x) + B) - \omega; \\
 & u(x, t) = \frac{2\omega}{1 + Ae^{-\omega(x+\omega t)}}; \quad u(x, t) = \frac{2}{x + \omega t + A} + \omega; \\
 & u(x, t) = A \frac{e^{A(x-\omega t)} - B}{e^{A(x-\omega t)} + B} - \omega; \quad A, B, \omega - \text{п. п.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 9.295. \quad & u(x, t) = f(z), \quad z = x - \omega t. \text{ Если } m = 2, \text{ то } f \text{ определяется уравнени-} \\
 & \text{ями: } f^2(z) = \frac{2\omega}{a}z + A, \quad Af - B^2 \ln|f + B| = \frac{\omega z}{a} + C; \text{ если } m = 3, \text{ то тогда} \\
 & f \text{ определяется уравнениями: } f^3 = \frac{3\omega z}{2a} + A, \quad f - \sqrt{B} \operatorname{arctg} \frac{f}{\sqrt{B}} = \frac{\omega z}{2a} + C, \\
 & f + \frac{\sqrt{B}}{2} \ln \left| \frac{f - \sqrt{B}}{f + \sqrt{B}} \right| = \frac{\omega z}{2aB}; \quad A, B, C, \omega - \text{п. п.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 9.296. \quad & u(x, t) = f(z), \quad z = x - \omega t, \text{ где } f(z) = \pm b(Ce^{\frac{\omega b^2 z}{a}} - 1)^{-\frac{1}{2}}, \text{ либо } f \text{ опре-} \\
 & \text{деляется неявно уравнением } \ln \frac{|f + A|}{\sqrt{f^2 + b^2}} + A \operatorname{arctg} \frac{f}{b} = B - \frac{\omega}{a}(A^2 + b^2)z; \\
 & A, B, C, \omega - \text{п. п.}
 \end{aligned}$$

$$9.297. \quad u(x, t) = -\frac{2}{\sigma} \ln \left| \sqrt{-\frac{b}{a}} + Ce^{p(\pm x - pt)} \right|, \quad p = \sqrt{\frac{a\sigma}{2}}; \quad C - \text{п. п.}$$

$$9.298. \quad u(x, t) = f(z), \quad z = x - \omega t, \text{ где } f(z) = -\frac{1}{\sigma} \ln \left(\beta + Ce^{\frac{a\sigma z}{\omega}} \right), \text{ где } \beta \text{ и } \omega - \\
 \text{решение системы: } a\beta^2 + b\beta + c = 0, \quad \omega^2 c + \sigma A^2 \beta^2 = 0; \quad C - \text{п. п.}$$

9.299. $u(x, t) = f(z)$, $z = x - \omega t$, где $f(z) = -\frac{1}{\sigma} \ln(\beta + Ce^{\pm \sqrt{-\frac{b}{a}} z})$, β и ω — решение системы: $b\beta^2 + c\beta + d = 0$, $\omega^2\beta^2 - \sigma^2 d^2 = 0$; C — п. п.

9.300. $u(x, t) = \frac{a + Ce^{\frac{a-1}{2}(\pm\sqrt{2}x-(a+1)t)}}{1 + Ce^{\frac{a-1}{2}(\pm\sqrt{2}x-(a+1)t)}}$, брать либо верхние, либо нижние знаки; C — п. п.

9.301. $u(x, t) = a(1 + Ce^{\frac{a}{2}(\pm\sqrt{2}x+(2-a)t)})^{-1}$;

$$u(x, t) = (1 + Ce^{\pm \frac{x}{\sqrt{2}} + (a - \frac{1}{2})t})^{-1}; \quad C — п. п.$$

9.302. $u(x, y, t) = \frac{1}{\sigma} \ln(\beta + Ce^{Ax+By+\omega t})$,

$$\text{где } A^2 + B^2 = \frac{b\sigma}{a}, \quad b\beta^2 + c\beta + d = 0, \quad \omega^2\beta^2 - \sigma^2 d^2 = 0; \quad A, C — п. п.$$

9.303. $u(x, t) = \frac{\omega}{2} + A \operatorname{ctg} \frac{A}{a}(x + \omega t) + B$; A, B, ω — п. п.

9.304. $u(x, t) = \beta + Ce^{\varphi}$; $^{-2}$; $u(x, t) = \frac{Ce^{\varphi}(2 + Ce^{\varphi})}{(1 + Ce^{\varphi})^2}$; $u(x, t) = \frac{Ce^{\varphi}(Ce^{\varphi} - 2)}{(1 + Ce^{\varphi})^2}$,

$\beta = \pm 1$, $\varphi = \pm \sqrt{\frac{a}{6}} - \frac{5}{6}at$; C — п. п. Последние два решения — следствие инвариантности уравнения относительно замены $U = 1 - u$ (см. задачу 9.301).

9.305. $u(x, t) = \frac{a}{b} \ln(A + Be^{\frac{\omega+c}{b}(x-\omega t)}) + rt$; A, B, ω — п. п.

9.306. $(x, t) = \beta + Ce^{\mu x - \omega t}$,

где β, μ, ω — решение системы уравнений:

$$3\beta^2 c + \left(r - \frac{2ac}{b}\right)\beta - s = 0, \quad \mu^2\beta + c = 0, \quad \omega = \frac{ac}{b} - 2bc - d; \quad C — п. п.$$

9.307. $u(x, y, t) = \beta + Ce^{\mu(x \cos \varphi + y \sin \varphi) - \omega t}$,

где β, μ, ω — решение системы уравнений: $k\beta^2 + m\beta + n = 0$, $\sigma\mu^2 + k = 0$,

$$\omega = \frac{ak}{\sigma} + \frac{n}{\beta}; \quad C, \varphi — п. п$$

9.308. $u(x, y, t) = \frac{\omega}{a}(x \cos \varphi + y \sin \varphi - \omega t + C)$; $u(x, y, t) = A + Ce^{\psi}$,

$$\psi = B(x \cos \varphi + y \sin \varphi + aABt); \quad A, B, C, \psi — п. п.$$

9.309. Решение определяется неявно: $u - C \ln |u + C| = \frac{Ax + By + t}{A^2 + B^2} + D$;

A, B, C, D — п. п.

9.310. $u(x, y, t) = \frac{a(A^2 + B^2)}{Ax + By - t + C}$; $u(x, y, t) = \frac{C}{De^{\varphi} + 1}$,

$$\varphi = C(Ax + By + \omega t), \quad A^2 + B^2 = \frac{\omega}{a}; \quad A, B, C — п. п.$$

9.311. $u(x, y, t) = Ax + By + Cz - [a(A^2 + B^2 + C^2) + \beta]t + D$;

A, B, C, D, β — п. п.

9.312. $u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{2(A^2 + B^2)}{a\sigma(Ax + By + C)^2}$;

$$u(x, y, z) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{2(A^2 + B^2)}{a\sigma \cos^2(Ax + By + C)};$$

$$u(x, y, z) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{2(A^2 + B^2)}{a\sigma \operatorname{sh}^2(Ax + By + C)}, \quad A, B, C — п. п.$$

$$9.313. \quad u(x, y, z) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{2(aA^2 + bB^2 + cC^2)}{k\sigma(Ax + By + Cz + D)^2};$$

$$u(x, y, z) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{2(aA^2 + bB^2 + cC^2)}{k\sigma \cos^2(Ax + By + Cz + D)};$$

$$u(x, y, z) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{2(aA^2 + bB^2 + cC^2)}{k\sigma \operatorname{sh}^2(Ax + By + Cz + D)}, \quad A, B, C - \text{п. п.}$$

$$9.314. \quad u(x, y, z) = \left[\frac{k(m-1)^2}{2(m+1)} \frac{(Ax + By + Cz + D)^2}{aA^2 + bB^2 + cC^2} \right]; \quad A, B, C, D - \text{п. п.}$$

$$9.315. \quad u(x, t) = \left(\frac{-1}{\sqrt{-a(n+2)}} \frac{x^2}{t} \right)^{\frac{2}{n}}; \quad u(x, t) = t^{-\frac{1}{n}} \left(\frac{\pm nx}{\sqrt{-2an(n+2)}} + A \right)^{\frac{2}{n}},$$

A — п. п. У к а з а н и е. Первое решение представляет собой степенную функцию переменной z . Второе решение соответствует такому значению m , при котором второе и третье слагаемые в уравнении (9.134) образуют полную производную.

$$9.316. \quad u(x, t) = \sqrt{t} U(x), \quad \text{где } U(x) \text{ задана неявно, } \operatorname{erf}(\sqrt{\ln|U|}) = \pm \sqrt{\frac{a}{\pi}} x + C;$$

$$u(x, t) = \frac{\pm 2\sqrt{a}}{\sqrt{C\sqrt{t} - x^2}}, \quad C - \text{п. п.}$$

$$9.317. \quad u(x, t) = Ax^{\frac{2-n}{m}} t^{-\frac{1}{m}}, \quad A = \left[\frac{m}{a(2-n)(nm+n-m-1)} \right]^{\frac{1}{m}};$$

$$u(x, t) = t^{(1-m)\beta} \left[\frac{m\beta}{a(2-n)} (xt^\beta)^{2-n} + C \right]^{\frac{1}{m}}, \quad \beta = \frac{m\alpha + 1}{n-2}, \quad C, \alpha - \text{п. п.}$$

См. у к а з а н и е к задаче 9.315.

$$9.318. \quad u(x, t) = \left(\frac{-m}{2a(mn+2)} \right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{x^2}{t} \right)^{\frac{1}{m}}.$$

$$9.319. \quad u(x, t) = t^m \left[C - \frac{2an}{n+2} \left(-\frac{xt^\beta}{2a} \right)^{\frac{n+2}{n+1}} \right]^{\frac{n+1}{n}}, \quad \beta = -\frac{mn+1}{n+2};$$

$$u(x, t) = Ax^{\frac{n+2}{2}} t^{-\frac{1}{m}}, \quad A = \left[-\frac{1}{2a} \left(\frac{n}{n+1} t \right)^{n+1} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad C - \text{п. п.}$$

$$9.320. \quad u(x, t) = \frac{1}{\sqrt[n]{a}} \left(\frac{x}{t} \right)^{\frac{2}{n}}; \quad u(x, t) = (C \pm \frac{x}{\sqrt[n]{at}})^{\frac{2}{n}}, \quad C - \text{п. п.}$$

$$9.321. \quad u(x, t) = Ax^{\frac{2-n}{n}} t^{\frac{(n-m)\alpha-2}{n}},$$

$$A = \left[\frac{(\alpha(m-n)+2)(\alpha(m-n)+n+2)}{2a(n-1)(n-2)} \right]^{\frac{1}{mn}}, \quad \alpha - \text{п. п.}$$

$$9.322. \quad u(x, t) = U(z), \quad z = xt, \quad \text{функция } U \text{ определяется неявно:}$$

$$A \pm z = \int [B + 2 \int f(U) dU]^{-\frac{1}{2}} dU, \quad B - \text{п. п.}$$

У к а з а н и е. Автономные переменные $u(x, t) = t^m U(z)$, $z = xt$, где m — любое; приведенное решение соответствует $m = 0$.

9.323. $u(x, t) = \left(\frac{A \pm x}{at}\right)^{\frac{2}{n}}$; $u(x, t) = \left(\frac{x}{at}\right)^{\frac{2}{n}}$; $u(x, t) = U(z)$, $z = \frac{x+A}{t+B}$, где функция U определена неявно:

$$z = -C^2 U^{\gamma-1} \frac{I_{\frac{1}{2\gamma}-1}\left(\frac{aC}{\gamma} U^\gamma\right) + BK_{\frac{1}{2\gamma}-1}\left(\frac{aC}{\gamma} U^\gamma\right)}{I_{\frac{1}{2\gamma}}\left(\frac{aC}{\gamma} U^\gamma\right) + BK_{\frac{1}{2\gamma}}\left(\frac{aC}{\gamma} U^\gamma\right)}, \quad \gamma = \frac{n+2}{2},$$

C, B — п. п. Указания к первым двум решениям даны в задаче 9.315. Третье решение получается, если в автомодельных переменных $u(x, t) = t^m U(z)$, $z = xt^{-k}$, $k = \frac{vn+2}{2}$ принять $m = 0$; тогда $u(x, t) = U\left(\frac{x}{t}\right)$, или $u(x, t) = U\left(\frac{x+A}{t+B}\right)$, что не может повлиять на замену переменных. Уравнение для U (оно не приводится) можно один раз проинтегрировать, в результате получится уравнение первого порядка

$$(z^2 - a^2 U^m) U' = C.$$

Если принять U за независимую переменную, то функция $z(U)$ будет решением уравнения $Cz' = z^2 - a^2 U^m$. Это уравнение заменой $z = -C \frac{V'}{V}$ преобразуется в линейное уравнение второго порядка $V'' - a^2 C^2 V = 0$, которое сводится к уравнению Бесселя (см. задачу 2.562, т. 1).

9.324. $u(x, y) = x^{-\frac{r+1}{n+1}} \left(C \pm \frac{1-n}{2} \sqrt{\frac{2a}{r+1}} x^{\frac{r+1}{n+1}} y \right)^{\frac{2}{1-n}}$, C — п. п.

9.325. $\left[\frac{a(1-n)^2}{4} ((x+C_1)^2 + (y+C_2)^2) \right]^{\frac{1}{1-n}}$, C_1, C_2 — п. п.

9.326. $u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \left[\ln \left(\frac{-8C}{a\sigma} \right) - 2 \ln \left(C + (x+C_1)^2 + (y+C_2)^2 \right) \right]$.

9.327. $u(x, y, t) = \frac{\lambda(x^2 + y^2)}{4(a+b)(C - \lambda t)}$, λ, C — п. п. У к а з а н и е. После замены $\xi^2 = x^2 + y^2$ решать уравнение методом разделения переменных: $u = \varphi(t)f(\xi)$.

9.328. $u(x, y, t) = e^{4Aat} \int f(t) e^{-4Aat} dt + B e^{4Aat} + A(x^2 + y^2)$, A, B — п. п. Частный случай. $u(x, y, t) = \frac{b e^{-kt}}{k+4aA} + B e^{4Aat} + A(x^2 + y^2) + C$, A, B, C — п. п.

У к а з а н и е. После замены $\xi^2 = x^2 + y^2$ решать уравнение методом разделения переменных: $u = \varphi(t) + \psi(t)\xi^2$.

9.329. $u(x, y, z, t) = e^{h(x, y, z, t)}$,

$$\xi^2 = \frac{4}{a(n-2)^2} x^{2-n} + \frac{4}{b(m-2)^2} y^{2-m} + \frac{4}{c(p-2)^2} z^{2-p} :$$

$$1) h = \varphi(t) + f(\xi), \quad \varphi(t) = C e^{kt}, \quad f(\xi) = -\frac{k\xi^2}{4} + B\xi + \frac{1}{2} - \frac{B^2}{k};$$

$$2) h = \varphi(t)\xi + \psi(t), \quad \varphi(t) = C e^{kt}, \quad \psi(t) = \frac{C^2}{k} e^{2kt} + C_1 e^{kt};$$

$$3) h = \varphi(t)\xi^2 + \psi(t)\xi + \chi(t), \quad \varphi(t) = \frac{k}{C e^{-kt} - 4}, \quad \psi = \frac{C_1}{C e^{-kt} - 4},$$

$$\chi(t) = \frac{C_1^2 e^{kt}}{kC(C e^{-kt} - 4)} - \frac{2}{C} e^{kt} \ln |C e^{-kt} - 4| + C_1 e^{kt}, \quad B, C, C_1 \text{ — п. п.}$$

У к а з а н и е. В преобразованном уравнении

$$u_t = u_{\xi\xi} + \frac{A}{\xi}u_{\xi} + ku \ln u$$

коэффициент $A = 2\left(\frac{1}{2-n} + \frac{1}{2-m} + \frac{1}{2-p}\right)$. Приведенные решения соответствуют $A = 0$.

$$9.330. \quad u(x, y, z, t) = \frac{C_1 + C_2\xi^2 - \lambda\xi^2 \ln \xi}{C + 2\lambda t}, \quad \xi = \left[4\left(\frac{e^{-\alpha x}}{a\alpha^2} + \frac{e^{-\beta y}}{b\beta^2} + \frac{e^{-\gamma z}}{c\gamma^2}\right)\right]^{\frac{1}{2}},$$

λ, C_1, C_2 — п.п.

$$9.331. \quad u(x, y) = \left[\frac{4(2-m)}{c(m-1)^2}\right]^{\frac{1}{m-1}} \xi^{\frac{2}{1-m}}, \quad \xi = \left(\frac{4e^{-\alpha x}}{a\alpha^2} + \frac{4e^{-\beta y}}{b\beta^2}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

$$9.332. \quad u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \ln\left(-\frac{4}{c\sigma\xi^2}\right), \quad \xi = \left(\frac{4e^{-\alpha x}}{a\alpha^2} + \frac{4e^{-\beta y}}{b\beta^2}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

$$9.333. \quad u(x, y, z) = \left[\frac{4(2n-m+2)}{d(n-m+1)^2}\right]^{\frac{1}{m-n-1}} \left(\frac{x^2}{a} + \frac{y^2}{b} + \frac{z^2}{c}\right)^{\frac{1}{n-m+1}}.$$

$$9.334. \quad u(x, y) = B\xi^k, \quad k = \frac{2}{1-p}, \quad B = \left[\frac{2(1+p)}{c(1-p)^2} + \frac{A}{c}\right]^{\frac{1-p}{1+p}},$$

$$\xi = \left[\frac{4}{a(n-2)^2}x^{2-n} + \frac{4}{b(m-2)^2}y^{2-m}\right]^{\frac{1}{2}}.$$

$$9.335. \quad u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \left[\ln \frac{4(mn-n-m)}{\sigma c(2-n)(2-m)} - 2\ln \xi\right],$$

$$\xi = \left[\frac{4x^{2-n}}{a(n-2)^2} + \frac{4y^{2-m}}{b(m-2)^2}\right]^{\frac{1}{2}}.$$

$$9.336. \quad u(x, y) = B\xi^{\frac{2}{1-p}}, \quad B = \left[\frac{2}{c(1-p)}\left(A + \frac{1+p}{1-p}\right)\right]^{\frac{1}{1-p}},$$

$$A = \frac{4+3mn-4m-4n}{(2-n)(2-m)}, \quad \xi = \left[\frac{4x^{2-n}}{a(n-2)^2} + \frac{4y^{2-m}}{b(m-2)^2}\right]^{\frac{1}{2}}.$$

$$9.337. \quad u(x, y) = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{4(m+n-nm)}{\sigma c(n-2)(m-2)} - \frac{2}{\sigma} \ln \xi,$$

$$\xi = \left[\frac{4}{a(n-2)^2}x^{2-n} + \frac{4}{b(m-2)^2}y^{2-m}\right]^{\frac{1}{2}}.$$

$$9.338. \quad u(x, y) = \left[\frac{4m}{c(m-1)^2}\right]^{\frac{1}{m-1}} \xi^{\frac{2}{1-m}}, \quad \xi = \left(\frac{4}{a\sigma^2}e^{-\sigma x} + \frac{4}{b\mu^2}e^{-\mu y}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

$$9.339. \quad u(x, y, t) = \left[\frac{m(\xi+C)^2}{2(m+2)(B-t)}\right]^{\frac{1}{m}}, \quad \xi = \left(\frac{4}{a\sigma^2}e^{-\sigma x} + \frac{1}{b}y^2\right)^{\frac{1}{2}}, \quad B, C — п.п.$$

$$9.340. \quad u(x, y, t) = \left[\frac{\pm \frac{k}{2}\sqrt{\frac{2\lambda}{2-k}}\xi + C}{B - k\lambda t}\right]^{\frac{1}{k}}, \quad \xi = \left(\frac{x^2}{a} + \frac{4e^{-\sigma y}}{b\sigma^2}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad B, C, \lambda — п.п.$$

$$9.341. \quad u(x, y, z, t) = \frac{\psi(\xi)}{C + \lambda t},$$

$$\psi(\xi) = \begin{cases} [C_1 J_\nu(\sqrt{k}\xi) + C_2 Y_\nu(\sqrt{k}\xi)] \xi^\nu - \frac{\lambda}{k}, & k > 0, \\ [C_3 I_\nu(\sqrt{-k}\xi) + C_4 K_\nu(\sqrt{-k}\xi)] \xi^\nu - \frac{\lambda}{k}, & k < 0, \\ C_5 + C_6 \xi^{2\nu} - \frac{\lambda \xi^2}{2(1+A)}, & k = 0, \end{cases}$$

$$\xi = \left[\frac{4x^{2-n}}{a(n-2)^2} + \frac{4y^{2-m}}{b(m-2)^2} + \frac{4e^{-\sigma z}}{c\sigma^2} \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$\nu = \frac{1-A}{2}, \quad A = \frac{4-nm}{(2-n)(2-m)}, \quad C, C_1, \dots, C_6, \lambda - \text{п. п.}$$

$$9.342. \quad u(x, y, t) = \frac{\psi(\xi)}{(C + \sqrt{\frac{\lambda}{6}} t)^2},$$

$$\psi(\xi) = \begin{cases} [C_1 J_1(\sqrt{c}\xi) + C_2 Y_1(\sqrt{c}\xi)] \xi + \frac{\lambda}{c}, & c > 0, \\ [C_3 I_1(\sqrt{-c}\xi) + C_4 K_1(\sqrt{-c}\xi)] \xi + \frac{\lambda}{c}, & c < 0, \\ C_5 + C_6 \xi^2 + \frac{\lambda}{2} \xi^2 \ln \xi, & k = 0, \end{cases}$$

$$\xi = \left(\frac{4e^{-\alpha x}}{a\alpha^2} + \frac{4e^{-\beta y}}{b\beta^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad C, C_1, \dots, C_6, \lambda - \text{п. п.}$$

9.343. Общее решение (в неявном виде) $x = ut + C(u)$, $C(u) \in C^1$ — произвольная функция; $u(x, t) = \frac{kx}{1+kt}$.

9.344. $u(x, t) = u_0 \operatorname{arctg} \xi$, $x = u_0^2 \operatorname{arctg}^2 \xi t + \xi$. Решение. Дифференцирование функции $x = x(u, t)$, где u зависит от x и t , по переменным x и t ,

$$1 = x_u u_x, \quad 0 = x_u u_t + x_t$$

приводит к формулам замены переменных

$$u_x = \frac{1}{x_u}, \quad u_t = -\frac{x_t}{x_u}.$$

Исходная задача преобразуется в линейную

$$x_t - u^2 = 0, \quad -\frac{\pi}{2} < u < \frac{\pi}{2}, \quad 0 < t,$$

$$x(u, 0) = \operatorname{tg} \frac{u}{u_0},$$

общее решение которой $x = ut + C(u)$. Если $t = 0$, то $\operatorname{tg} \frac{u}{u_0} = C(u)$, следовательно, решение (в неявном виде)

$$x = u^2 t + \operatorname{tg} \frac{u}{u_0}.$$

Его можно представить в параметрической форме (она дана в ответе), полагая $\operatorname{tg} \frac{u}{u_0} = \xi$.

9.345. $u(x, t) = u_0(\xi)$, $x = u_0(\xi)t + \xi$.

9.346. $x = f(u)t + C(u)$, $C(u)$ — произвольная дифференцируемая функция.

$$9.347. u(x, t) = u_0(\xi), \quad x = f(u_0(\xi))t + \xi.$$

$$9.348. u(x, y) = \frac{1 + x^2}{y^2}.$$

$$9.349. u(x, y) = \frac{x^2 + y^2 + \sqrt{(x^2 - y^2)^2 + 4x^2}}{2x^2}.$$

$$9.350. u(x, y) = \operatorname{sh} 2x + \sqrt{(\operatorname{sh}^2 2x + \sin y}.$$

$$9.351. u(x, y) = \frac{2(x+1)}{1+e^y}.$$

$$9.352. u(x, y) = \frac{2e^x}{1+e^{2y}}.$$

$$9.353. u(x, y) = \frac{\sqrt{9x^2 + 9y^2 + 2xy} - x - y}{x^2 + y^2}.$$

$$9.354. u(x, y) = \ln(1 + 4x + \ln y).$$

$$9.355. u(x, y) = \sqrt{2(x-y)}.$$

$$9.356. u(x, y) = \sqrt{\sqrt{24x^2 + y} - 6x}.$$

$$9.357. \text{Решение в неявном виде: } x = f_1(u) + f_2(t), \quad f_{1,2} \in C^1.$$

$$9.358. x_t = f(u, t)x_{uu}.$$

9.359. В результате преобразования годографа получается линейное уравнение теплопроводности $x_t = ax_{uu}$. Сравнительно простые решения уравнения $v_t = av_{xx}$:

$$1) v = A(x^2 + 2at) + Bx + C;$$

$$2) v = A(x^3 + 6axt) + B(x^2 + 2at) + Cx + D;$$

$$3) v = \frac{e^{-\frac{x^2}{4at}}}{2\sqrt{a\pi t}} - \text{автомодельное решение};$$

$$4) v = A + B \operatorname{erf} \frac{x+C}{2\sqrt{at+D}} - \text{автомодельное решение};$$

$$5) v = A \sin(\lambda x + k) e^{-a\lambda^2 t};$$

$$6) v = A \operatorname{sh}(\lambda x + k) e^{a\lambda^2 t};$$

$$7) v = B e^{kx + ak^2 t} + Cx + A - \text{решение типа бегущей волны; } A, B, C, D, k, \lambda - \text{п.п.}$$

Каждое из приведенных решений после замены $v \rightarrow x$, $x \rightarrow u$ представляет собой решение $x = x(u, t)$ (в неявном виде) нелинейного уравнения. Некоторые из них можно представить в явном виде:

$$1) u(x, t) = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - 8aA^2 t - 4AC + 4Ax}}{A};$$

$$5) u(x, t) = \frac{(-1)^n}{\lambda} \arcsin \left[\frac{A}{(x+C)e^{a\lambda^2 t}} \right] + \frac{\pi n}{\lambda} + \delta, \quad n \in Z, \delta - \text{п.п.};$$

$$6) u(x, t) = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{x+C}{A} e^{-a\lambda^2 t} \pm \sqrt{\left(\frac{x+C}{A} \right)^2 e^{-2a\lambda^2 t} + 1} \right) + \delta, \quad \delta - \text{п.п.};$$

$$7) u(x, t) = \pm \sqrt{4at \ln \frac{1}{2x\sqrt{a\pi t}}}.$$

$$9.360. u(x, y) = \frac{2x + \sqrt{x^2 - 3y}}{3}, \quad v(x, y) = \frac{2(x + 2\sqrt{x^2 - 3y})}{3}.$$

$$9.361. \quad x = u + \frac{1}{2} \ln \left| \frac{(u-1)(\sqrt{v}+1)}{(u+1)(\sqrt{v}-1)} \right|, \\ y = \frac{u^3 - v\sqrt{v}}{3} + u - \sqrt{v} + \frac{1}{2} \ln \left| \frac{(u-1)(\sqrt{v}+1)}{(u+1)(\sqrt{v}-1)} \right|.$$

$$9.362. \quad x = \frac{1}{\sqrt{uv}} f_1\left(\frac{v}{u}\right) - \int \frac{du}{u} f_2'(uv) + C, \quad y = \sqrt{uv} f_1\left(\frac{u}{v}\right) + f_2(uv).$$

Решение (фрагменты). Преобразование годографа по формулам (9.135) линеаризует систему:

$$\begin{cases} u^2 x_u + y_v = 0, \\ v^2 x_v + y_u = 0. \end{cases}$$

Для функции $y = y(u, v)$ получается уравнение $u^2 y_{uu} - v^2 x_{vv} = 0$, которое заменой $\xi = uv$, $\eta = \frac{v}{u}$ приводится к каноническому виду

$$y_{\xi\eta} - \frac{y_{\eta}}{2\xi} = 0.$$

Общее решение, приведенное в ответе, получается последовательным интегрированием по ξ и η . Построение второго решения $x = x(u, v)$ сводится к интегрированию уравнений линеаризованной системы, одно решение которой известно.

$$9.363. \quad u(x, y) = \frac{2}{2(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + 4y}}, \\ v(x, y) = \frac{3}{2}y - \frac{1}{8} \left(1 - x + \sqrt{(x-1)^2 + 4y}\right)^2.$$

9.364. Эквивалентная система

$$\begin{cases} u_t - v_x = 0, \\ f(u)u_x - v_t = 0, \end{cases} \implies \begin{cases} x_v - t_u = 0, \\ x_u - f(u)t_v = 0, \end{cases}$$

где $x_u t_v - x_v t_u \neq 0$.

$$9.365. \quad x = \frac{1}{5}C_1 u^5 + \frac{3}{2}C_1 u^2 v^2 + \frac{1}{3}C_3 u^3 + 3C_2 u^2 v + \frac{1}{2}C_5 u^2 + \frac{1}{2}C_3 v^2 + C_4 v + C_7, \\ t = C_1 u^3 v + C_2 u^3 + C_1 v^3 + 3C_2 v^2 + C_3 uv + C_4 u + C_5 v + C_6.$$

$$9.366. \quad x = \frac{1}{4}C_2 u^4 + 4C_1 u^3 v + \frac{1}{3}C_4 u^3 + \frac{1}{2}C_2 v^2 + C_3 v + C_6, \\ t = C_1 u^4 + 6C_1 v^2 + C_2 uv + C_3 u + C_4 v + C_5.$$

9.367. Эквивалентная система

$$\begin{cases} u_x + v_y = 0, \\ f(u)u_y - v_x = 0, \end{cases} \implies \begin{cases} x_u - y_v = 0, \\ f(u)x_v + y_u = 0, \end{cases}$$

где $x_u y_v - x_v y_u \neq 0$.

$$9.368. \quad x = C_1 u^3 + C_2 uv - 3C_1 v^2 + C_4 u + C_5 v + C_6, \\ y = -\frac{1}{3}C_2 u^3 + 3C_1 u^2 v - \frac{1}{2}C_5 u^2 + \frac{1}{2}C_2 v^2 + C_4 v + C_6.$$

$$9.369. \quad x = C_1 u^4 + C_2 uv - 6C_1 v^2 + C_3 u + C_4 v + C_5, \\ y = -\frac{1}{4}C_2 u^4 + 4C_1 u^3 v - \frac{1}{3}C_4 u^3 + \frac{1}{2}C_2 v^2 + C_3 v + C_6.$$

9.370. Эквивалентная система

$$\begin{cases} f_1(u)u_x - v_y = 0, \\ f_2(u)u_y + v_x = 0, \end{cases} \implies \begin{cases} x_u - f_1(u)y_v = 0, \\ f_2(u)x_v + y_u = 0, \end{cases}$$

где $x_u y_v - x_v y_u \neq 0$.

$$9.371. \quad x = \frac{1}{5}C_2u^5 - 5C_1u^3v + \frac{1}{3}C_4u^3 - C_2v^2 - 2C_3v + C_6,$$

$$y = C_1u^5 + C_2u^2v + C_3u^2 - \frac{15}{2}C_1v^2 + C_4v + C_5.$$

$$9.372. \quad 1) u(x, t) = \frac{4x + 2A}{x^2 + 2t + Ax + B};$$

$$2) u(x, t) = \frac{2(3x^2 + 2Ax)}{x^3 + A(x^2 + 2t + 2) + 6xt + Bx + C};$$

$$3) u(x, t) = \frac{2\lambda A \cos(\lambda x + \delta)}{Ce^{\lambda^2 t} + \sin(\lambda x + \delta)}; \quad 4) u(x, t) = \frac{2\lambda A \operatorname{ch}(\lambda x + \delta)}{Ce^{-\lambda^2 t} + \operatorname{sh}(\lambda x + \delta)};$$

$$5) u(x, t) = \frac{2e^{-\frac{(x+B)^2}{4(t+C)}}}{\sqrt{\pi(t+C)} \left(A + \operatorname{erf} \frac{x+B}{2\sqrt{t+C}} \right)};$$

$$6) u(x, t) = \frac{2(B + ke^{kx+k^2t})}{A + Bx + e^{kx+k^2t}}; \quad 7) u(x, t) = \frac{x}{t}.$$

9.373. $u = \frac{b}{a} \ln |v|$, где $v(x, t)$ — одна из функций, приведенных в ответе к задаче 9.355.

9.374. $u = \frac{b}{a} \ln |v| - \frac{cx}{2b} + \left(ad - \frac{c^2}{4b} \right) t$, где $v(x, t)$ — одна из функций, приведенных в ответе к задаче 9.355.

Глава 10

ОБОБЩЕННЫЕ ФУНКЦИИ

Необходимость обобщения классического понятия функции была вызвана потребностями физики: многие физические величины, например, плотность сосредоточенной массы, точечного заряда и т.п. нельзя описать посредством обычных функций (т.е. функций точки евклидова пространства). Источником развития этого направления математики явилась δ -функция, введенная в 20-х годах прошлого столетия П. Дираком в его исследованиях по квантовой механике. В середине 30-х годов советский математик академик С. Л. Соболев впервые дал строгое математическое обоснование теории обобщенных функций как линейных непрерывных функционалов, определенных на пространстве достаточно гладких функций, и ввел понятие обобщенной производной. Эти идеи получили в дальнейшем широкое распространение. В начале 50-х годов появилась монография Л. Шварца, посвященная систематическому построению теории обобщенных функций. В настоящее время обобщенные функции имеют многочисленные приложения в различных областях знаний и особенно в теоретической и математической физике. Обзор по этому вопросу содержится в работе В. С. Владимирова [14].

Наряду с использованием обобщенных функций в теоретических исследованиях они применяются при решении многих задач математической физики. Объектом их приложения служат задачи с сосредоточенными факторами (сосредоточенная сила, действующая на механическую систему, точечный источник диффундирующих частиц, точечный диполь и т. п.). Это обусловлено тем, что лишь в рамках теории обобщенных функций можно математически строго описать плотность сосредоточенных физических величин. Однако применение обобщенных функций этим не ограничивается, так как они используются при решении задач, в постановке которых непосредственно не участвуют. Например, задача для дифференциального уравнения с неоднородными граничными условиями преобразуется (стандартным приемом) в эк-

бивалентную задачу с однородными граничными условиями. При этом в уравнении появляются неоднородные члены, содержащие сингулярные обобщенные функции (δ -функцию и ее производные); построение решений таких задач сводится к достаточно простой формальной процедуре с помощью метода Фурье. Если начальные условия смешанной (нестационарной) задачи определяются ее стационарным решением, то применение обобщенных функций для построения нестационарного решения избавляет от необходимости находить начальные условия в явном виде.

Существует класс задач (струна с сосредоточенной массой, стержень с сосредоточенной теплоемкостью и др.), решение которых методом Фурье приводит к задаче на собственные значения со спектральным параметром в граничных условиях. Оказывается, что соответствующие собственные функции ортогональны с некоторым весом. Сам этот факт и вид весового множителя можно установить, переходя к эквивалентной задаче с помощью обобщенных функций. Разложение заданной функции в ряд по собственным функциям эрмитова оператора (ряд Фурье) сводится к вычислению коэффициентов ряда, имеющих форму интегралов. Привлечение обобщенных функций во многих случаях существенно упрощает вычисление соответствующих интегралов, содержащих цилиндрические функции, ортогональные многочлены и т. п. Здесь важную роль играет свойство эрмитовости операторов. Аппарат обобщенных функций применяется для определения и построения функции Грина смешанных и краевых задач. При этом функция Грина получает физическую трактовку, что помогает находить решения (в форме интегралов, рядов или конечных сумм) различных линейных задач. В связи с потребностями математической физики построены различные классы (точнее, пространства) обобщенных функций, использование которых расширяет сферу действия интегральных преобразований.

Теоретические сведения, необходимые для решения задач по обобщенным функциям, имеются в учебнике [15].

10.1. Интеграл Лебега

Пример 10.1. Мера точечных множеств. Понятие длины промежутка, площади плоской фигуры и т. п. обобщается на более широкий класс множеств. Определения и доказательства свойств вводимых математических объектов в этом и следующих двух примерах взяты из книг [33, 43, 61].

Определение 1.1. Мерой интервала $\Delta = (a; b)$ называется его длина

$$\mu(\Delta) = b - a.$$

Определение 1.2. Мера пустого множества равна нулю:

$$\mu(\emptyset) = 0.$$

Определение 1.3. Интервал $\Delta = (a; b)$ называется составляющим интервалом открытого множества A , если

$$\Delta \subset A, \quad a \notin A, \quad b \in A.$$

Свойство 1.1. Непустое ограниченное открытое множество A является объединением конечного числа или счетного множества взаимно не пересекающихся составляющих его интервалов:

$$A = \bigcup_k \Delta_k, \quad \Delta_m \cap \Delta_n = \emptyset, \quad m \neq n, \quad \Delta_k = (a_k; b_k), \quad a_k \notin A, \quad b_k \in A.$$

Доказательство в [61].

Определение 1.4. Мера открытого ограниченного множества A равна сумме длин всех его составляющих, взаимно не пересекающихся интервалов Δ_k :

$$A = \bigcup_k \Delta_k \implies \mu(A) = \sum_k \mu(\Delta_k).$$

Введенная таким образом мера открытого ограниченного множества неотрицательна и аддитивна. Распространение понятия меры на другие множества состоит в следующем: каждому множеству A некоторого класса ставится в соответствие число $\mu(A)$ — его мера, обладающая свойствами неотрицательности и аддитивности.

Свойство 1.2. Если открытое множество A принадлежит интервалу $\Delta = (a; b)$, то

$$\mu(A) \leq \mu(\Delta) = b - a.$$

Действительно, сумма длин составляющих интервалов множества A не может превосходить длину Δ .

Свойство 1.3. Если A_1 и A_2 — открытые ограниченные множества и $A_1 \subset A_2$, то

$$\mu(A_1) \leq \mu(A_2).$$

См. задачу 10.9.

Свойство 1.4. Мера ограниченного открытого множества A есть точная нижняя граница мер открытых ограниченных множеств, содержащих A . Это свойство следует из свойства 1.3.

Свойство 1.5 (аддитивность меры). Если открытое ограниченное множество A есть конечное число или счетное множество взаимно не пересекающихся открытых множеств

$$A = \bigcup_k A_k, \quad A_m \cap A_n = \emptyset, \quad m \neq n,$$

то

$$\mu(A) = \sum_k \mu(A_k).$$

Доказательство. Пусть $\Delta_{k1}, \Delta_{k2}, \Delta_{k3}, \dots$ — составляющие интервалы множества A_k ; тогда каждый из них является составляющим интервалом множества A . Это потому так, что интервал $\Delta_{ki} = (a; b) \subset \Delta_k \subset A$, а его концы множеству A не принадлежат. Действительно, если $b \in A$, то найдется интервал $\Delta_{ij} \ni b$, следовательно, Δ_{ki} и Δ_{ij} пересекаются, что противоречит условию. То же верно относительно a . С другой стороны, любая точка A попадает в какой-нибудь интервал Δ_{ij} . Стало быть, все интервалы Δ_{ij} и только они являются составляющими интервалами множества A . Тогда (по определению 1.4)

$$\mu(A) = \sum_{kj} \mu(\Delta_{kj}) = \sum_k \sum_j \mu(\Delta_{kj}) = \sum_k \mu(\Delta_k).$$

Множество B замкнуто и ограничено, $S = [a; b]$ — наименьший отрезок, содержащий B , множество $C_S B$ — дополнение множества B до множества S , т. е. содержит точки S , не принадлежащие множеству B .

Определение 1.5. Мерой ограниченного замкнутого множества B называется число

$$\mu(B) = b - a - \mu(C_S B).$$

Если $B = [a; b]$, то $\mu(C_S B) = 0$, так что $\mu(B) = b - a$, т. е. мера отрезка равна его длине.

Свойство 1.6. Мера замкнутого ограниченного множества B не отрицательна.

Действительно, $C_S B \subset (a; b)$ и по свойству 1.3 мера $\mu(C_S B) \leq \mu(B) = b - a$, откуда следует неотрицательность меры.

Свойство 1.7. Если ограниченное замкнутое множество B содержится в интервале $\Delta = (a_1; b_1)$, то

$$\mu(B) = \mu(\Delta) - \mu(C_\Delta B).$$

См. задачу 10.11.

Свойство 1.8. Пусть B_1 и B_2 — ограниченные замкнутые множества; если $B_1 \subset B_2$, то $\mu(B_1) \leq \mu(B_2)$ (задача 10.12).

Свойство 1.9. Мера ограниченного замкнутого множества B есть точная верхняя граница мер замкнутых множеств B , содержащихся в B .

Свойство 1.10. Если замкнутое множество B принадлежит открытому ограниченному множеству A , то $\mu(B) \leq \mu(A)$ (задача 10.13).

Свойство 1.11. Мера открытого ограниченного множества A есть точная верхняя граница мер замкнутых множеств B , содержащихся в A .

Доказательство. Множество мер замкнутых множеств $B \subset A$ ограничено сверху (свойство 1.10), следовательно, точная верхняя граница мер $\mu(B)$ существует. Нужно показать, что

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists B \subset A : \mu(B) > \mu(A) - \varepsilon.$$

Пусть $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots$ — взаимно не пересекающиеся составляющие интервалы множества A ; тогда (определение 1.4) $\mu(A) = \sum_k \mu(\Delta_k)$. Если число членов ряда не ограничено, то в силу его сходимости для любого $\varepsilon > 0$ существует такое N , что

$$\sum_{k=1}^N \mu(\Delta_k) > \mu(A) - \frac{\varepsilon}{2}.$$

Если число членов конечно, то оно и есть N . В каждом составляющем интервале можно выбрать отрезок $\delta_k = [\alpha_k; \beta_k]$, мера которого

$$\mu(\delta_k) \geq \mu(\Delta_k) - \frac{\varepsilon}{2N}.$$

Итогом является оценка меры замкнутого множества $B = \bigcup_{k=1}^N \delta_k$:

$$\mu(B) = \sum_{k=1}^N (\beta_k - \alpha_k) \geq \sum_{k=1}^N \mu(\Delta_k) - \frac{\varepsilon}{2} > \mu(A) - \varepsilon.$$

Свойство 1.12. Мера замкнутого ограниченного множества B есть точная нижняя граница мер открытых множеств A , содержащих B (задача 10.14).

Свойство 1.13. Если открытое ограниченное множество A является объединением конечного числа или счетного множества открытых множеств A_k , то

$$\mu(A) \leq \sum_k \mu(A_k).$$

Доказательство. Для любого $\varepsilon > 0$ существует замкнутое множество $B \subset A$, мера которого (свойство 1.11)

$$\mu(B) \geq \mu(A) - \frac{\varepsilon}{2}.$$

Для каждого A_k можно найти открытое множество $\tilde{A}_k \supset A_k$, мера которого (свойство 1.4)

$$\mu(\tilde{A}) \leq \mu(A_k) + \frac{\varepsilon}{2^{k+1}}.$$

Поскольку $A_k \subset \tilde{A}_k$, то $B \subset \bigcup_k \tilde{A}_k$. Из системы множеств, покрывающих B , можно выбрать конечное покрытие $A_{k_1}, A_{k_2}, A_{k_3}, \dots, A_{k_s}$ (лемма Гейне–Бореля). По свойству 1.10

$$\mu(B) \leq \sum_{i=1}^s \mu(A_{k_i}).$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} \mu(A) &\leq \mu(B) + \frac{\varepsilon}{2} \leq \sum_{i=1}^s \mu(\tilde{A}_{k_i}) + \frac{\varepsilon}{2} \leq \sum_k \mu(A_k) + \sum_k \frac{\varepsilon}{2^{k+1}} + \frac{\varepsilon}{2} = \\ &= \sum_k \mu(A_k) + \varepsilon. \end{aligned}$$

Так как ε — любое число, то доказательство завершено.

Свойство 1.14. Если ограниченное замкнутое множество B является объединением конечного числа взаимно не пересекающихся замкнутых множеств B_k , то (задача 10.15)

$$\mu(B) = \sum_k \mu(B_k).$$

Определение 1.6. Внешней мерой ограниченного множества E называется точная нижняя граница мер открытых ограниченных множеств A , содержащих множество E :

$$\mu^*(E) = \inf_{A \supset E} \mu(A).$$

Определение 1.7. Внутренней мерой ограниченного множества E называется точная верхняя граница мер замкнутых множеств B , содержащихся в множестве E :

$$\mu_*(E) = \sup_{B \subset E} \mu(B).$$

Свойство 1.15. Внутренняя и внешняя меры множества E удовлетворяют неравенству

$$\mu_*(E) \leq \mu^*(E)$$

(задача 10.17).

Свойство 1.16. Если E_1 и E_2 — ограниченные множества и $E_1 \subset E_2$, то

$$\mu_*(E_1) \leq \mu_*(E_2), \quad \mu^*(E_1) \leq \mu^*(E_2)$$

(задача 10.18).

Свойство 1.17. Если ограниченное множество E есть объединение конечного числа или счетного множества множеств E_k , т. е. $E = \bigcup_k E_k$, то

$$\mu^*(E) \leq \sum_k \mu^*(E_k).$$

Доказательство. Если ряд расходится, то неравенство выполняется. Пусть ряд сходится. Для любого $\varepsilon > 0$ найдутся открытые ограниченные множества A_k такие, что

$$E_k \subset A_k, \quad \mu(A_k) < \mu^*(E_k) + \frac{\varepsilon}{2^k}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Существует интервал Δ , содержащий множество E ; при этом $\Delta \cap \bigcup_k A_k$ — открытое ограниченное множество, которому принадлежит E , а также $\Delta \cap A_k \subset A_k$. По определению внешней меры и на основании свойства 1.3

$$\mu^*(E) \leq \mu(\Delta \cap \bigcup_k A_k) = \mu(\bigcup_k \Delta \cap A_k) \leq \sum_k \mu(\Delta \cap A_k) \leq \sum_k \mu(A_k) + \varepsilon.$$

Так как ε — любое число, то требуемое неравенство установлено.

Свойство 1.18. Если ограниченное множество E есть объединение конечного числа или счетного множества взаимно не пересекающихся множеств E_k , то

$$\mu_*(E) \geq \sum_k \mu_*(E_k).$$

Доказательство. Для каждого множества E_k из первых N множеств существует замкнутое множество B_k такое, что

$$B_k \subset E_k, \quad \mu(B_k) > \mu_*(E_k) - \frac{\varepsilon}{N}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, N,$$

где $\varepsilon > 0$ — любое число. По определению внутренней меры и по свойству 1.13

$$\mu_*(E) \geq \mu\left(\bigcup_{k=1}^N B_k\right) = \sum_k \mu(B_k) > \sum_k \mu_*(E_k) - \varepsilon.$$

Результат следует из произвольности ε и N .

Определение 1.8. Ограниченное множество E называется измеримым, если его внешняя и внутренняя меры одинаковы. Их общее значение называется мерой Лебега и обозначается

$$\mu(E) = \mu^*(E) = \mu_*(E).$$

В дальнейшем мера Лебега называется просто мерой.

Свойство 1.19 (аддитивность меры). Если ограниченное множество E есть объединение конечного числа или счетного множества взаимно не пересекающихся измеримых множеств E_k , то множество E измеримо и его мера

$$\mu(E) = \sum_k \mu(E_k).$$

Доказательство. На основании свойств 1.17 и 1.18 и в силу измеримости множеств E_k

$$\begin{aligned} \mu^*(E) &\leq \sum_k \mu^*(E_k) = \sum_k \mu(E_k), \\ \mu_*(E) &\geq \sum_k \mu_*(E_k) = \sum_k \mu(E_k), \end{aligned}$$

т. е. $\mu^*(E) = \mu_*(E)$.

Свойство 1.20. Пусть E — ограниченное множество, содержащееся в интервале Δ ; если одно из множеств E и $C_\Delta E$ измеримо, то измеримо и другое ([61], гл. III.)

Свойство 1.21. Объединение и пересечение счетного множества измеримых множеств суть измеримые множества (см. [33], гл. V).

Теория меры для плоских множеств строится аналогично. Исходным объектом служит прямоугольник. Мерой открытого, полуоткрытого, замкнутого прямоугольника называется его площадь.

Если некоторое утверждение справедливо для всех точек множества E кроме точек подмножества E_0 , мера которого $\mu(E_0) = 0$, то это выражают словесно так: утверждение справедливо почти всюду (п. в.) на множестве E .

В задачах 10.1–10.8 x — точка, E — множество точек числовой оси Ox .

10.1. Окрестностью точки x называется любой конечный интервал $(a; b)$, содержащий эту точку. Точка x называется внутренней точкой множества E , если существует окрестность этой точки, принадлежащая E . Множество E называется открытым, если все его точки внутренние. Какие из следующих множеств открыты:

$$1) (0; 1); 2) (0; 1]; 3) (0; 1) \cup \{2\}; 4) (0; 1) \cup (1; \infty)?$$

10.2. Точка x_0 называется предельной точкой множества E , если в любой ее окрестности есть точка $x \in E$, отличная от x_0 . Множество всех предельных точек множества E называется производным множеством множества E и обозначается E' . Найти производные множества следующих множеств:

$$1) (0; 1); 2) \left[\frac{1}{2}; 1\right); 3) \left(\frac{2}{3}; 1\right] \cup \{2\}; 4) \left\{1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n}, \dots\right\}.$$

10.3. Множество E называется замкнутым, если $E' \subset E$. Указать замкнутые множества среди следующих множеств:

$$1) \left\{1, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \dots, \frac{n-1}{n}, \dots\right\}; 2) [0; 1) \cup \left(\frac{1}{2}; 2\right];$$

$$3) E \text{ — множество всех рациональных чисел}; 4) [0; 2] \setminus \{\sqrt{2}\}.$$

10.4. Если $E \subset E'$, то множество E называется плотным в себе. Указать, какие из следующих множеств являются плотными в себе:

$$1) (0; 1); 2) (0; 1) \cup (1; 2); 3) (0; 1) \cup \{2\}; 4) [0; 1].$$

10.5. Если $E = E'$, то множество E называется совершенным. Указать совершенные множества среди следующих множеств:

$$1) [0; 1]; 2) (0; 1); 3) \{1, 2, 3\}; 4) \emptyset.$$

10.6. Показать, что производное множество любого точечного множества замкнуто.

10.7. Множество $E \cup E'$ называется замыканием множества E и обозначается $\overline{E}$. Доказать, что замыкание любого точечного множества замкнуто.

10.8. Доказать, что множество E замкнуто тогда и только тогда, когда $E = \overline{E}$.

10.9. Если A_1 и A_2 — открытые ограниченные множества, то

$$A_1 \subset A_2 \implies \mu(A_1) \leq \mu(A_2).$$

Доказать этот факт.

10.10. Найти меру множества $B = \bigcup_{k=1}^N [a_k; b_k]$ взаимно не пересекающихся отрезков.

10.11. Показать, что мера ограниченного замкнутого множества B

$$\mu(B) = \mu(\Delta) - \mu(C_\Delta B),$$

где $\Delta = (b_1 - a_1)$ — интервал, содержащий множество B .

10.12. Если $B_1 \subset B_2$, где B_1 и B_2 ограниченные замкнутые множества, то $\mu(B_1) \leq \mu(B_2)$. Доказать этот факт.

10.13. Замкнутое множество B принадлежит открытому ограниченному множеству A . Доказать, что $\mu(B_1) \leq \mu(A)$.

10.14. Показать, что мера замкнутого ограниченного множества B есть точная нижняя граница мер открытых множеств A , содержащих B .

10.15. Ограниченное замкнутое множество есть объединение конечного числа взаимно не пересекающихся замкнутых множеств

$$B = \bigcup_{k=1}^n B_k, \quad B_m \cap B_s = \emptyset, m \neq s;$$

доказать, что

$$\mu(B) = \sum_k \mu(B_k).$$

10.16. Показать, что: 1) конечное множество точек $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ и 2) множество рациональных чисел на отрезке $[a; b]$, имеют меру $\mu = 0$.

10.17. Множество E ограничено; доказать, что

$$\mu_*(E) \leq \mu^*(E).$$

10.18. Множество E_1 принадлежит ограниченному множеству E_2 ; доказать, что

$$\mu_*(E_1) \leq \mu_*(E_2), \quad \mu^*(E_1) \leq \mu^*(E_2).$$

10.19. Доказать, что мера ограниченного открытого множества, введенная в определении 1.4, является мерой Лебега.

10.20. Доказать, что мера ограниченного замкнутого множества, введенная в определении 1.5, является мерой Лебега.

10.21. Доказать, что разность $E = E_1/E_2$ измеримых множеств E_1 и E_2 — измеримое множество. Найти меру разности, если $E_2 \subset E_1$.

10.22. Отрезок $[0; 1]$ делится точками $\frac{1}{3}$ и $\frac{2}{3}$ на три равные части и выделяется средняя часть — интервал $\Delta_1 = \left(\frac{1}{3}; \frac{2}{3}\right)$. Каждый из оставшихся двух отрезков $\left[0; \frac{1}{3}\right]$ и $\left[\frac{2}{3}; 1\right]$ делится на три равные части и выделяются средние интервалы Δ_2 и Δ_3 . Каждый из оставшихся четырех отрезков делится на три равные части и выделяются средние интервалы $\Delta_4, \Delta_5, \Delta_6, \Delta_7$ и т. д. Объединение всех интервалов образует Канторово множество G_0 . Доказать, что множество G_0 измеримо и вычислить его меру.

10.23. Если из отрезка $[0; 1]$ удалить множество G_0 (см. предыдущую задачу), то останется множество, называемое Канторовым совершенным множеством P_0 . Доказать, что множество P_0 измеримо и вычислить его меру.

10.24. Измеримо ли множество всех рациональных чисел числовой прямой? Если да, то чему равна мера этого множества?

10.25. В единичном квадрате $\{x, y: 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$ выделено подмножество E точек (x, y) , координаты которых удовлетворяют условиям $\cos 2y > 1, \sin \frac{1}{xy} = 0$. Найти меру подмножества E .

10.26. В $\mathbb{R}^2$ заданы множества точек (x, y) , координаты которых удовлетворяют уравнениям: 1) $x^2 + y^2 = 1$; 2) $y^2 = 4x$. Вычислить меры μ_1 и μ_2 этих множеств.

10.27. Верно ли утверждение: $f(x) = \frac{1}{\sin \pi x}$ — непрерывна почти всюду?

10.28. Верно ли утверждение: последовательность функций $f_n(x) = x^n$, определенных при $x \in [0; 1]$, сходится при $n \rightarrow \infty$ к $f(x) = 0$ почти всюду?

10.29. Верно ли утверждение, что функция Дирихле

$$D(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \text{ — рациональное число,} \\ 0, & \text{если } x \text{ — иррациональное число,} \end{cases}$$

заданная на отрезке $[0; 1]$ равна нулю почти всюду?

Пример 10.2. Измеримые функции

Определение 2.1. Функция $f(x)$, определенная на измеримом множестве X , называется измеримой, если для любого $a \in \mathbb{R}$ измеримо множество

$$E(f) = \{x \in X: f(x) > a\}.$$

Свойство 2.1. Любая функция, заданная на множестве меры нуль, измерима.

Далее считается, что множество, на котором задана функция $f(x)$ — измеримо.

Свойство 2.2. Функция $f(x) = c$ на X измерима.

Действительно,

$$E(f > a) = \begin{cases} X, & a < c, \\ \emptyset, & a > c. \end{cases}$$

Определение 2.2. Функции $f(x)$ и $g(x)$, определенные на множестве X , называются эквивалентными (обозначение: $f \sim g$), если мера множества $E(f \neq g)$ равна нулю.

Иначе говоря, эквивалентные функции, заданные на множестве X , равны почти всюду.

Свойство 2.3. Функция $f(x)$ определена на измеримом множестве X , представимом объединением конечного числа или счетного множества измеримых множеств E_k . Если $f(x)$ измерима на каждом множестве E_k , то она измерима на множестве X .

Это свойство следует из соотношения

$$E(f > a) = \bigcup_k E_k(f > a).$$

Свойство 2.4. Функция, непрерывная на отрезке $X = [a; b]$, измерима на X (задача 10.38).

Свойство 2.5. Если функция $f(x)$, заданная на множестве X , измерима, то измеримы множества:

$$1) E(f \geq a); 2) E(f = a); 3) E(f < a); 4) E(f \leq a).$$

Доказательство 1) вытекает из соотношения

$$E(f \geq a) = \bigcap_{n=1}^{\infty} E\left(f > a - \frac{1}{n}\right).$$

См. задачу 10.40.

Свойство 2.6. Если одно из множеств $E(f \geq a)$, $E(f < a)$, $E(f \leq a)$ измеримо, то функция $f(x)$ измерима на множестве X (задача 10.38).

Свойство 2.7. Если функции $f(x)$ и $g(x)$, заданные на множестве X , измеримы, то множество $E(f > g)$ измеримо.

Доказательство следует из соотношения

$$E(f > g) = \bigcap_{n=1}^{\infty} E(f > r_k) \cap E(g < r_k),$$

где $r_1, r_2, r_3, \dots$ — множество всех рациональных чисел, занумерованных в произвольном порядке.

Арифметические свойства измеримых функций составляют содержание задач 10.41–10.45.

Определение 2.3. Комплекснозначная функция $f(x) = f_1(x) + if_2(x)$ называется измеримой, если измеримы ее вещественная часть $f_1(x)$ и мнимая часть $f_2(x)$.

Свойство 2.8. Предел сходящейся в каждой точке $x \in X$ последовательности $f_n(x)$ измеримых функций измерим.

Доказательство сводится к установлению тождества

$$E(f > a) = \bigcup_{n,m} B_m^{(n)}, \text{ где } B_m^{(n)} = \bigcap_{k=n}^{\infty} A_m^{(k)}, A_m^{(k)} = E(f_k > a + \frac{1}{m}).$$

Пусть $x \in E(f > a)$, тогда $f(x) > a$. Стало быть, найдется такое m , что $f(x) > a + \frac{1}{m}$. Но $f_k \rightarrow f(x)$, поэтому существует n такое, что при $k \geq n$ выполняется неравенство $f_k(x) > a + \frac{1}{m}$,

т.е. $x \in A_m^{(k)}$. Последнее заключение означает, что $x \in B_m^{(n)}$, следовательно, $x \in \bigcup_{n,m} B_m^{(n)}$.

Если $x \in \bigcup_{n,m} B_m^{(n)}$, то $x \in B_m^{(n)}$ при некоторых n и m , т.е. $x \in A_m^{(k)}$ при всех $k \geq n$. Это значит, что $f_k(x) > a + \frac{1}{m}$ при $k \geq n$. Полученное неравенство при $k \rightarrow \infty$ преобразуется в $f(x) \geq a + \frac{1}{m}$, откуда $f(x) > a$. Поскольку множество $\bigcup_{n,m} B_m^{(n)}$ измеримо, свойство установлено.

Свойство 2.9. На множестве E задана измеримая, почти всюду конечная функция $f(x)$. Тогда при любом $\varepsilon > 0$ существует такая измеримая ограниченная функция $g(x)$, что $\mu(E(f \neq g)) < \varepsilon$ ([61], гл. IV, § 4). Таким образом, множество, на котором функция не ограничена, имеет сколь угодно малую меру.

На множестве $E(f \neq g)$ функция $f(x)$ не ограничена, поэтому условие $f \neq g$ сохранится, если $g(x) = 0$ на этом множестве.

Свойство 2.10 (Теорема Н.Н. Лузина). Для того чтобы функция $f(x)$, заданная на отрезке $[a; b]$, была измерима, необходимо и достаточно, чтобы для любого $\varepsilon > 0$ существовала такая непрерывная на $[a; b]$ функция $\varphi(x)$, что

$$\mu(x: f(x) \neq \varphi(x)) < \varepsilon.$$

Иными словами, измеримая функция может быть сделана непрерывной на $[a; b]$ путем ее изменения на множестве сколь угодно малой меры ([61], гл. IV, § 4).

10.30. Если функция $f(x)$, заданная на множестве X , измерима, то эквивалентная ей функция $g(x)$ также измерима. Доказать.

10.31. На отрезке $[a; b]$ выделено конечное число точек $c_0 = a, c_1, c_2, \dots, c_n = b$. Показать, что функция $f(x)$, равная постоянной f_k на каждом интервале $[c_k; c_{k+1}]$, $k = 0, 1, 2, \dots, n-1$, измерима.

10.32. Измерима ли функция Дирихле (см. задачу 10.29), заданная на отрезке $[0; 1]$?

10.33. Можно ли утверждать, что функция Дирихле (см. задачу 10.29), заданная на отрезке $[0; 1]$ эквивалентна функции, тождественно равной нулю на этом отрезке?

10.34. Измерима ли функция $\eta(x^2 - 2) \ln |x|$, определенная на отрезке $x \in [-2; 2]$?

10.35. Измерима ли функция

$$f(x) = \begin{cases} 1/x, & 0 < x \leq 1, \\ 0, & x = 0? \end{cases}$$

10.36. Измеримы ли функции

$$f(x) = \begin{cases} \sin^2 \frac{1}{x}, & x \in (0; 1], \\ 0, & x = 0; \end{cases}$$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\cos x}{|\cos x|}, & x \in [-10\pi; 10\pi], x \neq \frac{\pi}{2} + \pi k, k = -10, -9, \dots, 8, 9, \\ \frac{1}{2}, & x = \frac{\pi}{2} + \pi k, k = -10, -9, \dots, 8, 9? \end{cases}$$

10.37. Измеримы ли функции:

$$1) f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x^2} e^{-\frac{1}{x}}, & x \in (0; 1], \\ 0, & x = 0; \end{cases} \quad 2) f(x) = \begin{cases} x^2 e^{\frac{1}{x}}, & x \in (0; 1], \\ 0, & x = 0? \end{cases}$$

10.38. Показать, что непрерывная на отрезке $X = [a; b]$ функция, измерима.

10.39. Функция $f(x)$ задана на множестве X . Показать, что измеримость множества $E(f > a)$ влечет измеримость множеств:

$$1) E(f = a); 2) E(f \leq a); 3) E(f < a).$$

10.40. Функция $f(x)$ определена на множестве X . Доказать, что следующие утверждения эквивалентны:

- 1) $\forall a \in \mathbb{R}$ множество $\{x \in X: f(x) > a\}$ измеримо;
- 2) $\forall a \in \mathbb{R}$ множество $\{x \in X: f(x) \geq a\}$ измеримо;
- 3) $\forall a \in \mathbb{R}$ множество $\{x \in X: f(x) < a\}$ измеримо;
- 4) $\forall a \in \mathbb{R}$ множество $\{x \in X: f(x) \leq a\}$ измеримо.

10.41. Если функция $f(x)$, заданная на множестве X , измерима, то измеримы функции 1) $f(x) + k$; 2) $k f(x)$. Доказать.

10.42. Функция $f(x)$, определенная на множестве X , измерима. Доказать, что измеримы функции 1) $|f(x)|$; 2) $f^2(x)$.

10.43. На множестве X определена функция $f(x) \neq 0$. Если функция $f(x)$ измерима, то измерима ли функция $1/f(x)$?

10.44. Измеримые функции $f(x) > 0$ и $g(x)$ определены на множестве X . Показать, что показательно-степенная функция $f(x)^{g(x)}$ измерима.

10.45. На множестве X определены измеримые ограниченные функции $f(x)$ и $g(x)$. Установить измеримость функций:

- 1) $f(x) - g(x)$; 2) $f(x) + g(x)$;
3) $f(x) \cdot g(x)$; 4) $f(x)/g(x)$, если $g(x) \neq 0$.

10.46. Характеристической функцией множества X называется функция

$$\chi(x) = \begin{cases} 1, & x \in X, \\ 0, & x \notin X. \end{cases}$$

Показать, что функция $\chi(x)$ измерима, если и только если измеримо множество X .

10.47. Доказать, что две непрерывные на отрезке функции эквивалентны относительно меры Лебега тогда и только тогда, когда они тождественно равны.

10.48. Функция $f(x)$, заданная на множестве X , измерима. Доказать, что ее положительная часть $f^+ = \max(f, 0)$ и ее отрицательная часть $f^- = -\min(f, 0)$ — измеримые функции.

10.49. Измеримая ограниченная функция $g(x)$ определена на множестве X , ее область значений — множество Y ; ограниченная непрерывная функция $f(x)$ определена на множестве Y . Доказать, что $h(x) = f(g(x))$ — измеримая функция.

10.50. Доказать измеримость модуля и аргумента измеримой комплекснозначной функции $f(x) = f_1(x) + if_2(x)$.

10.51. Дана последовательность $f_n(x)$ измеримых функций, определенных на множестве X . Доказать, что функции $\sup_n f_n(x)$ и $\inf_n f_n(x)$ измеримы.

10.52. Известно, что $f_n \xrightarrow{\text{п.в.}} f$ и $f_n \xrightarrow{\text{п.в.}} g$. Доказать, что $f \sim g$.

10.53. Функция $f(x)$ всюду дифференцируема на $[0; 1]$. Доказать, что $f'(x)$ измерима на $[0; 1]$.

10.54. Если последовательность измеримых функций $f_n(x)$ сходится к функции $f(x)$ почти всюду на X , то $f(x)$ также будет измеримой.

Пример 10.3. Интеграл Лебега. Определенный интеграл непрерывной на отрезке $[a; b]$ функции $f(x)$ равен пределу интегральных сумм (О. Коши, Б. Риман):

$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{k=1}^n f(\xi_k)(x_k - x_{k-1}),$$

где $\lambda = \max_k (x_k - x_{k-1})$, $\xi_k \in E_k = [x_k - x_{k-1}]$. Если $f(x)$ непрерывная функция, то с уменьшением длины отрезка E_k разброс значений $f(x)$ в общем случае уменьшится. Для разрывной функции это свойство теряется. Близость значений ограниченной функции, $A \leq f(x) \leq B$, сохранится (непрерывна она или нет), если разбить отрезок $[A; B]$ оси ординат на промежутки (идея Лебега), т. е.

$$E_k = E(y_k \leq f \leq y_{k+1}), \quad A = y_0 < y_1 < y_2 < \dots < y_n = B.$$

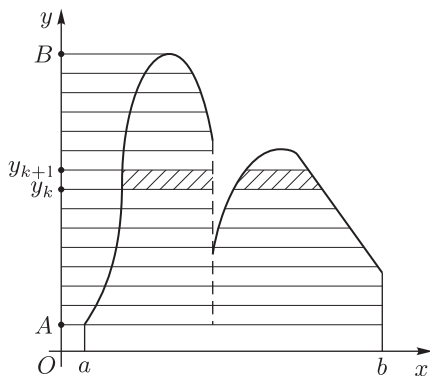


Рис. 10.1

Для ограниченной измеримой функции $f(x)$, заданной на измеримом множестве $E \subset [a; b]$, определены нижняя s и верхняя S интегральные суммы Лебега

$$s = \sum_{k=0}^{n-1} y_k \mu(E_k), \quad S = \sum_{k=0}^{n-1} y_{k+1} \mu(E_k).$$

Каково бы ни было разбиение отрезка $[A; B]$:

$$s \leq S, \quad 0 \leq S - s \leq \lambda \mu(E), \quad \lambda = \max_k (x_{k+1} - x_k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, n-1.$$

Отсюда следует существование общего предела при $\lambda \rightarrow 0$ интегральных сумм s и S .

Определение 2.6. Общее значение пределов интегральных сумм s и S при $\lambda \rightarrow 0$ называется интегралом Лебега функции $f(x)$ и обозначается

$$\int_E f(x)dx = \lim_{\lambda \rightarrow 0} s = \lim_{\lambda \rightarrow 0} S$$

Интеграл не зависит от границ A, B отрезка, содержащего множество E (задача 10.56).

Таким образом, любая ограниченная измеримая функция интегрируема по Лебегу.

Интеграл Лебега определяется совершенно так же для функций, заданных на пространствах любой конечной размерности с мерой.

Если функция интегрируема по Риману, то она необходимо интегрируема по Лебегу и оба интеграла равны (см. [61], гл. V, § 5). Геометрическая интерпретация: одна и та же площадь вычислена разными способами. Обратное утверждение не верно (см. задачу 10.69). Критерий интегрируемости дан Лебегом: для того чтобы ограниченная функция $f(x)$ была интегрируема по Риману, необходимо и достаточно, чтобы она была непрерывна почти всюду (см. [61], гл. V, § 4).

Ниже (включая задачи) $f(x), g(x)$ и т. д. — измеримые функции, заданные на измеримых множествах.

10.55. На измеримом множестве $E \subset [a; b]$ задана ограниченная измеримая функция $f(x)$. Разбиению T соответствуют нижняя s и верхняя S интегральные суммы Лебега. Доказать следующие свойства интегральных сумм:

1) если разбиение T_1 получено добавлением конечного числа точек в разбиении T , то $s \leq s_1, S \geq S_1$;

2) если есть два каких-либо разбиения, то нижняя сумма первого не больше верхней суммы второго, т. е. $s \leq S$.

10.56. Показать, что интеграл Лебега по множеству $E \subset [A; B]$ (см. пример 10.3) не зависит от концов A и B отрезка.

10.57. Интегральная теорема о среднем. Если $\forall \in X : A < f(x) < B$, то $A\mu(X) \leq \int_X f(x)dx \leq B\mu(X)$. Доказать.

10.58. Функция $f(x) \equiv c, x \in X$; вычислить интеграл $\int_X f(x)dx$.

10.59. Функция $f(x)$, заданная на множестве X , не меняет знак. Доказать, что интеграл также не меняет знак.

10.60. Вычислить интеграл ограниченной функции $f(x)$, заданной на множестве X меры ноль.

10.61. Аддитивность интеграла. Пусть ограниченная функция $f(x)$ задана на множестве

$$X = \bigcup_k X_k, \quad X_m \cap X_n = \emptyset, \quad m \neq n;$$

доказать что

$$\int_X f(x) dx = \sum_k \int_{X_k} f(x) dx.$$

10.62. Ограниченные функции $f(x)$ и $g(x)$, заданные на множестве X , эквивалентны. Как связаны интегралы этих функций?

10.63. Показать, что интеграл неотрицательной ограниченной функции равен нулю тогда и только тогда, когда функция эквивалентна нулю.

10.64. Ограниченная функция $f(x)$ определена на множестве X , k — число. Вывести правило:

$$\int_X kf(x) dx = k \int_X f(x) dx.$$

10.65. Ограниченные функции $f(x)$ и $g(x)$ определены на множестве X . Установить правило

$$\int_X (f(x) \pm g(x)) dx = \int_X f(x) dx \pm \int_X g(x) dx.$$

10.66. Ограниченные функции $f(x)$ и $g(x)$ определены на множестве X и удовлетворяют неравенству $f(x) \leq g(x)$. Доказать, что

$$\int_X f(x) dx \leq \int_X g(x) dx.$$

10.67. Ограниченная функция $f(x)$ определена на множестве X . Доказать неравенство

$$\left| \int_X f(x) dx \right| \leq \int_X |f(x)| dx.$$

10.68. Дифференцируемая функция $\varphi(x)$ монотонно возрастает на отрезке $[A; B]$, ψ — обратная к ней функция, определенная на отрезке $[\varphi(a); \varphi(b)]$. Доказать тождество

$$\int_a^b \varphi(x) dx = \int_{\varphi(a)}^{\varphi(b)} y \psi'(y) dy.$$

10.69. Показать, что функция Дирихле (см. задачу 10.29), определенная на отрезке $[0; 1]$, не интегрируема по Риману.

10.70. Вычислить интеграл Лебега функции Дирихле (см. задачу 10.29), определенной на отрезке $[0; 1]$.

10.71. Вычислить интеграл Лебега по отрезку $[0; 1]$ следующих функций:

$$\begin{aligned} 1) f(x) &= \begin{cases} x^2, & x \text{ рационально,} \\ x^3, & x \text{ иррационально;} \end{cases} \\ 2) f(x) &= \begin{cases} \sqrt{x}, & x \text{ рационально,} \\ 1, & x \text{ иррационально;} \end{cases} \\ 3) f(x) &= \begin{cases} \frac{1}{x^2 + 1}, & x \text{ рационально,} \\ 0, & x \text{ иррационально.} \end{cases} \end{aligned}$$

10.72. Вычислить интеграл Лебега по отрезку $\left[0; \frac{\pi}{2}\right]$ следующих функций:

$$\begin{aligned} 1) f(x) &= \begin{cases} \cos x, & x \text{ рационально,} \\ \sin x, & x \text{ иррационально;} \end{cases} \\ 2) f(x) &= \begin{cases} \sin 2x, & \cos x \text{ рациональное число,} \\ \cos x, & \cos x \text{ иррациональное число.} \end{cases} \end{aligned}$$

10.73. Вычислить интеграл Лебега по отрезку $[0; 1]$ функций:

$$1) f(x) = \operatorname{sign} \left(\sin \frac{\pi}{x} \right); \quad 2) f(x) = \operatorname{sign} \left(\cos \frac{\pi}{x} \right).$$

10.74. Вычислить интеграл Лебега по отрезку $[0; 1]$ функций:

$$1) f(x) = \eta \left(\sin \frac{\pi}{\sqrt{x}} \right); \quad 2) f(x) = \eta \left(\cos \frac{\pi}{\sqrt{x}} \right).$$

10.75. Вычислить интеграл Лебега по квадрату ($0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$) функции

$$f(x) = \begin{cases} 1, & xy \text{ рационально,} \\ 0, & xy \text{ иррационально.} \end{cases}$$

Пример 10.4. Суммируемые функции. Интеграл Лебега распространяется на неограниченные функции. Любая измеримая неотрицательная функция $f(x)$, заданная на измеримом множестве E , является источником измеримых функций (задача 10.48):

$$[f(x)]_N = \begin{cases} f(x), & f(x) \leq N, \\ N, & f(x) > N, \end{cases}$$

где $N = 1, 2, 3, \dots$. Каждая функция $[f(x)]_N$ ограничена, потому интегрируема. Из неравенств

$$[f(x)]_1 \leq [f(x)]_2 \leq [f(x)]_3 \leq \dots$$

следуют неравенства

$$\int_E [f(x)]_1 dx \leq \int_E [f(x)]_2 dx \leq \int_E [f(x)]_3 dx \leq \dots$$

Определение 4.1. Предел последовательности интегралов, конечной или нет, называется интегралом Лебега $f(x)$ по множеству E и обозначается

$$\int_E f(x) dx.$$

В случае ограниченной функции при достаточно большом N функция $[f(x)]_N \equiv f(x)$ и новое определение интеграла совпадает с определением, введенным в примере 10.3.

Ряд свойств интеграла Лебега от ограниченных функций сохраняется для интегралов от неограниченных функций (см. в задачах).

Свойство 4.1. Аддитивность интеграла. Если

$$E = \bigcup_n E_n, \quad E_k \cap E_m = \emptyset,$$

где $E, E_1, E_2, E_3, \dots$ — измеримые множества, то

$$\int_E f(x) dx = \sum_k \int_{E_k} f(x) dx,$$

где $f(x)$ — измеримая неотрицательная функция.

Измеримую функцию $f(x)$ любого знака можно представить в виде разности

$$f(x) = f_+(x) - f_-(x),$$

где

$$f_+(x) = \begin{cases} f(x), & f(x) \geq 0, \\ 0, & f(x) < 0, \end{cases} \quad f_-(x) = \begin{cases} 0, & f(x) \geq 0, \\ -f(x), & f(x) < 0. \end{cases}$$

Функции $f_+(x)$ и $f_-(x)$ измеримы и не отрицательны, следовательно, существуют интегралы этих функций по множеству E .

Определение 4.2. Если хотя бы одна из функций $f_+(x)$, $f_-(x)$ суммируема на E , то разность их интегралов называется интегралом Лебега функции и обозначается

$$\int_E f(x) dx = \int_E f_+(x) dx - \int_E f_-(x) dx.$$

В определении исключена неопределенность, возникающая, если оба интеграла не ограничены.

Определение 4.3. Функция $f(x)$ называется суммируемой, или интегрируемой на множестве E , если ее интеграл по этому множеству существует и конечен.

Множество суммируемых функций, заданных на E , обозначается символом $L_1(E)$ или, если множество E фиксировано, L_1 .

Свойство 4.2. Функция $f(x) \in L_1$ если и только если $|f(x)| \in L_1$, при этом

$$\left| \int_E f(x) dx \right| < \int_E |f(x)| dx.$$

См. задачу 10.86.

Свойство 4.3. Абсолютная непрерывность интеграла. На измеримом множестве E задана функция $f(x) \in L_1$. Какое бы ни было $\varepsilon > 0$ можно указать такое $\delta > 0$, что для любого измеримого множества $\Delta E \subset E$, мера которого $\mu(\Delta E) < \delta$, выполняется неравенство

$$\left| \int_E f(x) dx \right| < \varepsilon.$$

Доказательство. Располагая свойством 4.2, достаточно установить требуемое неравенство для $|f(x)|$. Из определения

интеграла неотрицательной функции следует существование такого N , что

$$\int_E |f(x)| dx - \int_E [|f(x)|]_N dx < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Если $\Delta E \subset E$, то полученное неравенство справедливо и для ΔE :

$$\int_{\Delta E} |f(x)| dx - \int_{\Delta E} [|f(x)|]_N dx < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Так как $[|f(x)|]_N \leq N$, то по теореме о среднем (задача 10.57)

$$\int_{\Delta E} [|f(x)|]_N dx \leq N\mu(\Delta E) \implies \int_{\Delta E} |f(x)| dx < \frac{\varepsilon}{2} + N\mu(\Delta E),$$

откуда при $\delta = \frac{\varepsilon}{2N}$ следует результат.

Свойство 4.4 (теорема Лебега о переходе к пределу под знаком интеграла). Если последовательность измеримых функций $f_n(x)$, определенных на множестве E , сходится почти всюду к функции $f(x)$ и существует функция $g(x) \in L_1(E)$, такая что $|f_n(x)| \leq g(x)$, $n = 1, 2, 3, \dots$, то $f(x) \in L_1(E)$ и

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n(x) dx = \int_E f(x) dx.$$

Определение 4.4. Множество, содержащееся в $(-\infty; +\infty)$, называется измеримым, если при любом натуральном n измеримо множество $E(n) = [-n; n] \cap E$. Мерой множества E называется предел

$$\mu(E) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(E(n)).$$

Определение 4.5. Неограниченная измеримая функция, заданная на неограниченном множестве E , принимающая значения разных знаков, равна разности функций $f_+(x) = \max\{f(x), 0\}$ и $f_-(x) = \max\{-f(x), 0\}$. Интегралом Лебега функции $f(x)$ называется

$$\int_E f(x) dx = \int_E f_+(x) dx - \int_E f_-(x) dx$$

при условии, что разность имеет смысл. Если интеграл существует и конечен, то $f(x)$ называется интегрируемой, или суммируемой, на множестве E .

В двумерном случае интервалы следует заменить квадратами, в трехмерном — кубами и т. д.

Свойство 4.5. Если $f(x) \in L_1$, то и $|f(x)| \in L_1$.

Свойство 4.6 (теорема Фубини о перемене порядка интегрирования). Если функция, заданная в $\mathbb{R}^2$, $x \in \mathbb{R}$, $y \in \mathbb{R}$, измерима и существует повторный интеграл функции $|f(x, y)|$

$$\int dy \int |f(x, y)| dx,$$

то функция $f(x, y)$ интегрируема. Если функция $f(x, y)$ интегрируема, то интегралы

$$\int f(x, y) dx, \quad \int f(x, y) dy$$

существуют почти всюду и интегрируемы, причем

$$\int f(x, y) dx dy = \int dx \int f(x, y) dy = \int dy \int f(x, y) dx.$$

10.76. Доказать измеримость функций ($N = 1, 2, 3, \dots$)

$$[f(x)]_N = \begin{cases} f(x), & f(x) \leq N, \\ N, & f(x) > N, \end{cases}$$

где $f(x)$ — измеримая неотрицательная функция, заданная на измеримом множестве E .

10.77. Доказать, что неотрицательная измеримая функция $f(x)$, суммируемая на множестве E , почти всюду конечна.

10.78. Если неотрицательная функция $f(x)$ суммируема на множестве E и интеграл этой функции равен нулю, то $f \sim 0$. Доказать.

10.79. Доказать, что из эквивалентности неотрицательных функций $f(x)$ и $g(x)$, заданных на множестве E , следует равенство интегралов:

$$\int_E f(x) dx = \int_E g(x) dx.$$

10.80. Неотрицательная измеримая функция $f(x)$ задана на множестве E , измеримое множество $\Delta E \subset E$. Доказать, что

$$\int_{\Delta E} f(x) dx \leq \int_E f(x) dx.$$

10.81. Неотрицательные функции $f(x)$ и $g(x)$ заданы на множестве E и $f(x) \leq g(x)$. Доказать, что

$$\int_E f(x)dx \leq \int_E g(x)dx.$$

10.82. На множестве E заданы неотрицательные функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$, функция $f(x) = f_1(x) + f_2(x)$. Доказать, что

$$\int_E f(x)dx = \int_E f_1(x)dx + \int_E f_2(x)dx.$$

10.83. Пусть $f(x)$ — неотрицательная функция, заданная на множестве E , число $k \geq 0$. Доказать, что

$$\int_E kf(x)dx = k \int_E f(x)dx.$$

10.84. Дана функция

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{1-x}, & 0 \leq x < 1, \\ 0, & x = 1. \end{cases}$$

1) Определен ли интеграл Лебега этой функции; 2) суммируема ли $f(x)$?

10.85. Суммируема ли функция

$$f(x) = \begin{cases} e^{\frac{1}{x}}, & x \text{ — рациональное число,} \\ 0, & x \text{ — иррациональное число} \end{cases}$$

на отрезке $[0; 1]$?

10.86. Доказать следующее утверждение: для того чтобы измеримая функция $f(x)$ любого знака была суммируема, необходимо и достаточно суммируемости функции $|f(x)|$, при этом

$$\left| \int_E f(x)dx \right| \leq \int_E |f(x)|dx.$$

10.87. Если измеримые функции $f(x)$ и $g(x)$ любого знака эквивалентны, то из существования одного из интегралов $\int_E f(x)dx$

и $\int_E g(x)dx$ следует существование другого и их равенство. Доказать этот факт.

10.88. Если измеримые функции $f(x)$ и $g(x)$ любого знака суммируемы на множестве E , то функция $f(x) = f_1(x) + f_2(x)$ также суммируема и

$$\int_E f(x)dx = \int_E f_1(x)dx + \int_E f_2(x)dx.$$

Доказать этот факт.

10.89. Измеримая функция $f(x)$ любого знака суммируема на множестве E , k — число. Показать, что функция $kf(x)$ также суммируема на E и

$$\int_E kf(x)dx = k \int_E f(x)dx.$$

10.90. Суммируемая функция $f(x)$ определена на множестве $E = [a; b]$. Доказать, что из равенства $\int_a^c f(x)dx = 0$ при любом $c \in [a; b]$ следует $f(x) \sim 0$.

10.91. Дана функция

$$f(x) = \begin{cases} \operatorname{sign} \left(\sin \frac{\pi}{x} \right) e^{\frac{1}{x}}, & 0 < x \leq 2, \\ 0, & x = 0. \end{cases}$$

1) Определен ли интеграл Лебега этой функции; 2) суммируема ли $f(x)$?

10.92. Дана функция

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x}, & |x| \leq 1, x \neq 0, \\ 0, & x = 0. \end{cases}$$

Интегрируема эта функция по отрезку $[-1; 1]$ в смысле: 1) Римана 2) Лебега?

10.93. Применима ли теорема Лебега (свойство 4.4) к последовательности

$$f_n(x) = \begin{cases} n, & 0 < x < \frac{1}{n}, \\ 0, & \frac{1}{n} \leq x \leq 1, \end{cases}$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$?

10.94. Применима ли теорема Лебега (свойство 4.4) к последовательности

$$f_n(x) = \begin{cases} 1, & 0 < x < \frac{1}{n}, \\ 0, & \frac{1}{n} \leq x \leq 1, \end{cases}$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$?

10.95. Вычислить интеграл Лебега по интервалу $(0; \infty)$ следующих функций:

$$1) f(x) = e^{-[x]}; \quad 2) f(x) = \frac{1}{[x+1][x+2]}; \quad 3) f(x) = \frac{1}{[x]}.$$

10.96. Интегрируема ли функция

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\sin x}{x}, & 0 < x, \\ 0, & x = 0, \end{cases}$$

на интервале $(0; \infty)$ по: 1) Риману; 2) Лебегу?

10.97. Определить, суммируемы ли функции:

$$\begin{aligned} 1) f(x, y) &= \begin{cases} e^{-xy} \sin x dx dy, & x > 0, y > 0, \\ 0, & x = y = 0; \end{cases} \\ 2) f(x, y) &= \begin{cases} e^{-xy} \sin x \sin y dx dy, & x > 0, y > 0, \\ 0, & x = y = 0. \end{cases} \end{aligned}$$

10.98. Дан интеграл

$$\int_0^1 \int_0^1 \frac{(x^2 - y^2) dx dy}{(x^2 + y^2)^2}.$$

Применима ли теорема Фубини?

10.99. Дан интеграл

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{xy dx dy}{(x^2 + y^2)^2}.$$

1) Показать, что оба повторных интегралов существуют и равны;
2) применима ли теорема Фубини?

10.100. На множестве $E = \{x, y: 0 < x < 1, 0 < y < 1\}$ определена ограниченная измеримая функция $f(x, y)$. Применима ли теорема Фубини к интегралу

$$\int_0^1 \int_0^1 \frac{f(x, y) dx dy}{\sqrt{1 - x^2 - y^2}}?$$

Пример 10.5. В процессе решения задач математической физики возникают интегралы от функций в квадрате (т. е. $f^2(x)$) с общей областью определения. Предстоит установить ряд свойств таких функций.

Определение 5.1. Измеримая комплекснозначная функция

$$f(x) = u(x) + iv(x),$$

заданная на множестве $E = [a; b]$, называется функцией с интегрируемым квадратом, если существует интеграл

$$\int_E |f(x)|^2 dx < \infty, \quad |f(x)|^2 = \overline{f}(x)f(x), \quad \overline{f}(x) = u(x) - iv(x);$$

впредь черта над комплексным числом означает комплексное сопряжение.

Все такие функции, определенные на одной и той же области E , составляют множество, обозначаемое $L_2(E)$, или L_2 , если не возникает неясность. Каждая функция с интегрируемым квадратом — элемент, или точка L_2 .

Свойство 5.1. Множество L_2 — линейное, т. е.

$$f_1 \in L_2, f_2 \in L_2 \implies \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 \in L_2,$$

где α_1, α_2 — комплексные числа (задача 10.101).

Определение 5.2. Квадратный корень из интеграла в определении 5.1 называется нормой функции, принадлежащей L_2 , и обозначается

$$\|f\| = \sqrt{\int_E |f(x)|^2 dx}.$$

Определение 5.3. Интеграл произведения $f(x)\overline{g}(x)$ называется скалярным произведением функций $f(x)$ и $g(x)$; оно обозначается символом

$$(f, g) = \int_E f(x)\overline{g}(x) dx.$$

Если $f \in L_2$, $g \in L_2$, то: 1) скалярное произведение существует; 2) $(f, g) = (g, f)$; 3) $(\alpha f + \beta g, h) = \alpha(f, h) + \beta(g, h)$.

Существование скалярного произведения вытекает из неравенства Коши–Буняковского

$$\left| \int_E f(x)g(x)dx \right|^2 \leq \int_E |f(x)|^2 dx \int_E |g(x)|^2 dx,$$

которому можно придать форму

$$|(f, g)| \leq \|f\| \|g\|.$$

При $g = 1$ неравенство Коши–Буняковского

$$\left| \int_E f(x)dx \right|^2 \leq (b-a) \int_E |f(x)|^2 dx$$

можно трактовать так:

$$f \in L_2 \implies f \in L_1,$$

т. е. имеет место вложение $L_2 \subset L_1$.

Норма $\|f\|$ обладает следующими свойствами:

- 1) $\|f\| \geq 0$, причем $\|f\| = 0$ тогда и только тогда, когда $f \sim 0$;
- 2) $\|kf\| = |k| \|f\|$;
- 3) $\|f + g\| \leq \|f\| + \|g\|$.

Последнее неравенство есть неравенство Минковского (см. задачу 10.103).

Определение 5.4. Всякое линейное множество, каждому элементу которого поставлено в соответствие число — норма $\|f\|$ со свойствами 1), 2), 3), называется линейным нормированным пространством.

Согласно определению 5.4 множество L_2 с введенной нормой является линейным нормированным пространством.

Свойства нормы аналогичны свойствам модуля числа ($|x|$), посредством которого вычисляется расстояние между точками x_1, x_2 числовой оси: $r(x_1, x_2) = |x_1 - x_2|$. Продолжая аналогию между модулем числа и нормой, можно ввести расстояние между точками f_1 и f_2 пространства L_2 при условии, что эквивалентные элементы тождественны:

$$r(f_1, f_2) = \|f - g\|.$$

Введенное таким образом расстояние обладает теми же свойствами, что и расстояние между точками числовой оси:

- 1) $r(f, g) \geq 0$, причем $r(f, g) = 0$ тогда и только тогда, когда $f = g$;
- 2) $r(f, g) = r(g, f)$;
- 3) $r(f, g) = r(f, h) + r(h, g)$ — неравенство треугольника.

Свойство 3) следует из неравенства Минковского:

$$\begin{aligned} r(f, g) = \|f - g\| &= \|f - h + h - g\| \leq \|f - h\| + \|h - g\| = \\ &= r(f, h) + r(h, g). \end{aligned}$$

Определение 5.5. Если каждой паре f, g элементов некоторого множества поставлено в соответствие число $r(f, g)$, где $r(f, g)$ обладает свойствами 1), 2), 3), то такое множество называется метрическим пространством.

Итак, по определению 5.5 множество L_2 — метрическое пространство, которое называют также пространством Гильберта.

Поскольку в метрическом пространстве определено расстояние между элементами, то стандартным способом вводится определение предела последовательности.

Определение 5.6. Элемент $f \in L_2$ называется пределом последовательности $f_1, f_2, f_3, \dots$ элементов L_2 , если

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists N, \quad \forall n > N: \|f_n - f\| < \varepsilon.$$

Это значит, что

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = f \iff \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E |f_n(x) - f(x)|^2 dx = 0.$$

Такая сходимость называется сходимостью в среднем.

Определение 5.7. Последовательность $\{f_n\} \subset L_2$ называется сходящейся в себе, или фундаментальной, если

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists N \quad \forall m > N, \quad \forall n > N: \|f_n - f_m\| < \varepsilon.$$

Если последовательность имеет предел, то она сходится в себе. Действительно, для заданного $\varepsilon > 0$ существует такой номер N , что $\forall n > N: \|f_n - f\| < \frac{\varepsilon}{2}$, поэтому

$$\forall k > N, \quad \forall m > N: \|f_k - f_m\| \leq \|f_k - f\| + \|f_m - f\| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon.$$

Обратное утверждение неверно, т. е. фундаментальная последовательность может не иметь предела. Например, последователь-

ность приближенных значений $\sqrt{2}$ — фундаментальная последовательность рациональных чисел $1, 1.4, 1.41, \dots$ не имеет предела на множестве рациональных чисел; см. также задачу 10.114.

Определение 5.8. Если любая фундаментальная последовательность элементов некоторого пространства имеет предел, то такое пространство называется полным.

Свойство 5.2. Пространство L_2 является полным пространством (см. [61], гл. VII, § 2).

Определение 5.9. Последовательность $\{f_n\} \subset L_2$ называется слабо сходящейся к функции $f(x) \in L_2$, если для любой $g(x) \in L_2$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (f_n, g) = (f, g).$$

Свойство 5.3. Если последовательность сходится в среднем, то она сходится слабо (см. задачу 10.115).

Определение 5.10. Множество $A \subset L_2$ называется всюду плотным в L_2 , если любой элемент L_2 является пределом последовательности элементов множества A .

Свойство 5.4. Множество A измеримых ограниченных функций всюду плотно в L_2 .

Доказательство. Определение 5.10 имеет эквивалентную формулировку: для того чтобы множество $A(g)$ было всюду плотным в L_2 , необходимо и достаточно, чтобы

$$\forall f \in L_2, \forall \varepsilon > 0 \exists g \in A: \|f - g\| < \varepsilon.$$

Поскольку

$$\begin{aligned} \|f\|^2 &= \|u + iv\|^2 = (u + iv, u + iv) = \\ &= \|u\|^2 + i(u, v) - i(v, u) + \|v\|^2 = \|u\|^2 + \|v\|^2, \end{aligned}$$

то свойство 5.4 достаточно доказать для вещественнозначной функции $f(x) \in L_2$.

Согласно свойству 4.3

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0: \Delta E \subset E, \mu(\Delta E) < \delta \implies \int_{\Delta E} |f(x)|^2 dx < \varepsilon.$$

На основании свойства 2.9 для данного δ можно найти такую ограниченную измеримую функцию $g(x)$, что $\mu(E(f \neq g)) < \delta$

при этом $g(x) = 0$ на множестве $E(f \neq g)$. Из установленных неравенств вытекает оценка

$$\|f - g\|^2 = \int_E |f - g|^2 dx = \int_{E(f \neq g)} |f - g|^2 dx = \int_{E(f \neq g)} |f|^2 dx < \varepsilon^2.$$

Определение 5.11. Система вещественнозначных функций $\{\omega_i(x)\}$, $i = 1, 2, 3, \dots$, заданных на множестве $E = [a; b]$, называется ортонормальной, если любые две функции системы взаимно ортогональны, а норма каждой функции равна единице:

$$(\omega_i, \omega_j) = \delta_{ij} \text{ (символ Кронекера), } \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$$

Определение 5.12. Рядом Фурье функции $f(x) \in L_2$ по функциям $\varphi_k(x)$ называется ряд

$$\sum_{k=1}^{\infty} c_k \omega_k(x), \quad c_k = (f, \omega_k) = \int_E f(x) \omega_k(x) dx,$$

комплексные числа c_k называются коэффициентами Фурье функции $f(x)$. Для исследования сходимости ряда Фурье следует вычислить расстояние (в метрике L_2) между $f(x)$ и частичной суммой $S_n(x) = \sum_{k=1}^n c_k \omega_k(x)$ ряда Фурье. По определению

$$\begin{aligned} r^2(f, S_n) &= \|f - S_n\|^2 = (f - S_n, f - S_n) = \\ &= \|f\|^2 - (S_n, f) - (f, S_n) + \|S_n\|^2, \\ (S_n, f) &= \sum_{k=1}^n c_k (\omega_k, f) = \sum_{k=1}^n c_k \overline{(f, \omega_k)} = \sum_{k=1}^n |c_k|^2, \\ (f, S_n) &= \overline{(S_n, f)}, \\ \|S_n\|^2 &= \sum_{k,m=1}^n \bar{c}_k c_m (\omega_k, \omega_m) = \sum_{k,m=1}^n \bar{c}_k c_m \delta_{k,m} = \sum_{k=1}^n |c_k|^2. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$0 \leq \|f - S_n\|^2 = \|f\|^2 - \sum_{k=1}^n |c_k|^2.$$

Полученное соотношение называется тождеством Бесселя. Отсюда следует неравенство Бесселя

$$\sum_{k=1}^n |c_k|^2 \leq \|f\|^2 \implies \sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^2 \leq \|f\|^2.$$

Если

$$\sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^2 = \|f\|^2,$$

то это равенство называется формулой замкнутости или равенством Парсеваля. Тождество Бесселя принимает вид

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|f - S_n\| = 0,$$

т. е. последовательность частичных сумм ряда Фурье сходится в среднем к $f(x)$.

Определение 5.13. Ортонормальная система $\{\omega_k(x)\}$ называется замкнутой, если формула замкнутости имеет место для любой функции $f(x) \in L_2$.

Свойство 5.5 (теорема В. А. Стеклова–К. Северини). Если формула замкнутости имеет место для любой функции множества A , всюду плотного в L_2 , то система $\{\omega_k(x)\}$ замкнута.

Доказательство. Пусть $f(x) \in L_2$, $g(x) \in A$, $S_n(f)$ и $S_n(g)$ — частичные суммы рядов Фурье этих функций. Требуется доказать, что $\|f - S_n(f)\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$. Основой доказательства является неравенство

$$\|f - S_n(f)\| \leq \|f - g\| + \|g - S_n(g)\| + \|S_n(g) - S_n(f)\|.$$

Так как множество A всюду плотно в L_2 , то

$$\exists g \in A: \|f - g\| < \frac{\varepsilon}{3}.$$

Поскольку для $g(x)$ имеет место формула замкнутости, то

$$\exists N \forall n > N: \|g - S_n(g)\| < \frac{\varepsilon}{3}.$$

На основании неравенства Бесселя получается оценка

$$\|S_n(g) - S_n(f)\| = \|S_n(g - f)\| \leq \|f - g\|.$$

Таким образом, $\|f - g\| < \varepsilon$.

Свойство 5.6 (теорема Риса–Фишера). Пусть на множестве $E = [a; b]$ задана ортонормальная система $\{\omega_k(x)\}$ и заданы ком-

плексные числа $c_1, c_2, c_3, \dots$, такие что сходится ряд $\sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^2$. Тогда существует такая функция $f(x) \in L_2(E)$, что

$$c_k = (f, \omega_k) \text{ и } \sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^2 = \|f\|^2.$$

Доказательство. Последовательность $f_n = \sum_{k=1}^n c_k \omega_k$ является фундаментальной:

$$\|f_m - f_n\|^2 = \|f_{n+p} - f_n\|^2 = \left\| \sum_{k=n+1}^{n+p} c_k \omega_k \right\|^2 = \sum_{k=n+1}^{n+p} |c_k|^2 \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0,$$

поскольку ряд $\sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^2$ сходится. Так как L_2 — полное пространство, то $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = f \in L_2$.

Коэффициент Фурье функции f можно представить в виде

$$(f, \omega_k) = (f_n, \omega_k) + (f - f_n, \omega_k).$$

При $k \leq n$ первое слагаемое справа равно c_n , а абсолютная величина второго слагаемого

$$|(f - f_n, \omega_k)| \leq \|f - f_n\| \|\omega_k\| = \|f - f_n\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

Следовательно, $(f, \omega_k) = c_k$, так что функция $f(x)$ определена. Остается установить формулу замкнутости:

$$\|f - S_n\|^2 = \|f\|^2 - \sum_{k=1}^n |c_k|^2 \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \implies \|f\|^2 = \sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^2.$$

Определение 5.14. Система функций $\{\omega_k(x)\}$, $x \in E = [a; b]$, принадлежащих $L_2(E)$, называется полной, если в $L_2(E)$ нет отличной от нуля функции, ортогональной ко всем функциям $\omega_k(x)$ (условие взаимной ортогональности $\omega_k(x)$ не ставится).

Свойство 5.7. Для ортонормальных систем понятия замкнутости и полноты совпадают.

Доказательство. Если система замкнута и функция $f(x)$ ортогональна ко всем функциям системы, т.е. $c_k = (f, \omega_k) = 0$, то $\|f\|^2 = \sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^2 = 0$, следовательно, система полна.

Если система $\{\omega_k(x)\}$ полна, но не замкнута, то найдется такая функция $g(x) \in L_2$, что $\sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^2 < \|g\|^2$. Согласно свойству 5.4, существует такая функция $f(x) \in L_2$, что

$$(f, \omega_k) = c_k, \quad \|f\|^2 = \sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^2.$$

Тогда $(f - g, \omega_k) = (f, \omega_k) - (g, \omega_k) = c_k - c_k = 0$. Это значит, что функция $h = f - g$ ортогональна всем функциям ω_k и в силу полноты системы равна нулю. Таким образом, $f = g$, что противоречит неравенству $\|f\| < \|g\|$.

Отсюда следует полнота тригонометрической системы (см. задачу 10.122).

10.101. Установить линейность множества L_2 .

10.102. Доказать неравенство Коши–Буняковского.

10.103. Доказать неравенство Минковского

$$\sqrt{\int_E |f(x) + g(x)|^2 dx} \leq \sqrt{\int_E |f(x)|^2 dx} + \sqrt{\int_E |g(x)|^2 dx}.$$

10.104. Между элементами x, y произвольного множества введено расстояние

$$r(x, y) = \begin{cases} 0, & x = y, \\ 1, & x \neq y. \end{cases}$$

Доказать, что такое множество становится метрическим пространством.

10.105. На множестве $C[a; b]$ непрерывных функций, определенных на отрезке $[a; b]$, вводится расстояние

$$r(f, g) = \max_{a \leq x \leq b} |f(x) - g(x)|.$$

Доказать, что тем самым множество становится метрическим пространством.

10.106. На множестве $C[a; b]$ непрерывных функций, определенных на отрезке $[a; b]$, вводится расстояние

$$r(f, g) = \left(\int_a^b (f(x) - g(x))^2 dx \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Доказать, что это множество становится метрическим пространством, которое обозначается $C^2[a; b]$.

10.107. Доказать единственность предела последовательности, сходящейся в среднем.

10.108. Доказать, что $\|f\|$ как функция f непрерывна.

10.109. Дана последовательность

$$f_n(x) = \begin{cases} \sqrt{n}, & 0 < x < \frac{1}{n}, \\ 0 & \frac{1}{n} \leq x \leq 1. \end{cases}$$

- 1) Доказать что при любом фиксированном $x \in [0; 1]$ последовательность $f_n(x)$ сходится к нулю (поточечная сходимость).
- 2) Сходится ли к нулю эта последовательность в среднем?

10.110. Дана последовательность

$$f_n(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{n}}, & 0 < x < \frac{1}{n}, \\ 0 & \frac{1}{n} \leq x \leq 1. \end{cases}$$

- 1) Доказать что при любом фиксированном $x \in [0; 1]$ последовательность $f_n(x)$ сходится к нулю (поточечная сходимость).
- 2) Сходится ли к нулю эта последовательность в среднем?

10.111. При каждом натуральном k на промежутке $[0; 1]$ определены k функций

$$f_1^{(k)}, f_2^{(k)}, f_3^{(k)}, \dots, f_k^{(k)},$$

следующим образом:

$$f_i^{(k)}(x) = \begin{cases} 1, & x \in \left[\frac{i-1}{k}, \frac{i}{k}\right), \\ 0, & x \notin \left[\frac{i-1}{k}, \frac{i}{k}\right). \end{cases}$$

Все функции, занумерованные подряд, образуют последовательность

$$\begin{aligned} \varphi_1(x) &= f_1^{(1)}(x), & \varphi_2(x) &= f_1^{(2)}(x), \\ \varphi_3(x) &= f_2^{(2)}(x), & \varphi_4(x) &= f_1^{(3)}(x), \dots \end{aligned}$$

1) Доказать, что последовательность функций φ_n : 1) сходится в среднем к нулю; 2) не сходится (поточечно) ни в одной точке промежутка $[0; 1]$.

10.112. В задаче 10.104 определено метрическое пространство. Является ли это пространство полным?

10.113. Будет ли полным пространство из задачи 10.104?

10.114. Доказать, что метрическое пространство $C^2[-1; 1]$, определенное в задаче 10.105, неполное.

10.115. Доказать, что из сходимости в среднем следует слабая сходимость.

10.116. Доказать, что множество функций, непрерывных на $E = [a; b]$, всюду плотно в $L_2(E)$.

10.117. Доказать, что множество многочленов $P(x)$, $x \in E = [a; b]$, всюду плотно в $L_2(E)$.

10.118. Доказать, что множество тригонометрических многочленов $T(x) = \sum_{k=1}^n a_k \cos kx + b_k \sin kx$, $x \in E = [-\pi; \pi]$, всюду плотно в $L_2(E)$.

10.119. Доказать обобщенную формулу замкнутости

$$\forall f \in L_2, \forall g \in L_2: (f, g) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \bar{b}_k, \quad a_k = (f, \omega_k), b_k = (g, \omega_k).$$

10.120. Доказать, что при условии замкнутости системы $\{\omega_k(x)\}$ ряд Фурье функции $f(x) \in L_2$ можно почленно интегрировать по любому измеримому множеству $\Delta E \subset E = [a; b]$:

$$\int_{\Delta E} f(x) dx = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \int_{\Delta E} \omega_k(x) dx, \quad c_k = (f, \omega_k).$$

10.121. Доказать, что если формула замкнутости имеет место для любой функции $1, x, x^2, \dots, x^m, \dots$, то система $\{\omega_k(x)\}$ замкнута.

10.122. Доказать, что тригонометрическая система

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \frac{\sin x}{\sqrt{\pi}}, \frac{\cos x}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin 2x}{\sqrt{\pi}}, \frac{\cos 2x}{\sqrt{\pi}}, \dots,$$

определенная на отрезке $[-\pi; \pi]$, замкнута (в L_2).

10.123. Доказать, что система многочленов Лежандра $P_n(x) = \frac{(-1)^n}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (1 - x^2)^n$, $x \in [-1; 1]$, замкнута (в L_2).

10.124. Доказать, что система функций $1, x, x^2, \dots, x^n, \dots, x \in E = [-1; 1]$ полна (в L_2).

10.2. Обобщенные функции в $\mathbb{R}^n$

Пример 10.6. Пусть $\varphi(x)$ — кусочно-непрерывная функция точки $x \in \mathbb{R}^n$. Замыкание множества $X_\varphi = \{x: \varphi(x) \neq 0\}$ называется носителем функции $\varphi(x)$: $\text{supp } \varphi = \overline{X_\varphi}$. Если носитель функции $\varphi(x)$ есть ограниченное множество, т.е. существует такое $r > 0$, что $\text{supp } \varphi \subset B_r = \{x: |x| < r\}$, то $\varphi(x)$ называется финитной функцией. Функция

$$\omega_\varepsilon(x) = \begin{cases} C_\varepsilon e^{-\frac{\varepsilon^2}{\varepsilon^2 - |x|^2}}, & |x| < \varepsilon, \\ 0, & |x| \geq \varepsilon, \end{cases} \quad (10.1)$$

где $\int_{\mathbb{R}^n} \omega_\varepsilon dx = 1$, финитна, так как отлична от нуля в шаре B_ε , следовательно, ее носитель $\text{supp } \omega_\varepsilon = \overline{B_\varepsilon}$ — ограниченное множество.

В дальнейших выкладках используются следующие обозначения: $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ — вектор с целочисленными неотрицательными компонентами, $x^\alpha = x_1^{\alpha_1} \cdot x_2^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot x_n^{\alpha_n}$,

$$D^0 f(x) = f(x), \quad D^\alpha f(x) = \frac{\partial^{|\alpha|} f(x)}{\partial x_1^{\alpha_1} \dots \partial x_n^{\alpha_n}}$$

— производная порядка $|\alpha| = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n$.

Пространством основных функций $\mathcal{D} = \mathcal{D}(\mathbb{R}^n)$ называется линейное множество финитных функций $\varphi(x) \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$, в котором следующим образом определена сходимость функциональной последовательности:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \varphi_k(x) = \varphi(x) \iff \begin{cases} \exists r \ \forall k: \text{supp } \varphi_k \subset B_r, \\ \forall \alpha: D^\alpha \varphi_k(x) \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{\mathbb{R}^n} D^\alpha \varphi(x), \end{cases}$$

где символ $\xrightarrow{E}$ означает равномерную сходимость последовательности функций на множестве E .

Функция $\omega_\varepsilon(x) \in \mathcal{D}$. Действительно, $\omega_\varepsilon(x)$ — финитна и для любого α

$$D^\alpha \omega_\varepsilon = \frac{P_{|\alpha|}(x)}{(|x|^2 - \varepsilon^2)^{2\alpha}} e^{-\frac{\varepsilon^2}{\varepsilon^2 - |x|^2}}, \quad |x| < \varepsilon,$$

где $P_{|\alpha|}(x)$ — многочлен (это доказывается методом математической индукции). Так как $D^\alpha \omega_\varepsilon \rightarrow 0$ при $|x| \rightarrow \varepsilon$, то $D^\alpha \omega_\varepsilon \in C(\mathbb{R}^n)$, поэтому $\omega_\varepsilon(x) \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$.

Последовательность $\varphi_k(x) = \frac{1}{k} \omega_\varepsilon(x)$, $k \in \mathbb{N}$, сходится, и ее предел равен нулю. В самом деле,

$$\forall k: \quad \text{supp } \varphi_k = \text{supp } \omega_\varepsilon \subset \overline{B}_\varepsilon,$$

$$\forall \alpha: \quad |D^\alpha \varphi_k| = \frac{1}{k} |D^\alpha \omega_\varepsilon| \leq \frac{M(\alpha)}{k} \rightarrow 0, \quad k \rightarrow \infty.$$

10.125. Найти носители следующих функций, определенных в $\mathbb{R}$:

$$1) \eta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ 1, & x > 0; \end{cases} \quad 2) \text{sign } x; \quad 3) [x] \eta(a - |x|), \quad a > 0,$$

$[x]$ — целая часть x .

10.126. Определить носитель функции $\varphi(x) = \prod_{j=1}^n \omega_{\varepsilon_j}(x_j)$.

10.127. Пусть $\varphi(x) \in \mathcal{D}$. Какой должна быть функция $h(x)$, чтобы произведение $h\varphi \in \mathcal{D}$?

10.128. Показать, что функция

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq \frac{1}{2}, \\ \frac{1}{2} \left(1 + \text{th} \frac{x - \frac{3}{4}}{\left(x - \frac{1}{2}\right)(x - 1)} \right), & \frac{1}{2} < x < 1, \\ 0, & 1 \leq x, \end{cases}$$

является элементом $\mathcal{D}$.

10.129. Доказать, что функции:

$$1) \psi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \omega_\varepsilon(x - \xi) d\xi, \quad \text{supp } \varphi = [a, b];$$

$$2) \psi(x) = \int_{a + \frac{3}{4}\varepsilon}^{b - \frac{3}{4}\varepsilon} \omega_{\varepsilon/4}(x - \xi) d\xi, \quad \varepsilon < \frac{b - a}{2},$$

где $-\infty < a < b < \infty$ принадлежат пространству $\mathcal{D}$.

10.130. Функция

$$\varphi_S(r) = \frac{1}{|S_r|} \int_{S_r} \varphi(\xi) d\xi, \quad \varphi(x) \in \mathcal{D}, \quad (10.2)$$

где S_r — сфера радиуса r , $|S_r|$ — ее площадь, называется сферическим средним функции φ . Показать, что $\varphi_S(r) \in \mathcal{D}$.

10.131. Установить, сходятся ли в $\mathcal{D}$ последовательности функций:

$$1) \frac{1}{k} \omega_\varepsilon(kx); \quad 2) \frac{1}{k} \omega_\varepsilon\left(\frac{x}{k}\right), \quad k \rightarrow \infty.$$

10.132. Известно, что $\lim_{k \rightarrow \infty} \varphi_k(x) = \varphi(x)$ в $\mathcal{D}$. Сходятся ли последовательности:

- 1) $h(x) \varphi_k(x)$, $h(x) \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$;
- 2) $\varphi_k(Ax + b)$, $k \in \mathbb{N}$; A — невырожденная матрица $(n \times n)$,
 b — фиксированный вектор в $\mathbb{R}^n$?

10.133. Пусть $\{\Delta s_i\}_1^k$ — какое-либо разбиение сферы S_r , $\mathcal{U}_i$ — оператор поворота относительно центра сферы, преобразующий точку $x_1 \in \Delta s_1$ в $x_i \in \Delta s_i$. Доказать, что последовательность

$$\psi_k(x) = \frac{1}{|S_r|} \sum_{i=1}^k \varphi(\mathcal{U}_i x) |\Delta s_i|, \quad \varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^n), \quad (10.3)$$

сходится к сферическому среднему (10.2) функции φ .

10.134. Функция

$$\chi(x) = \begin{cases} 1, & x \in \Omega, \\ 0, & x \notin \Omega, \end{cases}$$

называется характеристической функцией области Ω . Пусть ограниченная область $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ и Ω_ε таковы, что $\Omega \subset \Omega_\varepsilon$ и расстояние между их границами $\rho(\partial\Omega, \partial\Omega_\varepsilon) = \varepsilon$, где $\varepsilon > 0$ — любое число. Доказать, что функция

$$\varkappa(x) = \int \chi(y) \omega_\varepsilon(x - y) dy,$$

где $\chi(x)$ — характеристическая функция области Ω_ε , принадлежит пространству $\mathcal{D}$, $\text{supp } \varkappa = \overline{\Omega}_\varepsilon$, $\forall x \in \mathbb{R}^n: 0 \leq \varkappa \leq 1$, $\forall x \in \Omega: \varkappa(x) = 1$.

10.135. Функция $\varkappa(x)$, определенная в задаче 10.134, соответствует области $\Omega = B_1 = \{x: |x| < 1\}$, $x \in \mathbb{R}^n$. Показать, что функциональная последовательность $\varphi_k(x) = \varkappa(\frac{x}{r})$, $k = 1, 2, \dots$, сходится в $\mathcal{D}$ и ее предел равен 1.

10.136. Доказать, что пространство $\mathcal{D}$ является полным.

Пример 10.7. Пусть на пространстве $\mathcal{D}$ задан функционал f , т. е. правило, по которому каждой функции $\varphi \in \mathcal{D}$ ставится в соответствие число (f, φ) . Функционал f называется линейным, если

$$(f, \mu_1 \varphi_1 + \mu_2 \varphi_2) = \mu_1 (f, \varphi_1) + \mu_2 (f, \varphi_2),$$

где μ_1 и μ_2 — комплексные числа. Функционал f называется непрерывным, если

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \varphi_k(x) = \varphi(x) \implies \lim_{k \rightarrow \infty} (f, \varphi_k) = (f, \varphi).$$

Всякий линейный непрерывный функционал на пространстве $\mathcal{D}$ называется обобщенной функцией. Если $f(x)$ — локально интегрируемая в $\mathbb{R}^n$ функция, т. е. для любого измеримого множества $E \subset \mathbb{R}^n$ функция $f(x) \in L_1(E)$, то функционал

$$(f, \varphi) = \int_{\mathbb{R}^n} f(x) \varphi(x) dx \quad (10.4)$$

представляет собой обобщенную функцию. Действительно, сходимость интеграла вытекает из оценки

$$\left| \int_{\mathbb{R}^n} f \varphi dx \right| \leq \max_{\mathbb{R}^n} |\varphi| \int_{\text{supp } \varphi} |f| dx < \infty,$$

линейность функционала следует из линейности интеграла, а непрерывность — из теоремы Лебега о переходе к пределу под знаком интеграла, т. е.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (f, \varphi_k) = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^n} f \varphi_k dx = \int_{\mathbb{R}^n} f \lim_{k \rightarrow \infty} \varphi_k dx = (f, \varphi).$$

Функционал (10.4), порожденный локально интегрируемой функцией, определяет регулярную обобщенную функцию. В отличие от регулярных все остальные обобщенные функции называются сингулярными. Функционал

$$(\delta, \varphi) = \varphi(0), \quad \varphi \in \mathcal{D}, \quad (10.5)$$

является сингулярной обобщенной функцией (задача 10.139).

Между локально интегрируемыми и регулярными обобщенными функциями имеется взаимно однозначное соответствие (две локально интегрируемые функции считаются равными с точностью до значений на множестве меры нуль), поэтому между ними не делают различия (это две формы задания одной и той же функциональной зависимости). В связи с этим для обозначения регулярных обобщенных функций наряду с f употребляют также символ $f(x)$, а значение функционала записывают в виде $(f(x), \varphi(x))$. Эту символику распространяют на все обобщенные функции. Так, функционал δ (δ -функция) и его значения обозначают через $\delta(x)$ и $(\delta(x), \varphi(x))$ соответственно. Для $\delta(x)$ употребляют также интегральную форму записи

$$\int_{\mathbb{R}^n} \delta(x) \varphi(x) dx = \varphi(0).$$

10.137. Построить регулярные обобщенные функции, соответствующие локально интегрируемым в $\mathbb{R}$ функциям $f(x)$:

$$1) f(x) = 1; \quad 2) f(x) = \eta(x); \quad 3) f(x) = \begin{cases} \sin x, & x \in (0, \pi), \\ 0, & x \notin (0, \pi). \end{cases}$$

10.138. Функция $f(x)$ локально интегрируема на $\mathbb{R}$, а $\varphi(x, y) \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^2)$; доказать, что

$$\int_a^b dx \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \varphi(x, y) dy = \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_a^b f(x) \varphi(x, y).$$

10.139. Показать, что δ -функция (10.5) является сингулярной обобщенной функцией.

10.140. Доказать, что функционал

$$\left(\mathcal{P} \frac{1}{x}, \varphi \right) = V.p. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varphi(x)}{x} dx = \lim_{\varepsilon \rightarrow +0} \left(\int_{-\infty}^{-\varepsilon} + \int_{\varepsilon}^{\infty} \right) \frac{\varphi(x)}{x} dx, \quad (10.6)$$

где $\varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R})$, представляет собой сингулярную обобщенную функцию.

10.141. Не имеет смысла говорить о значении обобщенной функции $f(x)$ в точке x , так как аргументом функционала служит функция $\varphi(x)$. Однако можно ввести следующее определение: обобщенная функция $f(x) = 0$ в области $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, если $(f, \varphi) = 0$

для любой $\varphi \in \mathcal{D}$, носитель которой принадлежит Ω . Пусть x_f — точка, ни в какой окрестности которой $f(x)$ не равна нулю. Множество точек x_f называется носителем обобщенной функции и обозначается $\text{supp } f$. Определить носители обобщенных функций: 1) 2) 3) из задачи 10.137; 4) $\delta(x)$; 5) из задачи 10.140.

10.142. Результат действия функционала f на функцию φ не изменится, если изменить $\varphi(x)$ вне носителя f . Исходя из этого, можно продолжить функционал на более широкий класс функций. Линейный функционал $\tilde{f}$, определенный на множестве $\tilde{\mathcal{D}}$, называется продолжением функционала f , заданного на множестве $\mathcal{D}$, если $\mathcal{D} \subset \tilde{\mathcal{D}}$ и $(\tilde{f}, \varphi) = (f, \varphi)$ для любой функции $\varphi \in \mathcal{D}$. Показать, что δ -функцию можно продолжить на класс функций $\psi(x) \in C^m(\mathbb{R}^n)$ следующим образом:

$$(\tilde{\delta}, \psi) = \psi(0).$$

Пример 10.8. Действия с регулярными обобщенными функциями, основанные на свойствах интеграла, распространяются (по определению) на все обобщенные функции. Линейная комбинация обобщенных функций — это функционал, действующий по правилу

$$\forall \varphi \in \mathcal{D}: (\mu_1 f_1 + \mu_2 f_2, \varphi) = \mu_1 (f_1, \varphi) + \mu_2 (f_2, \varphi). \quad (10.7)$$

Отсюда следует (см. определение равенства нулю обобщенной функции в задаче 10.137), что обобщенные функции f_1 и f_2 равны, если

$$\forall \varphi \in \mathcal{D}: (f_1, \varphi) = (f_2, \varphi). \quad (10.8)$$

Произведение $h(x) \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$ и обобщенной функции f называется функционал

$$(hf, \varphi) = (f, h\varphi), \quad \varphi \in \mathcal{D}. \quad (10.9)$$

Если $f(x)$ — локально интегрируемая в $\mathbb{R}^n$ функция, а A — невырожденная матрица ($n \times n$), b — фиксированный вектор, то замена переменной осуществляется по формуле

$$\int_{\mathbb{R}^n} f(Ax + b) \varphi(x) dx = \frac{1}{|\det A|} \int_{\mathbb{R}^n} f(x) \varphi(A^{-1}(x - b)) dx.$$

Это равенство, записанное в форме

$$(f(Ax + b), \varphi(x)) = \left(f(x), \frac{\varphi(A^{-1}(x - b))}{|\det A|} \right), \quad (10.10)$$

определяет линейную замену в любой обобщенной функции.

10.143. Доказать, что функционал $\mu_1 f_1 + \mu_2 f_2$, действующий по правилу (10.7), является обобщенной функцией.

10.144. Пусть $\mathcal{A}$ — линейный непрерывный оператор, действующий из $\mathcal{D}$ в $\mathcal{D}$, т.е., если $\varphi \in \mathcal{D}$, то $\mathcal{A}\varphi \in \mathcal{D}$; показать, что функционал $\mathcal{A}^*f$, определенный правилом $(\mathcal{A}^*f, \varphi) = (f, \mathcal{A}\varphi)$, $\varphi \in \mathcal{D}$, — обобщенная функция.

10.145. Доказать, что функционалы hf и $f(Ax + b)$, определенные посредством (10.9) и (10.10), являются обобщенными функциями.

10.146. Получить формулу для $(\delta(x - x_0), \varphi(x))$, $\varphi(x) \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^n)$.

10.147. Если $h(x) \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$, то $h(x)\delta(x) = h(0)\delta(x)$. Доказать.

10.148. Установить следующие свойства функции $\delta(x)$, $x \in \mathbb{R}^n$:

$$1) \delta(ax) = |a|^{-n} \delta(x), \quad a \neq 0; \quad 2) \delta(-x) = \delta(x).$$

10.149. Доказать, что (см. (10.6))

$$x h(x) \mathcal{P} \frac{1}{x} = h(x), \quad h(x) \in C^\infty(\mathbb{R}).$$

10.150. Локально интегрируемая функция $f(x)$ называется сферически симметричной, если она инвариантна относительно преобразований поворота $\mathcal{U}$, т.е. $f(\mathcal{U}x) = f(x)$. Показать, что сферически симметричную обобщенную функцию естественно определить следующим образом:

$$\forall \varphi \in \mathcal{D}: (f(x), \varphi(\mathcal{U}x)) = (f(x), \varphi(x)). \quad (10.11)$$

10.151. Доказать, что $\delta(x)$ — сферически симметричная обобщенная функция.

10.152. Пусть $f(x)$ — сферически симметричная обобщенная функция, φ_r — сферическое среднее (10.2) функции $\varphi(x)$; доказать, что $(f, \varphi) = (f, \varphi_r)$, т.е. функционал f достаточно задать на сферически симметричных функциях пространства $\mathcal{D}$.

10.153. Функция $h(x) \in C^1(\mathbb{R})$ имеет лишь простые изолированные нули $x_1, x_2, \dots$; исходя из свойств регулярных обобщенных функций, построить следующее определение функционала $\delta(h(x))$:

$$\delta(h(x)) = \sum_n \frac{\delta(x - x_n)}{|h'(x_n)|}. \quad (10.12)$$

10.154. Доказать, что для $x \in \mathbb{R}$:

$$1) \delta(x^2 - a^2) = \frac{1}{2a}(\delta(x + a) + \delta(x - a));$$

$$2) \delta(\sin x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - \pi n).$$

10.155. Функция $g \in C^\infty(\mathbb{R})$ взаимно-однозначно отображает $\mathbb{R}$ на $\mathbb{R}$, $h \in C^\infty(\mathbb{R})$ — обратное отображение. Выразить $\delta(g(x))$ через $\delta(x)$.

Пример 10.9. Обобщенная функция f называется пределом последовательности $f_1, f_2, \dots$ обобщенных функций, если

$$\forall \varphi \in \mathcal{D}: \quad \lim_{k \rightarrow \infty} (f_k, \varphi) = (f, \varphi). \quad (10.13)$$

Множество $\mathcal{D}' = \mathcal{D}'(\mathbb{R}^n)$ обобщенных функций, обладающих свойством (10.7), является линейным. Линейное множество $\mathcal{D}'$, в котором введена сходимость последовательности по правилу (10.13), называется пространством обобщенных функций. Доказательство полноты пространства $\mathcal{D}'$ приведено в [15].

Последовательность

$$f_k(x) = \left(\frac{k}{\pi a}\right)^{\frac{n}{2}} e^{-\frac{kx^2}{a}}, \quad a > 0, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad k \rightarrow \infty,$$

сходится в $\mathcal{D}'$ к $\delta(x)$. Действительно, так как

$$\int_{\mathbb{R}^n} f_k(x) dx = 1,$$

то достаточно доказать, что

$$\forall \varphi \in \mathcal{D}: \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^n} f_k(x) (\varphi(x) - \varphi(0)) dx = 0.$$

Доказательство основано на вытекающей из формулы Лагранжа оценке $|\varphi(x) - \varphi(0)| \leq |(\nabla \varphi(\tilde{x}), x)| \leq M|x|$:

$$\begin{aligned} \left| \int_{\mathbb{R}^n} f_k(x) (\varphi(x) - \varphi(0)) dx \right| &\leq M \left(\frac{k}{\pi a}\right)^{\frac{n}{2}} \int_{\mathbb{R}^n} e^{-\frac{kx^2}{a}} |x| dx = \\ &= M \left(\frac{k}{\pi a}\right)^{\frac{n}{2}} |S_1| \int_0^\infty e^{-\frac{kr^2}{a}} r^n dr = \frac{M|S_1|}{2\pi^{\frac{n}{2}}} \Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right) \sqrt{\frac{a}{k}} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0. \end{aligned}$$

10.156. Доказать, что $f_k(x) \rightarrow \delta(x)$ в $\mathcal{D}'(\mathbb{R})$ при $k \rightarrow \infty$, где:

$$1) f_k(x) = \omega_{\frac{1}{k}}(x); \quad 2) f_k(x) = \frac{1 - \cos x}{\pi k x^2}.$$

10.157. Сходятся ли последовательности обобщенных функций:

$$1) \delta(kx); \quad 2) \delta(x - k); \quad 3) \delta\left(\frac{x}{k} - \alpha\right), \quad \alpha \neq 0 \text{ при } k \rightarrow \infty?$$

10.158. Масса $m = 1$ находится в точке $x = 0 \in \mathbb{R}^3$. Для определения плотности точечной массы ее равномерно распределяют в шаре $B_{\frac{1}{k}}$, $k \in \mathbb{N}$, так что плотность

$$\rho_k(x) = \begin{cases} \frac{3k^3}{4\pi}, & |x| < \frac{1}{k}, \\ 0, & |x| > \frac{1}{k}. \end{cases}$$

Показать, что: 1) поточечный предел $\rho(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} \rho_k(x)$ не определяет плотность точечной массы; 2) плотностью является предел последовательности $\rho_1, \rho_2, \dots$ в пространстве $\mathcal{D}'$, и этот предел есть δ -функция.

10.159. Вычислить $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\varepsilon}{x^2 + \varepsilon^2}$ в $\mathcal{D}'$.

10.160. Вычислить $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{x} \sin \frac{x}{\varepsilon}$ в $\mathcal{D}'$.

10.161. Функция $f(x)$ локально интегрируема на $\mathbb{R}$. Показать, что в $\mathcal{D}'$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\varepsilon} f\left(\frac{x}{\varepsilon}\right) = c\delta(x), \quad c = \int f(x) dx.$$

10.162. Существует ли в $\mathcal{D}'$ предел $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sin \frac{x}{\varepsilon}$?

10.163. Существует ли в $\mathcal{D}'$ предел $\lim_{k \rightarrow \infty} \mathcal{P} \frac{\cos kx}{x}$? (См. задачу 10.140).

10.164. Доказать, что последовательность $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ локально интегрируемых в $\mathbb{R}^n$ функций, равномерно сходящаяся на любом компакте (ограниченном замкнутом множестве) K к функции $f(x)$, сходится к $f(x)$ в $\mathcal{D}'(\mathbb{R}^n)$:

$$\forall K: f_n(x) \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{K} f(x) \implies \forall \varphi(x) \in \mathbb{D}: \lim_{n \rightarrow \infty} (f_n, \varphi) = (f, \varphi).$$

10.165. Доказать, что если $g(y) \in \mathcal{D}'(\mathbb{R}^m)$, $\varphi(x, y) \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^{n+m})$, то функция $(g(y), \varphi(x, y)) \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^n)$.

10.166. Если $f(x)$ и $g(y)$ — локально интегрируемые функции в $\mathbb{R}^n$ и $\mathbb{R}^m$ соответственно, то по теореме Фубини

$$\int_{\mathbb{R}^{n+m}} f(x) g(y) \varphi(x, y) dx dy = \int_{\mathbb{R}^n} f(x) dx \int_{\mathbb{R}^m} g(y) \varphi(x, y) dy.$$

Это равенство, записанное в виде

$$(f(x) \cdot g(y), \varphi(x, y)) = (f(x), (g(y), \varphi(x, y))), \quad \varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^{n+m}),$$

служит определением прямого произведения $f(x) \cdot g(y)$ обобщенных функций $f(x) \in \mathcal{D}'(\mathbb{R}^n)$ и $g(y) \in \mathcal{D}'(\mathbb{R}^m)$. Доказать, что:

- 1) прямое произведение ассоциативно;
- 2) $\delta(x) \cdot f(y) = f(y) \cdot \delta(x)$ (доказательство коммутативности прямого произведения в общем случае см. в [15], § 11);
- 3) $h(x)(f(x) \cdot g(y)) = h(x)f(x) \cdot g(y)$, $h(x) \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$;
- 4) $(f \cdot g)(x - x_0, y) = f(x - x_0) \cdot g(y)$;
- 5) $\delta(x_1, x_2, \dots, x_n) = \delta(x_1) \cdot \delta(x_2) \cdot \dots \cdot \delta(x_n)$.

10.167. Записать пространственную плотность заряда q_0 , расположенного в точке: 1) $(x_0; y_0) \in \mathbb{R}^2$; 2) $(x_0; y_0; z_0) \in \mathbb{R}^3$.

10.168. Записать пространственную плотность заряда, расположенного на прямой: 1) $\{x, y: -\infty < x < \infty, y = y_0\}$ с плотностью $q(x)$; 2) $\{x, y, z: x = 0, -\infty < y < \infty, z = z_0\}$ с плотностью $q(y)$.

10.169. Доказать, что в $\mathcal{D}'(\mathbb{R}^2(x, y))$:

- 1) $((\delta(x) \cdot f(y)), \varphi(x, y)) = (f(y), \varphi(0, y))$;
- 2) $(h(x, y)(\delta(x) \cdot f(y)), \varphi(x, y)) = (f(y), h(0, y)\varphi(0, y))$, $h \in C^\infty$.

10.170. Доказать, что в $\mathcal{D}'(\mathbb{R}^2(x, y))$:

- 1) $h(x)(\delta(x) \cdot f(y)) = h(0)\delta(x) \cdot f(y)$, $h \in C^\infty$;
- 2) $h(x, y)(\delta(x) \cdot \delta(y)) = h(0, 0)(\delta(x) \cdot \delta(y))$, $h \in C^\infty$.

10.171. Сверткой функций $f(x)$ и $g(x)$ называется функция

$$(f * g)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} f(y) g(x - y) dy.$$

Пусть $f(x)$, $g(x)$, $\int_{\mathbb{R}^n} |f(y) g(x - y)| dy$ — локально интегрируемые в $\mathbb{R}^n$ функции. Доказать, что: 1) свертка $f * g$ существует; 2) $f * g$ — локально интегрируемая в $\mathbb{R}^n$ функция; 3) $f * g = g * f$.

10.172. Пусть свертка $(f * g)(x)$ — локально интегрируемая в $\mathbb{R}^n$ функция. Доказать, что она определяет регулярную обобщенную функцию

$$(f * g, \varphi) = (f(x) \cdot g(y), \varphi(x + y)), \quad \varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^n),$$

при условии существования функционала в правой части (в общем случае $\varphi(x + y)$ не является финитной).

10.173. Доказать, что

$$\forall \varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^n), \quad \forall f \in \mathcal{D}'(\mathbb{R}^n): h(y) = (f(x), \varphi(x + y)) \in C^\infty(\mathbb{R}^n).$$

10.174. Вычислить свертку $f_1 * f_2$, где

- 1) $f_1(x) = \frac{a}{\pi(x^2 + a^2)}, \quad f_2(x) = \frac{b}{\pi(x^2 + b^2)}, \quad a > 0, \quad b > 0;$
- 2) $f_1(x) = e^{-\alpha x^2}, \quad f_2(x) = e^{-\beta x^2}, \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0;$
- 3) $f_1(x) = f_2(x) = e^{-\alpha|x|}, \quad \alpha > 0.$

10.175. Вычислить свертку $\eta(x)e^{-\alpha x} * f$, где

- 1) $f(x) = e^{-\alpha|x|}; \quad f(x) = \sin \beta x.$

10.176. Функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$ — локально интегрируемы на $\mathbb{R}$; показать, что

$$\eta(x)f_1(x) * \eta(x)f_2(x) = \eta(x) \int_0^x f_1(y)f_2(x - y)dy.$$

10.177. Функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$ — локально интегрируемы на $\mathbb{R}$; показать, что

$$\eta(x)f_1(x)e^{ax} * \eta(x)f_2(x)e^{ax} = e^{ax}(\eta(x)f_1(x) * \eta(x)f_2(x)).$$

10.178. Функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$ — локально интегрируемы на $\mathbb{R}$; доказать коммутативность свертки:

$$\eta(x)f_1(x) * \eta(x)f_2(x) = \eta(x)f_2(x) * \eta(x)f_1(x).$$

10.179. Функции $f_1(x), f_2(x), f_3(x)$ — локально интегрируемы на $\mathbb{R}$; доказать ассоциативность свертки:

$$\begin{aligned} (\eta(x)f_1(x) * \eta(x)f_2(x)) * \eta(x)f_3(x) = \\ = \eta(x)f_1(x) * (\eta(x)f_2(x) * \eta(x)f_3(x)). \end{aligned}$$

10.180. Чему равны свертки:

- 1) $\eta(x)\alpha x^{\alpha-1} * \eta(x)$, $\alpha > 0$; 2) $\eta(x)x * \eta(x) \cos \alpha x$;
 3) $\eta(x)x^2 * \eta(x) \cos \alpha x$; 4) $\eta(x)x \operatorname{sh} \alpha x * \eta(x)e^{-\beta x}$, $\beta > 0$?

10.181. Вычислить свертки $\eta(x)f_1(x) * \eta(x)f_2(x)$, где

- 1) $f_1 = \sin \alpha x$, $f_2 = \sin \beta x$; 2) $f_1 = \sin \alpha x$, $f_2 = \cos \beta x$;
 3) $f_1 = \cos \alpha x$, $f_2 = \operatorname{sh} \beta x$; 4) $f_1 = \operatorname{ch} \alpha x$, $f_2 = \operatorname{ch} \beta x$.

10.182. Найти значения свертки:

- 1) $\eta(x) \sin x * \eta(x) J_0(x)$; 2) $\eta(x) \cos x * \eta(x) J_0(x)$;
 3) $\eta(x) \operatorname{sh} x * \eta(x) I_1(x)$; 4) $\eta(x) J_0(x) * \eta(x) x J_0(x)$;
 5) $\eta(x) J_1(x) * \eta(x) J_1(x)$; 6) $\eta(x) \cos x * \eta(x) J_0(x)$.

10.183. Чему равны свертки:

- 1) $\eta(x) * \frac{\alpha}{2x\sqrt{\pi x}} e^{-\frac{\alpha^2}{4x}}$; 2) $\eta(x) * \frac{1}{\sqrt{\pi x}} e^{-\alpha x}$;
 3) $\eta(x) * \frac{1}{\sqrt{\pi x}} e^{-\frac{\alpha^2}{4x}}$; 4) $\eta(x)\sqrt{x} * \frac{1}{\sqrt{\pi x}} e^{-\frac{\alpha^2}{4x}}$?

10.184. Вычислить свертку $\eta(x)x^\alpha * \eta(x)x^\beta$.

10.185. Найти значение свертки $\eta(x)e^{\alpha x} * \eta(x)e^{\alpha x}$.

10.186. Дана функция $f_\lambda(x) = \frac{x^{\lambda-1}}{\Gamma(\lambda)} e^{-ax}$, где $\operatorname{Re} \lambda > 0$, $a > 0$; вычислить свертку $f_\alpha(x) * f_\beta(x)$.

10.187. Пусть последовательность $\psi_k(x, y) \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^{2n})$, $k = 1, 2, \dots$, сходится в $\mathcal{D}(\mathbb{R}^{2n})$ к 1; функции $f(x), g(x)$ из $\mathcal{D}'(\mathbb{R}^n)$ таковы, что для любой последовательности ψ_k и любой $\varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^n)$ числовая последовательность

$$(f(x) \cdot g(y), \psi_k(x, y)\varphi(x+y)) \longrightarrow (f(x) \cdot g(y), \varphi(x+y)), \quad k \rightarrow \infty.$$

Сверткой $f * g$ называется функционал

$$\begin{aligned} (f * g, \varphi) &= (f(x) \cdot g(y), \varphi(x+y)) = \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} (f(x) \cdot g(y), \psi_k(x, y)\varphi(x+y)). \end{aligned}$$

Доказать, что свертка $f * \delta$ существует и коммутативна: $f * \delta = \delta * f = f$ (доказательство коммутативности свертки в общем

случае дано в [15], § 11). Равенство $f * \delta = f$, записанное в интегральной форме

$$\int_{\mathbb{R}^n} f(x-y) \delta(y) dy = f(x),$$

имеет следующую физическую трактовку: источник $f(x)$ есть суперпозиция точечных источников $f(x-y) \delta(y)$.

10.188. Вычислить свертки: 1) $\delta(x-a) * f(x)$; 2) $\delta(x-a) * \delta(x-b)$ в $\mathcal{D}'(\mathbb{R})$.

10.189. Вычислить свертку $\delta(x^2 - a^2) * f(x)$, где $f(x)$ равна: 1) $\sin \alpha x$; 2) $\cos \alpha x$; 3) $e^{-\alpha x}$.

10.190. Свертка ассоциативна (см. [15], §11):

$$f * (g * h) = (f * g) * h.$$

Доказать это свойство в частном случае:

$$\delta * (h(x)f * \eta(x)g) = (\delta * \eta(x)f) * \eta(x)g.$$

Пример 10.10. Если $f(x) \in C^m(\mathbb{R}^n)$, $\varphi(x) \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^n)$, то посредством интегрирования по частям получается равенство

$$\int_{\mathbb{R}^n} D^\alpha f(x) \varphi(x) dx = (-1)^{|\alpha|} \int_{\mathbb{R}^n} f(x) D^\alpha \varphi(x) dx, \quad |\alpha| \leq m,$$

или

$$(D^\alpha f, \varphi) = (-1)^{|\alpha|} (f, D^\alpha \varphi), \quad \varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^n). \quad (10.14)$$

Соотношение (10.14), установленное для регулярных обобщенных функций, распространяется (по определению) на все обобщенные функции: функционал $D^\alpha f$, действующий по правилу (10.14), называется обобщенной производной порядка $|\alpha|$ функции $f \in \mathcal{D}'(\mathbb{R}^n)$. При любом α обобщенная производная $D^\alpha f$ является линейным непрерывным функционалом. Линейность:

$$\begin{aligned} (D^\alpha f, \mu_1 \varphi_1 + \mu_2 \varphi_2) &= (-1)^{|\alpha|} (f, \mu_1 D^\alpha \varphi_1 + \mu_2 D^\alpha \varphi_2) = \\ &= (-1)^{|\alpha|} \mu_1 (f, D^\alpha \varphi_1) + (-1)^{|\alpha|} \mu_2 (f, D^\alpha \varphi_2) = \\ &= \mu_1 (D^\alpha f, \varphi_1) + \mu_2 (D^\alpha f, \varphi_2). \end{aligned}$$

Непрерывность: если $\varphi_k \rightarrow \varphi$ при $k \rightarrow \infty$, то

$$(D^\alpha f, \varphi_k) = (-1)^{|\alpha|} (f, D^\alpha \varphi_k) \rightarrow (-1)^{|\alpha|} (f, D^\alpha \varphi) = (D^\alpha f, \varphi).$$

Из доказанного свойства следует, что всякая обобщенная функция бесконечно дифференцируема. В дальнейшем (в случае

необходимости) классическая производная там, где она существует, будет обозначаться символом $\{D^\alpha f\}$.

10.191. Доказать, что для регулярной обобщенной функции, которая определяется функцией $f(x) \in C^m(\mathbb{R}^n)$,

$$D^\alpha f = \{D^\alpha f\}, \quad |\alpha| \leq m.$$

10.192. Доказать, что сходимость $f_k \rightarrow f$ в $\mathcal{D}'$ влечет при любом α сходимость $D^\alpha f_k \rightarrow D^\alpha f$ в $\mathcal{D}'$.

10.193. Показать, что сходящийся в $\mathcal{D}'$ ряд можно дифференцировать почленно, т. е.

$$\sum_{k=0}^{\infty} f_k \rightarrow f \implies \sum_{k=0}^{\infty} D^m f_k \rightarrow D^m f.$$

10.194. Если ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} f_n(x) = f(x),$$

члены которого есть локально интегрируемые в $\mathbb{R}^n$ функции, равномерно сходится на любом компакте (ограниченном замкнутом множестве), то в $\mathcal{D}'(\mathbb{R}^n)$

$$\sum_{n=1}^{\infty} D^\alpha f_n(x) = D^\alpha f(x),$$

т. е. ряд можно почленно дифференцировать сколько угодно раз и ряд из производных будет сходится в $\mathcal{D}'(\mathbb{R}^n)$ к производной суммы $f(x)$ исходного ряда. Доказать.

10.195. Сходятся ли в пространстве $\mathcal{D}'(\mathbb{R})$ последовательности:

$$1) (\cos kx)/k; \quad 2) k^3 \cos kx \text{ при } k \rightarrow \infty?$$

10.196. Построить последовательность обобщенных функций, сходящуюся к $\delta^{(m)}(x)$.

10.197. Установить следующие формулы обобщенного дифференцирования в $\mathcal{D}'(\mathbb{R})$:

$$1) D^m(\mu_1 f_1 + \mu_2 f_2) = \mu_1 D^m f_1 + \mu_2 D^m f_2;$$

$$2) D^m(hf) = \sum_{k=0}^m C_m^k D^k h D^{m-k} f, \quad h(x) \in C^\infty(\mathbb{R});$$

$$3) D^m f(ax + b) = a^m (D^m f)(ax + b).$$

10.198. Доказать равенство смешанных обобщенных производных, т. е.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right), \quad f \in \mathcal{D}'(\mathbb{R}^2).$$

10.199. Функция $g \in C^\infty(\mathbb{R})$ взаимно-однозначно отображает $\mathbb{R}$ на $\mathbb{R}$, $h \in C^\infty(\mathbb{R})$ — обратное отображение. Выразить $\delta'(g(x))$ через δ -функцию и ее производную.

10.200. Доказать, что в $\mathcal{D}'(\mathbb{R})$:

$$1) (D^m \delta, \varphi) = (-1)^m D^m \varphi(0), \quad \varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R});$$

$$2) h(x) D^m \delta(x) = \sum_{k=0}^m (-1)^k C_m^k D^k h(0) D^{m-k} \delta(x), \quad h(x) \in C^\infty(\mathbb{R});$$

$$3) D^m \delta(-x) = (-1)^m D^m \delta(x).$$

10.201. Функционалы:

$$1) e^{-x} D^m \delta(x); \quad 2) \sin x D^m \delta(x); \quad 3) \cos x D^m \delta(x),$$

определенные в $\mathcal{D}'(\mathbb{R})$, представить в форме линейной комбинации функционалов $D^k \delta(x)$, $k = 0, 1, 2, \dots, m$.

10.202. Как действуют в $\mathcal{D}'(\mathbb{R})$ следующие функционалы:

$$1) f = x \delta'(x) + \delta(x); \quad 2) f = x^2 \delta''(x) - x \delta'(x) - \delta(x);$$

$$3) f = x \cos x \delta''(x) + \sin x \delta'(x) + \delta(x); \quad 4) f = \sum_{m=0}^n \frac{(-1)^m x^m}{m!} \delta^m(x)?$$

Пример 10.11. Пусть $f(x) \in C^1(x \leq x_0) \cap C^1(x \geq x_0)$, т. е. существуют конечные предельные значения функции и ее производной в точке x_0 справа и слева, $[f]_{x_0} = f(x_0+0) - f(x_0-0)$ есть скачок $f(x)$ в точке x_0 . По определению (10.14) обобщенной производной

$$\begin{aligned} (f', \varphi) &= -(f, \varphi') = - \int_{-\infty}^{x_0} f \varphi' dx - \int_{x_0}^{\infty} f \varphi' dx = \\ &= -f \varphi|_{-\infty}^{x_0} + \int_{-\infty}^{x_0} \{f'\} \varphi dx - f \varphi|_{x_0}^{\infty} + \int_{x_0}^{\infty} \{f'\} \varphi dx = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \{f'\} \varphi dx + [f(x_0+0) - f(x_0-0)] \varphi(x_0) = \\ &= (\{f'\} + [f]_{x_0} \delta(x - x_0), \varphi). \end{aligned}$$

По свойству (10.8) отсюда

$$f'(x) = \{f'(x)\} + [f]_{x_0} \delta(x - x_0).$$

10.203. Пусть $f(x)$ и $f'(x)$ — кусочно-непрерывны в $\mathbb{R}$, а $\{x_k\}$ — множество точек разрыва функции $f(x)$. Доказать, что

$$f'(x) = \{f'(x)\} + \sum_k [f]_{x_k} \delta(x - x_k).$$

10.204. Функция $E(x)$ — целая часть числа; вычислить обобщенную производную $E'(x)$.

10.205. Показать, что производная 2π -периодической функции $f(x)$, где

$$f(x) = \frac{1}{2} - \frac{x}{2\pi}, \quad x \in [0; 2\pi),$$

равна

$$f'(x) = -\frac{1}{2\pi} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - n).$$

10.206. Вывести формулу

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{inx} = 2\pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - 2\pi n).$$

10.207. Пусть $f(x) \in C^2(x \leq x_0) \cap C^2(x \geq x_0)$, где $x \in \mathbb{R}$, доказать, что

$$f''(x) = \{f''(x)\} + [f]_{x_0} \delta'(x - x_0) + [f']_{x_0} \delta(x - x_0). \quad (10.15)$$

10.208. Вычислить обобщенные производные 1-го и 2-го порядков следующих функций, определенных в $\mathbb{R}$:

- 1) $\eta(x)$; 5) $\sin |x|$;
- 2) $x \eta(x)$; 6) $\operatorname{sign} x \cos x$;
- 3) $e^{-x} \eta(x)$; 7) $(1 - x) \operatorname{sign} x$;
- 4) $\operatorname{sign} x$; 8) $f(x) = \begin{cases} x, & x > 0, \\ 1 - x^2, & x < 0. \end{cases}$

10.209. Вычислить обобщенные производные порядка m следующих функций, определенных в $\mathbb{R}$:

- 1) $h(x) \eta(x)$, $h(x) \in C^\infty(\mathbb{R})$; 2) $x^n \eta(x)$, $n \in \mathbb{N}_0$.

10.210. Пусть функция $f(x) \in C^2(x \geq 0)$, где $x \in \mathbb{R}$. Вычислить обобщенные производные 1-го и 2-го порядков функции $f(|x|)$.

10.211. Вычислить обобщенные производные 1-го и 2-го порядков следующих функций, определенных в $\mathbb{R}$:

$$\begin{array}{lll} 1) |x|; & 3) \sin |x| \cos x; & 5) x \sin |x|; \\ 2) e^{-|x|}; & 4) |x| \cos x; & 6) |x| e^{-|x|}. \end{array}$$

10.212. Пусть функция $f(x) \in C^2(\mathbb{R})$ имеет на каждом конечном промежутке конечное число простых нулей. Вычислить: 1) обобщенную производную функции $\operatorname{sign} f(x)$; 2) обобщенные производные 1-го и 2-го порядков функции $|f(x)|$.

10.213. Найти обобщенные производные 1-го порядка определенных в $\mathbb{R}$ функций: 1) $\operatorname{sign}(\sin x)$; 2) $\operatorname{sign}(\cos x)$.

10.214. Вычислить обобщенные производные 1-го и 2-го порядков следующих функций, определенных в $\mathbb{R}$:

$$1) |x + 1|; \quad 2) |x^2 - 1|; \quad 3) |\sin x|; \quad 4) |\cos x|.$$

10.215. Осуществить обобщенное дифференцирование:

$$1) D^m \eta(-x); \quad 2) D^m \eta(ax + b).$$

10.216. Пусть $f(x) = D^m \delta(x)$, где $x \in \mathbb{R}$; найти $f(-x)$.

10.217. Вычислить обобщенную производную $D \ln |x|$, где $x \in \mathbb{R}$.

10.218. Вычислить производные до третьего порядка следующих функций:

$$1) e^{-\alpha x^2} \eta(x); \quad 2) \ln x \eta(x - 1); \quad 3) x \cos x \eta(x); \quad 4) \frac{\eta(x)}{1 + x}.$$

10.219. Вычислить производные порядка m функций:

$$\begin{array}{lll} 1) \eta(x^2 - a^2); & 2) \operatorname{sign} x \eta(x^2 - a^2); & 3) x \eta(x^2 - a^2); \\ 4) |x| \eta(x^2 - a^2); & 5) |1 - |x||. \end{array}$$

10.220. Вычислить все производные функций:

$$1) f(x) = \begin{cases} x^2, & x < \frac{1}{2}, \\ x, & \frac{1}{2} \leq x; \end{cases}$$

$$2) f(x) = \begin{cases} 1-x^2, & x < 1, \\ 0, & 1 \leq x; \end{cases}$$

$$3) f(x) = \begin{cases} (x+1)^2, & x < 0, \\ 1-x^2, & 0 \leq x; \end{cases}$$

$$4) f(x) = \begin{cases} -2x, & x < 0, \\ (x-1)^2, & 0 \leq x < 1, \\ 1, & 1 \leq x; \end{cases}$$

$$5) f(x) = \begin{cases} x, & x < 1, \\ (2-x)^2, & 1 \leq x < 2, \\ 0, & 2 \leq x; \end{cases}$$

$$6) f(x) = \begin{cases} 0, & x < -1, \\ 1-x^2, & -1 \leq x < 1, \\ 2(x-1), & 1 \leq x. \end{cases}$$

10.221. Установить следующее правило дифференцирования прямого произведения:

$$D_x^\alpha(f(x) \cdot g(y)) = D^\alpha f(x) \cdot g(y).$$

10.222. Доказать, что в $\mathcal{D}'(\mathbb{R}(x, y))$:

$$1) ((\delta^{(m)}(x) \cdot f(y)), \varphi(x, y)) = (-1)^m (f(y), \frac{\partial^m \varphi(0, y)}{\partial x^m}), \quad h \in C^\infty;$$

$$2) (h(x, y)((\delta'(x) \cdot f(y)), \varphi(x, y)) = \\ = -(g(y), \frac{\partial h(0, y)}{\partial x} \varphi(0, y)) - (g(y), h(0, y) \frac{\partial \varphi(0, y)}{\partial x}), \quad h \in C^\infty.$$

10.223. Доказать, что в $\mathcal{D}'(\mathbb{R}(x, y))$

$$h(x)(\delta'(x) \cdot f(y)) = -h(0)\delta(x) \cdot f(y) + h(0)\delta'(x) \cdot f(y), \quad h \in C^\infty.$$

10.224. Доказать, что в $\mathcal{D}'(\mathbb{R}(x, y))$:

$$1) \frac{\partial}{\partial x}(h(x) \cdot f(y)) = h'(x) \cdot f(y);$$

$$2) \frac{\partial}{\partial x}(\eta(x) \cdot f(y)) = \delta'(x) \cdot f(y);$$

$$3) \frac{\partial}{\partial x}(h(x)\eta(x) \cdot f(y)) = \eta(x)h'(x) \cdot f(y) + h(0)\delta(x) \cdot f(y), \quad h \in C^\infty;$$

$$4) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \eta(x)x \cdot \eta(y)y = \eta(x) \cdot \eta(y).$$

10.225. Установить равенство

$$\delta^m(x) \cdot \delta^n(y) = \frac{\partial^{m+n} \delta(x, y)}{\partial^m x \partial^n y}, \quad x \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}^n.$$

10.226. Вывести формулу

$$\frac{\partial}{\partial x} \int \varphi(x, y) dy = \int \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} dy, \quad \varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^2).$$

10.227. Дифференцирование свертки. Если свертка $f * g$ существует, то существуют свертки $D^\alpha f * g$ и $f * D^\alpha g$; при этом

$$D^\alpha f * g = D^\alpha(f * g) = f * D^\alpha g$$

(доказательство в [15], § 11). Дать доказательство в частном случае, т. е.

$$D^\alpha \delta * f = D^\alpha(\delta * f) = \delta * D^\alpha f.$$

10.228. Вычислить свертки: 1) $\delta' * \eta$; 2) $\delta' * 1$.

10.229. Обобщенная функция, зависящая от параметра $\mu \in \mathbb{R}$, определена выражением

$$f_\mu(x) = \begin{cases} \frac{\eta(x)x^{\mu-1}}{\Gamma(\mu)}, & x > 0, \\ f'_{\mu+1}, & x \leq 0. \end{cases}$$

Доказать, что $f_\alpha * f_\beta = f_{\alpha+\beta}$.

10.230. Функция $h \in \mathcal{D}(\mathbb{R})$, функция f_μ определена в предыдущей задаче; доказать, что:

$$\begin{aligned} 1) f_0 * h &= \delta * h; & 2) f_{-n} * h &= \delta^{(n)} * h, n \in \mathbb{N}; \\ 3) f_n * h &= \underbrace{\eta * \eta * \dots * \eta}_{n \text{ раз}} * h. \end{aligned}$$

З а м е ч а н и е . Если целое $n < 0$, то $f_n * h = h^{(n)}$ — производная порядка n функции h . Если целое $n > 0$, то

$$(f_n * h)^{(n)} = f_{-n} * (f_n * h) = (f_{-n} * f_n) * h = f_0 * h = \delta * h = h,$$

т. е. $f_n * h$ — первообразная порядка n функции h . При нецелом α в зависимости от знака $f_\alpha * h$ называется дробной производной порядка α функции h , если $\alpha < 0$, и дробной первообразной порядка α функции h , если $\alpha > 0$ (дробные производные и дробные интегралы Римана–Лиувилля).

10.231. Вычислить производную порядка $\frac{1}{2}$ функции $\eta(x)$.

10.232. Вычислить производную порядка $\frac{3}{4}$ функции $\eta(x)$.

10.233. Вычислить производную порядка $\frac{1}{2}$ функции $\chi_{(0;1)}$ — характеристической функции множества (см. задачу 10.134).

10.234. Вычислить производную порядка $\frac{1}{2}$ функции $\eta(x)f(x)$, где $f \in \mathcal{D}'(\mathbb{R})$.

10.235. Найти первообразную порядка $\frac{1}{2}$ функции $\eta(x)$.

10.236. Найти первообразную порядка $\frac{1}{4}$ функции $\eta(x)$.

10.237. Найти первообразную порядка $\frac{1}{2}$ функции $\chi_{(0;1)}$ — характеристической функции множества (см. задачу 10.134).

10.238. Найти первообразную порядка $\frac{1}{2}$ функции $\eta(x)f(x)$, где $f \in \mathcal{D}'(\mathbb{R})$.

10.239. Функция $h(x)$ локально интегрируема на $\mathbb{R}$, $\alpha \in (0; 1)$; доказать, что

$$f_\alpha * \eta(x)h = \frac{\eta(x)}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x \frac{h(\xi)d\xi}{(x-\xi)^{1-\alpha}},$$

$$f_{-\alpha} * \eta(x)h = \frac{d}{dx} \frac{\eta(x)}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^x \frac{h(\xi)d\xi}{(x-\xi)^\alpha}.$$

Применение к интегральным уравнениям в задаче 4.479, т. 1.

10.240. При условиях в предыдущей задаче показать, что

$$f_\alpha * \eta(x-a)h = \frac{\eta(x-a)}{\Gamma(\alpha)} \int_a^x \frac{h(\xi)d\xi}{(x-\xi)^{1-\alpha}},$$

$$f_{-\alpha} * \eta(x-a)h = \frac{d}{dx} \frac{\eta(x-a)}{\Gamma(1-\alpha)} \int_a^x \frac{h(\xi)d\xi}{(x-\xi)^\alpha}.$$

Применение к интегральным уравнениям в задаче 4.480, т. 1.

10.241. Определить плотность заряда одномерного диполя с моментом $\mathbf{p} = p\mathbf{e}_x$, расположенного в точке $x = 0 \in \mathbb{R}$ (поле диполя зависит только от x).

10.242. На прямой $\{x, y: -\infty < x < \infty, y = y_0\}$ расположены диполи, плотность момента которых $p(x)\mathbf{e}_y$. Какова пространственная плотность заряда прямой?

10.243. Диполь с моментом $\mathbf{p} = p\mathbf{l}$, $|\mathbf{l}| = 1$, находится в точке $x = x_0$ трехмерного пространства. Определить плотность заряда диполя.

10.244. В точке $(0, 0, z_0) \in \mathbb{R}^3$ находится диполь с моментом $\mathbf{p} = p\mathbf{e}_z$. Найти плотность заряда диполя.

10.245. На прямой $\{x, y, z: x = x_0, y = y_0, -\infty < z < \infty\}$ расположены диполи, плотность момента которых $p(z)\mathbf{e}_x$. Какова пространственная плотность заряда прямой?

10.246. На прямой $\{x, y, z: x = 0, y = y_0, -\infty < z < \infty\}$ расположены диполи с линейной плотностью момента $\mathbf{p}$, направление которого составляет угол $\pi/4$ с осью Ox и угол $\pi/2$ с осью Oz . Определить плотность заряда этой системы.

10.247. Доказать, что:

$$1) \Delta \ln \frac{1}{|x - x_0|} = -2\pi \delta(x - x_0), \quad x \in \mathbb{R}^2; \quad (10.16)$$

$$2) \Delta \frac{1}{|x - x_0|} = -4\pi \delta(x - x_0), \quad x \in \mathbb{R}^3. \quad (10.17)$$

Пример 10.12. В задачах математической физики используются обобщенные функции, носители которых принадлежат кусочно-гладким двусторонним поверхностям. Пусть S — такая поверхность, $\mathbf{n}$ — нормаль к S , $\sigma(x)$ и $\nu(x)$ — непрерывные функции, определенные на S ; функционалы $\sigma\delta_S$ и $\frac{\partial}{\partial n}(\nu\delta_S)$, действующие по правилам

$$(\sigma\delta_S, \varphi) = \int_S \sigma \varphi ds, \quad (10.18)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial n}(\nu\delta_S), \varphi\right) = - \int_S \nu \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds, \quad (10.19)$$

где $\varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^n)$, представляют собой обобщенные функции, носители которых принадлежат S . Эти обобщенные функции называются, соответственно, простым слоем с плотностью σ на S и двойным слоем с плотностью момента ν на S , ориентированного по нормали $\mathbf{n}$. Обобщенная функция (10.18) описывает пространственную плотность заряда, распределенного на S с поверхностной плотностью σ . Физический смысл обобщенной функции (10.19): она описывает пространственную плотность зарядов заряженной поверхности, на которой распределены диполи

с поверхностной плотностью момента ν , направленного по нормали $\mathbf{n}$ к поверхности S .

Пусть Ω — область в $\mathbb{R}^n$ с кусочно-гладкой границей S , $\Omega_1 = \mathbb{R}^n \setminus \overline{\Omega}$, функция $f(x) \in C^2(\overline{\Omega}) \cap C^2(\overline{\Omega}_1)$; по определению

$$f|_{S^+} = \lim_{\substack{x' \rightarrow x \in S \\ x' \in \Omega_1}} f(x'), \quad f|_{S^-} = \lim_{\substack{x' \rightarrow x \in S \\ x' \in \Omega}} f(x'), \quad (10.20)$$

$[f]_S = f|_{S^+} - f|_{S^-}$ — скачок функции на S . Для функции $f(x)$ можно установить следующую формулу обобщенного дифференцирования:

$$\Delta f = \{\Delta f\} + \frac{\partial}{\partial n}([f]_S \delta_S) + \left[\frac{\partial f}{\partial n} \right]_S \delta_S, \quad (10.21)$$

где $\{\Delta f\}$ означает дифференцирование в классическом смысле. Действительно, по определению обобщенной производной (10.14) и на основании 2-й формулы Грина (10.37), в которой $\mathcal{L} = -\Delta$,

$$\begin{aligned} (\Delta f, \varphi) &= (f, \Delta \varphi) = \int_{\Omega} f \Delta \varphi \, dx + \int_{\Omega_1} f \Delta \varphi \, dx = \\ &= \int_{\Omega} \{\Delta f\} \varphi \, dx + \int_S \left(f \frac{\partial \varphi}{\partial n} - \varphi \frac{\partial f}{\partial n} \right) \Big|_{S^-} \, ds + \\ &+ \int_{\Omega_1} \{\Delta f\} \varphi \, dx - \int_S \left(f \frac{\partial \varphi}{\partial n} - \varphi \frac{\partial f}{\partial n} \right) \Big|_{S^+} \, ds = \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} \{\Delta f\} \varphi \, dx - \int_S [f]_S \frac{\partial \varphi}{\partial n} \, ds + \int_S \left[\frac{\partial f}{\partial n} \right]_S \varphi \, ds = \\ &= (\{\Delta f\}, \varphi) + \left(\frac{\partial}{\partial n}([f]_S \delta_S), \varphi \right) + \left(\left[\frac{\partial f}{\partial n} \right]_S \delta_S, \varphi \right) = \\ &= \left(\{\Delta f\} + \frac{\partial}{\partial n}([f]_S \delta_S) + \left[\frac{\partial f}{\partial n} \right]_S \delta_S, \varphi \right). \end{aligned}$$

Соотношение (10.21) является следствием свойства (10.8).

10.248. На кусочно-гладкой поверхности $S \subset \mathbb{R}^3$ расположен заряд с плотностью $\sigma(x)$. Определить пространственную плотность этого заряда.

10.249. На гладкой поверхности $S \subset \mathbb{R}^3$ расположены диполи, ориентированные по нормали к S . Определить пространственную плотность заряда, если поверхностная плотность дипольного момента $\nu(x)$.

10.250. Наряду с $\mathcal{D}(\mathbb{R}^n)$ в теории обобщенных функций вводится пространство $\mathcal{J} = \mathcal{J}(\mathbb{R}^n)$: это множество бесконечно дифференцируемых функций, которые вместе со всеми производными убывают при $|x| \rightarrow \infty$ быстрее любой степени $|x|^{-1}$; последовательность $\{\varphi_k\} \subset \mathcal{J}$ называется сходящейся к $\varphi(x) \in \mathcal{J}$, если

$$\forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}^n: x^\beta D^\alpha \varphi_k(x) \xrightarrow{\mathbb{R}^n} x^\beta D^\alpha \varphi(x), \quad k \rightarrow \infty.$$

Какие из функций:

- 1) $\sin x/x$; 3) $e^{-|x|}$; 5) $x^n e^{-x^2}$;
 2) $(1+x^2)^{-n}$; 4) e^{-x^2} ; 6) $x^n \varphi(x)$,

где $n \in \mathbb{N}_0$, $\varphi \in \mathcal{J}(\mathbb{R})$, принадлежат пространству $\mathcal{J}(\mathbb{R})$?

10.251. Функция $\varphi(x) \in \mathcal{J}$; сходятся ли в $\mathcal{J}$ следующие последовательности:

$$1) \frac{1}{k} \varphi(x); \quad 2) \frac{1}{k} \varphi(kx); \quad 3) \frac{1}{k} \varphi\left(\frac{x}{k}\right)?$$

10.252. Доказать, что: 1) $\mathcal{D} \subset \mathcal{J}$ и из сходимости последовательности в $\mathcal{D}$ следует ее сходимость в $\mathcal{J}$; 2) $\mathcal{D}$ не совпадает с $\mathcal{J}$; 3) $\mathcal{D}$ плотно в $\mathcal{J}$.

10.253. Обобщенной функцией f медленного роста называется всякий линейный непрерывный функционал (f, φ) на пространстве $\mathcal{J}$. Множество $\mathcal{J}' = \mathcal{J}'(\mathbb{R}^n)$ обобщенных функций медленного роста, на котором определена сходимость

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f_k = f \in \mathcal{J}' \iff \forall \varphi(x) \in \mathcal{J}: \lim_{k \rightarrow \infty} (f_k, \varphi) = (f, \varphi),$$

называется пространством обобщенных функций медленного роста. Пусть $f(x)$ — локально интегрируемая функция, растущая на бесконечности не быстрее полинома. Показать, что функционал, действующий по правилу

$$(f, \varphi) = \int_{\mathbb{R}^n} f(x) \varphi(x) dx, \quad \varphi \in \mathcal{J},$$

(он называется регулярной обобщенной функцией), принадлежит пространству $\mathcal{J}'$.

10.254. Определяют ли локально интегрируемые функции 1) e^x ; и 2) $\cos e^x$ функционал в $\mathcal{J}'(\mathbb{R})$?

10.255. Функция $f \in \mathcal{J}'(\mathbb{R}^n)$; доказать, что функционал (линейная замена переменных в обобщенной функции)

$$(f(Ax + b), \varphi) = \left(f, \frac{\varphi(A^{-1}(x - b))}{\det A}\right)$$

принадлежит $\mathcal{J}'(\mathbb{R}^n)$.

10.256. Функция $f \in \mathcal{J}'(\mathbb{R}^n)$; функция $h(x) \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$ и растет на бесконечности вместе с производными не быстрее многочлена; доказать, что функционал $(hf, \varphi) = (f, h\varphi)$ принадлежит $\mathcal{J}'(\mathbb{R}^n)$.

10.257. Если $f \in \mathcal{D}$ финитна, то ее можно единственным образом продолжить на $\mathcal{J}$ как элемент $\mathcal{J}'$ по правилу

$$(f, \varphi) = (f, \varkappa\varphi), \quad \varphi \in \mathcal{J},$$

где функция $\varkappa(x)$ определена в задаче 10.134 и соответствует области $\Omega = \text{supp } f$. Доказать это утверждение.

10.258. Доказать, что функционал

$$(\delta(x), \varphi(x)) = \varphi(0), \quad \varphi \in \mathcal{J},$$

является сингулярной обобщенной функцией в $\mathcal{J}'$.

10.259. Получить формулу суммирования Пуассона

$$\sqrt{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \varphi(2\pi n) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F[\varphi](n),$$

где $F[\varphi]$ — преобразование Фурье функции $\varphi(x)$.

10.260. С помощью формулы Пуассона (см. предыдущую задачу) просуммировать ряды:

$$\begin{aligned} & 1) \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{1}{n^2 + a^2} \text{ и рассмотреть частные случаи :} \\ & S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}, \quad S_2 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2}, \quad S_3 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n^2}; \\ & 2) \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{(-1)^n}{n^2 + a^2}; \quad 3) \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{1}{(n+a)^2}; \quad 4) \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3}. \end{aligned}$$

10.261. Применяя полученную в задаче 10.206 формулу, просуммировать ряды:

$$1) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos nx}{n^2}; \quad 2) \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{e^{inx}}{n^2 + a^2}; \quad 3) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(2n+1)x}{(2n+1)^2}.$$

10.262. В теории интегрального преобразования Меллина используется пространство $\mathcal{Z}_+$ основных функций (см. [20])

$$\psi(p) = \int_0^{\infty} \varphi(r) r^{p-1} dr, \quad \varphi(r) \in \mathcal{D}_+(\mathbb{R}), \quad p = \sigma + i\lambda,$$

где $\mathcal{D}_+(\mathbb{R})$ есть множество функций $\varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R})$, носитель которых $\text{supp } \varphi \subset [0, \infty)$. Последовательность $\{\psi_k\} \subset \mathcal{Z}_+$ называется сходящейся, если сходится последовательность преобразов $\{\varphi_k\} \subset \mathcal{D}_+$. Доказать, что: 1) $\psi(p)$ — целая функция; 2) при любом σ функция $\psi(\sigma + i\lambda) \in \mathcal{J}$ по переменной λ ; 3) если $\varphi_k(r) \rightarrow 0$ в $\mathcal{D}_+$, то при любом σ последовательность функций $\psi_k(\sigma + i\lambda) \rightarrow 0$ в $\mathcal{J}$.

10.263. Всякий линейный непрерывный функционал на пространстве $\mathcal{Z}_+$ называется обобщенной функцией; множество таких функций обозначается символом $\mathcal{Z}'_+$. Пусть при любом σ функция $f(\sigma + i\lambda)$ локально интегрируема по $\lambda \in \mathbb{R}$ и растет не быстрее полинома по λ степени m . Показать, что функционал

$$(f(p), \psi(p)) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} f(p) \psi(p) dp, \quad \psi(p) \in \mathcal{Z}_+,$$

называемый регулярной обобщенной функцией, принадлежит пространству $\mathcal{Z}'_+$.

10.3. Обобщенные функции в области

Пример 10.13. Пространством основных функций $\mathcal{D}(\overline{\Omega})$, где область $\Omega \in \mathbb{R}^n$, называется множество функций со следующими свойствами:

- 1) $\psi(x) \in C^\infty(\overline{\Omega})$;
- 2) $\forall \psi \exists r: \text{supp } \psi \subset \overline{\Omega} \cap B_r$;
- 3) $\lim_{k \rightarrow \infty} \psi_k = \psi \iff \begin{cases} \exists r \forall k: \text{supp } \psi_k \subset \overline{\Omega} \cap B_r, \\ \forall \alpha: D^\alpha \psi_k \xrightarrow{\overline{\Omega}} D^\alpha \psi, \quad k \rightarrow \infty. \end{cases}$

Если $\overline{\Omega} = [0, \infty)$, то при $x \geq 0$ функция $\omega_\varepsilon(x)$, определенная выражением (10.1), принадлежит пространству $\mathcal{D}(\overline{\Omega})$. Если Ω — ограниченная область, то существует такое r , при котором $\overline{\Omega} \cap B_r = \overline{\Omega}$; в этом случае любая функция $\psi \in C^\infty(\overline{\Omega})$ (например, $\psi = 1$) является элементом пространства $\mathcal{D}(\overline{\Omega})$.

Обобщенной функцией называется всякий линейный непрерывный функционал на пространстве $\mathcal{D}(\overline{\Omega})$.

Функция $f(x) \in L_1(\Omega)$ определяет регулярную обобщенную функцию

$$(f, \psi) = \int_{\Omega} f(x) \psi(x) dx, \quad \psi(x) \in \mathcal{D}(\overline{\Omega}).$$

Примером сингулярной обобщенной функции служит $\delta(x - x_0)$:

$$(\delta(x - x_0), \psi(x)) = \psi(x_0), \quad \psi \in \mathcal{D}(\overline{\Omega}), \quad x_0 \in \overline{\Omega}.$$

Равенство нулю обобщенной функции в $\Omega_1 \subset \Omega$, сложение, умножение на $h(x) \in C^\infty(\overline{\Omega})$ обобщенных функций в пространстве $\mathcal{D}'(\overline{\Omega})$ определяется так же, как и в $\mathcal{D}'(\mathbb{R}^n)$. Линейное множество обобщенных функций, в котором определена сходимость

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f_k \rightarrow f \iff \forall \psi \in \mathcal{D}(\overline{\Omega}): \lim_{k \rightarrow \infty} (f_k, \psi) = (f, \psi),$$

называется пространством обобщенных функций $\mathcal{D}'(\overline{\Omega})$. Если $\Omega = (a, b)$ — ограниченный промежуток и $f(x) \in C^m(\overline{\Omega})$, то справедлива формула интегрирования по частям

$$\begin{aligned} \int_a^b f^{(m)}(x) \psi(x) dx &= \sum_{k=0}^{m-1} (-1)^k f^{(m-k-1)}(x) \psi^{(k)}(x) \Big|_a^b + \\ &+ (-1)^m \int_a^b f(x) \psi^{(m)}(x) dx, \end{aligned} \quad (10.22)$$

где $\psi \in \mathcal{D}(\overline{\Omega})$. Эта формула служит основой для определения производной обобщенной функции. Пусть $f \in \mathcal{D}'(\overline{\Omega})$ и задано множество (свое для каждой f) чисел $A_k, B_k, k \in \mathbb{N}_0$. Обобщенной производной порядка m функции $f \in \mathcal{D}'(\overline{\Omega})$ называется функционал $f^{(m)}$, действующий по правилу

$$\begin{aligned} (f^{(m)}, \psi) &= \sum_{k=0}^{m-1} (-1)^k (B_{m-k-1} \psi^{(k)}(b) - A_{m-k-1} \psi^{(k)}(a)) + \\ &+ (-1)^m (f, \psi^{(m)}). \end{aligned} \quad (10.23)$$

Определению (10.23) можно придать форму (10.22), если ввести обозначения $A_k = f^{(k)}(a), B_k = f^{(k)}(b)$:

$$\begin{aligned} (f^{(m)}, \psi) &= \sum_{k=0}^{m-1} (-1)^k f^{(m-k-1)}(x) \psi^{(k)}(x) \Big|_a^b + \\ &+ (-1)^m (f, \psi^{(m)}). \end{aligned} \quad (10.24)$$

Частные случаи. 1) Если $f(x) = \delta(x - x_0)$, $x_0 \in [a, b]$, числа $A_k = B_k = 0$ для всех $k \in \mathbb{N}_0$, то по определению (10.23)

$$(D^m \delta(x - x_0), \psi(x)) = (-1)^m (\delta(x - x_0), \psi^{(m)}(x)) = (-1)^m \psi^{(m)}(x_0).$$

2) Пусть функция $f(x) \in C^m(a, b)$ и может быть непрерывно продолжена вместе с производными до $(m-1)$ -го порядка на промежуток $[a, b]$, т. е. существуют предельные значения производных $f^{(k)}(a+0) = f^{(k)}(a)$, $f^{(k)}(b-0) = f^{(k)}(b)$, $k = 0, 1, 2, \dots, m-1$. После интегрирования по частям интеграла $(f, \psi^{(m)})$ в соотношении (10.24) оно принимает форму $(f^{(m)}\psi) = (\{f^{(m)}\}, \psi)$, откуда $f^{(m)}(x) = \{f^{(m)}(x)\}$.

3) Функция $f(x)$ имеет на промежутке (a, b) кусочно-гладкие производные $f^{(k)}(x)$, $k = 0, 1, 2, \dots, m-1$, и существуют конечные пределы $f^{(k)}(a+0)$, $f^{(k)}(b-0)$ (они, вообще говоря, не совпадают с числами $f^{(k)}(a)$, $f^{(k)}(b)$, задаваемыми произвольно). В этом случае обобщенная производная определяется выражением (10.24). Например, обобщенная производная функции $f(x) = x$, где $x \in (0, 1)$, $f(0) = 1$, $f(1) = -1$, представляет собой функционал, действующий по правилу

$$\begin{aligned} (f', \psi) &= f(x) \psi(x) \Big|_0^1 - (f, \psi') = f(1) \psi(1) - f(0) \psi(0) - (f, \psi') = \\ &= -\psi(1) - \psi(0) - \int_0^1 x \psi'(x) dx. \end{aligned}$$

Если $\Omega = (a, \infty)$, $-\infty < a < \infty$, то обобщенная производная функции $f \in \mathcal{D}'(\overline{\Omega})$ представляет собой функционал

$$(f^{(m)}, \psi) = - \sum_{k=0}^{m-1} f^{(m-k-1)}(a) \psi(a) + (-1)^m (f, \psi^{(m)}), \quad \psi \in \mathcal{D}(\overline{\Omega}),$$

где $f^{(m-k-1)}(a)$ — заданные числа.

10.264. Дана функция $f(x)$ класса $C^m(a, b)$, для которой существуют конечные пределы $f^{(k)}(a+0)$, $f^{(k)}(b-0)$ и заданы числа $f^{(k)}(a)$, $f^{(k)}(b)$, где $k = 0, 1, \dots, m-1$. Показать, что обобщенная производная

$$\begin{aligned} f^{(m)}(x) &= \{f^{(m)}(x)\} + \\ &+ \sum_{k=0}^{m-1} [f^{(m-k-1)}]_a \delta^{(k)}(x-a) + [f^{(m-k-1)}]_b \delta^{(k)}(x-b), \end{aligned} \quad (10.25)$$

где $[f^{(k)}]_a = f^{(k)}(a+0) - f^{(k)}(a)$, $[f^{(k)}]_b = f^{(k)}(b) - f^{(k)}(b-0)$.

10.265. Найти обобщенные производные 2-го порядка функции $f(x)$, где $x \in (a, b)$, при условии $f(a) = f'(a) = f(b) = f'(b) = 0$, если:

- 1) $f(x) = 1$, $a = 0$, $b = 1$;
- 2) $f(x) = \sin x$, $a = 0$, $b = \pi$;
- 3) $f(x) = |x|$, $a = -1$, $b = 1$;
- 4) $f(x) = |\cos x|$, $a = 0$, $b = \pi$.

10.266. Вычислить обобщенные производные второго порядка функции $f(x)$, где $x \in (a, b)$, если:

- 1) $f(x) = x$, $a = 0$, $b = 1$, $f(0) = 1$, $f'(0) = 0$,
 $f(1) = -1$, $f'(1) = -1$;
- 2) $f(x) = x^2$, $a = 0$, $b = 1$, $f(0) = 0$, $f(1) = 2$,
 $f'(0) = 2$, $f'(1) = 2$;
- 3) $f(x) = \operatorname{sign} x$, $a = -1$, $b = 1$, $f(0) = 0$, $f(1) = 0$,
 $f'(0) = 2$, $f'(1) = 2$.

10.267. Дан линейный дифференциальный оператор

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{\rho(x)}[\operatorname{div}(p(x)\operatorname{grad}) - q(x)], \quad (10.26)$$

$$p(x) \in C^1(\overline{\Omega}), \quad p(x) \geq \delta > 0,$$

$$q(x) \in C(\overline{\Omega}), \quad q(x) \geq 0,$$

$$\rho(x) \in C(\overline{\Omega}), \quad \rho(x) \geq \delta > 0,$$

$$\Omega = (a, b), \quad -\infty < a < b < \infty.$$

Доказать, что если:

1) $f(x) \in \mathcal{D}'(\overline{\Omega})$, то

$$\forall \psi \in \mathcal{D}(\overline{\Omega}): (\rho \mathcal{L} f, \psi) = (f, \rho \mathcal{L} \psi) + p(f\psi' - f'\psi)|_a^b; \quad (10.27)$$

2) $f(x) \in C^2(\overline{\Omega})$, заданы числа $f(a)$, $f'(a)$, $f(b)$, $f'(b)$ и существуют конечные пределы $f(x)$ при $x \rightarrow a + 0$, $x \rightarrow b - 0$, то

$$\begin{aligned} \rho \mathcal{L} f = \{ \rho \mathcal{L} f \} - p(a) ([f]_a \delta'(x - a) + [f']_a \delta(x - a)) - \\ - p(b) ([f]_b \delta'(x - b) + [f']_b \delta(x - b)). \end{aligned} \quad (10.28)$$

10.268. Оператор $\mathcal{L}$, определенный выражением (10.26), встречается во многих задачах математической физики, одна из которых

имеет вид

$$\begin{aligned}\rho u_t &= -\rho \mathcal{L}u + F(x, t), & 0 < x < l, & \quad 0 < t, \\ u(0, t) &= \mu(t), & u(l, t) &= 0, \\ u(x, 0) &= u_0(x).\end{aligned}\tag{10.29}$$

Здесь F , μ , u_0 заданы, а $u(x, t)$ — неизвестная функция. Построение решения $u(x, t)$ упрощается, если $u(0, t) = u(l, t) = 0$. Доказать, что задача (10.29) эквивалентна следующей:

$$\begin{aligned}\rho u_t &= -\rho \mathcal{L}u + F(x, t) - p(0)\mu(t)\delta'(x), \\ 0 < x < l, & \quad 0 < t, \\ u(0, t) &= u(l, t) = 0, \\ u(x, t) &= u_0(x).\end{aligned}\tag{10.30}$$

10.269. Доказать, что задачи 1) и 2) эквивалентны:

$$\begin{aligned}1) \quad & \rho u_t = -\rho \mathcal{L}u + F, & 0 < x < l, & \quad 0 < t, \\ & u_x(0, t) = \mu(t), & u(l, t) = 0, & \quad u(x, 0) = 0; \\ 2) \quad & \rho u_t = -\rho \mathcal{L}u + F - p(0)\mu(t)\delta(x) & 0 < x < l, & \quad 0 < t, \\ & u_x(0, t) = u(l, t) = 0, & u(x, 0) = 0.\end{aligned}$$

10.270. Установить эквивалентность задач 1) и 2):

$$\begin{aligned}1) \quad & \rho u_t = -\rho \mathcal{L}u + F, & 0 < x < l, & \quad 0 < t, \\ & \alpha u(0, t) - \beta u_x(0, t) = \mu(t), & u(l, t) = 0, & \quad u(x, 0) = 0; \\ 2) \quad & \rho u_t = -\rho \mathcal{L}u + F - p(0)[A(t)\delta'(x) + B(t)\delta(x)], \\ & 0 < x < l, & \quad 0 < t, \\ & \alpha u(0, t) - \beta u_x(0, t) = 0, & u(l, t) = 0, & \quad u(x, 0) = 0,\end{aligned}$$

где $A(t)$ и $B(t)$ связаны условием $\alpha A(t) - \beta B(t) = \mu(t)$.

10.271. Оператор (10.26), определенный на множестве $\mathcal{M}_{\mathcal{L}}$ функций $X(x)$ класса $C^2[a, b]$, удовлетворяющих условиям

$$\begin{aligned}\alpha_1 X(a) - \beta_1 X'(a) &= 0, \\ \alpha_2 X(b) + \beta_2 X'(b) &= 0,\end{aligned}\tag{10.31}$$

где

$$\alpha_i \geq 0, \quad \beta_i \geq 0, \quad \alpha_i + \beta_i > 0, \quad i = 1, 2,\tag{10.32}$$

эрмитов (см. [15]), т. е.

$$\forall X, Y \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}: (\rho \mathcal{L}Y, X) = (Y, \rho \mathcal{L}X).\tag{10.33}$$

Пусть $\mathcal{M}_{\mathcal{L}}^0$ — множество функций $f(x) \in \mathcal{D}'[a, b]$ и чисел $f^{(k)}(a)$, $f^{(k)}(b)$, $k = 0, 1$, связанных соотношениями (10.31). Доказать, что

$$\forall f \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}^0, \forall X \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}: (f, \rho \mathcal{L}X) = (\rho \mathcal{L}f, X). \quad (10.34)$$

10.272. Задача

$$\begin{aligned} X'' + \lambda X &= 0, \quad 0 < x < l, \\ \alpha_1 X(0) - \beta_1 X'(0) &= 0, \\ \alpha_2 X(l) + \beta_2 X'(l) &= 0, \end{aligned} \quad (10.35)$$

где числа $\alpha_i, \beta_i, i = 1, 2$, удовлетворяют условиям (10.32), имеет нетривиальные решения при определенных значениях $\lambda \geq 0$. Пусть $\beta_1 = \beta_2 = 0$, а $X(x)$ — одно из таких решений. Вычислить интеграл $\int_0^l f(x)X(x) dx$ для следующих функций $f(x)$:

$$1) x(l-x); \quad 2) \frac{l}{2} - \left| \frac{l}{2} - x \right|; \quad 3) \left| 1 - \frac{2x}{l} \right|; \quad 4) e^{\alpha x}; \quad 5) \sin \alpha x, \quad \alpha^2 \neq \lambda.$$

10.273. Вычислить $\int_0^l (ax^2 + bx + c)X(x) dx$, где $X(x)$ — нетривиальное решение задачи (10.35) при $\beta_1 = 0, \alpha_2 = 1, \beta_2 = h$.

10.274. Пусть $X(x)$ — нетривиальное решение задачи

$$\begin{aligned} X'' + \lambda \rho(x) X &= 0, \quad 0 < x < l, \\ X'(0) = X(l) &= 0, \end{aligned}$$

где $\rho(x) \in C[0, l]$, $\rho(x) \geq \delta > 0$. Найти $\int_0^l f(x)X(x) \rho(x) dx$, если:

$$1) f(x) = ax + b; \quad 2) f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}, & 0 < x < \frac{l}{2}, \\ \frac{l-x}{l}, & \frac{l}{2} < x < l. \end{cases}$$

10.275. Функция $X(x)$, удовлетворяющая условиям (10.31), является нетривиальным решением уравнения $\mathcal{L}X = \lambda X$ при $\lambda \neq 0$, где $\mathcal{L}$ — оператор, определенный соотношением (10.26), а функция $f(x)$ — решение уравнения $\mathcal{L}f = A\delta(x - x_0)$, $x_0 \in [a, b]$, при тех же граничных условиях. Вычислить $(\rho X, f)$.

10.276. Оператор (10.26) определен на множестве $\mathcal{M}_{\mathcal{L}}$ функций $X(x)$ класса $C^2[a, b]$, удовлетворяющих условиям (10.31). Числа λ , при которых задача $\mathcal{L}X = \lambda X, X \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}$, имеет нетривиальные решения, называются собственными значениями оператора, а соответствующие нетривиальные решения — его

собственными функциями. Собственные функции $X_1, X_2, \dots$ ортогональны на отрезке $[a, b]$ с весом $\rho(x)$,

$$\int_a^b X_m X_n \rho dx = \|X_n\|^2 \delta_{mn},$$

и образуют полную систему на множестве $L_2[a, b]$. Доказать, что

$$\delta(x - x_0) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{X_k(x_0)X_k(x)}{\|X_k\|^2}, \quad \begin{cases} x_0 \in [a, b], & \text{если } X_n(a) \neq 0, \\ x_0 \in (a, b], & \text{если } X_n(b) \neq 0. \end{cases}$$

10.277. Вычислить обобщенные производные 1-го и 2-го порядков функции $f(x)$, $x \in (a, \infty)$, если:

$$1) f(x) = \eta(1 - x), \quad a = 0, \quad f(a) = 0, \quad f'(0) = 1;$$

$$2) f(x) = \ln x, \quad a = 1, \quad f(1) = -1, \quad f'(1) = 0.$$

10.278. Пусть $x = x(\xi)$ — биективное бесконечно дифференцируемое отображение $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, абсолютная величина якобиана которого $I(\xi)$. Показать, что на основании свойств регулярных обобщенных функций можно построить функционал $\delta(x(\xi) - x(\xi_0))$ (δ — функция в координатах $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$), который при $I(\xi_0) \neq 0$ определяется соотношением

$$\delta(x(\xi) - x(\xi_0)) = \frac{1}{I(\xi)} \delta(\xi - \xi_0) \quad (10.36)$$

и действует по правилу

$$(\delta(x - x_0), \varphi(x)) = (\delta(\xi - \xi_0), \varphi(x(\xi))).$$

10.279. Записать функционал $\delta(x - x_0)$, $x_0 \neq 0$: 1) в полярных координатах (в $\mathbb{R}^2$); 2) в цилиндрических координатах (в $\mathbb{R}^3$); 3) в сферических координатах (в $\mathbb{R}^3$).

10.280. Записать плотность заряда q_0 , расположенного в точке $(r_0; \varphi_0) \in \mathbb{R}^2$, в полярных координатах.

10.281. Заряд единицы длины окружности $\{x, y: x^2 + y^2 = r_0^2\}$ равен $q(\varphi)$. Какова пространственная плотность заряда?

10.282. Заряд q_0 расположен в точке $(x = x_0, y = y_0, z = z_0) \in \mathbb{R}^3$. Какова пространственная плотность заряда в: 1) цилиндрических; 2) сферических координатах?

10.283. Определить плотность заряда кольца $\{x^2 + y^2 = r_0^2, z = 0\}$, заряд единицы длины которого $q(\varphi)$, в цилиндрических координатах.

10.284. По тонкому кольцу, радиус которого r_0 , течет ток J . Записать плотность тока в сферической системе координат.

10.285. Используя свойства регулярных обобщенных функций, показать, что можно определить сферически симметричную функцию $f(x) \in \mathcal{D}'(\mathbb{R}^n)$ в сферических координатах как функционал

$$f(x) = \frac{f(r)}{|S_r|}, \quad f(r) \in \mathcal{D}'(\overline{\mathbb{R}}_+),$$

действующий по правилу

$$\forall \varphi \in \mathcal{D}(\overline{\mathbb{R}}_+): (f(x), \varphi(r(x))) = (f(r), \varphi(r)),$$

или в интегральной форме

$$\int_{\mathbb{R}^n} f(x) \varphi(x) dx = \int_0^\infty f(r) \varphi(r) dr.$$

10.286. Точечный заряд Q находится в начале координат пространства $\mathbb{R}^3$; записать плотность заряда: 1) в сферических координатах; 2) в цилиндрических координатах.

10.287. Масса m расположена в точке $z_0 \neq 0$ оси Oz пространства $\mathbb{R}^3$. Записать плотность массы: 1) в сферических координатах; 2) в цилиндрических координатах.

10.288. Ток J втекает в проводящий шар $(x, y, z: x^2 + y^2 + z^2 = r_0^2)$ через точку, декартовы координаты которой $(0, 0, -r_0)$, и вытекает через точку $(0, 0, r_0)$. Записать нормальную компоненту плотности тока через поверхность шара в сферических координатах.

10.289. В точке $z_0 \neq 0$ оси Oz пространства $\mathbb{R}^3$ расположен диполь с моментом $\mathbf{p} = p \mathbf{e}_z$. Записать плотность заряда диполя в: 1) цилиндрических; 2) сферических координатах.

10.290. Функция $h(\omega) \in C(S_1)$ определяет функционал

$$(h(\omega), \varphi(r, \omega)) = \int_{S_r} h(\omega) \varphi(r, \omega) ds, \quad \varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^n).$$

Показать, что:

1) прямое произведение

$$(h(\omega) \cdot D^m \delta(r - r_0), \varphi) = (h(\omega), (D^m \delta(r - r_0), \varphi)),$$

где $\delta(r - r_0) \in \mathcal{D}'(\overline{\mathbb{R}}_+)$, коммутативно;

2) функционалы (10.18), (10.19) имеют вид

$$h\delta_S = h(\omega) \cdot \delta(r - r_0); \quad \frac{\partial}{\partial r}(h\delta_S) = h(\omega) \cdot \delta'(r - r_0).$$

10.291. Пусть $h(\omega) \in C(S_1)$, $\delta(r - r_0) \in \mathcal{D}'(\overline{\mathbb{R}}_+)$, $\{\psi_k\}_1^\infty$ — полная ортонормированная система функций в $L_2(S_1)$. Доказать, что

$$h(\omega) \cdot D^m \delta(r - r_0) = \sum_{k=0}^{\infty} h_k \psi_k(\omega) \cdot D^m \delta(r - r_0),$$

где $h_k = \int_{S_1} h(\omega) \psi_k(\omega) ds$ — коэффициент Фурье функции $h(\omega)$.

10.292. На сфере $S \subset \mathbb{R}^3$, радиус которой r_0 , распределен заряд с плотностью $\sigma(\theta, \varphi)$. Записать пространственную плотность заряда в сферических координатах.

10.293. Непроводящая сфера $S \subset \mathbb{R}^3$, на которой распределен заряд с плотностью $\sigma(\theta)$, вращается с угловой скоростью ω относительно своего диаметра. Записать плотность тока в сферических координатах, если радиус сферы r_0 .

10.294. Тонкое заряженное кольцо, радиус которого r_0 , расположено в плоскости $z = 0$, центр кольца находится в начале координат. Записать пространственную плотность заряда в сферических координатах, если линейная плотность заряда кольца $q(\varphi)$.

10.295. На сфере $S \subset \mathbb{R}^3$, радиус которой r_0 , расположены диполи; диполи направлены по радиусу, их плотность момента $p(\theta, \varphi)$. Записать плотность заряда в сферических координатах.

10.296. На сфере $S_{r_0} \subset \mathbb{R}^n$ расположен заряд с плотностью $\rho(\omega)$, (r, ω) — сферические координаты точки. Сфера $S_{r_0+\Delta r}$ получена смещением каждой точки сферы S_{r_0} в направлении радиуса на величину Δr . Если $\Delta \rightarrow 0$ при постоянном (относительно Δr) произведении $p(\omega) = \rho(\omega)\Delta r$, то предельная электростатическая система называется двойным слоем, распределенным на сфере с плотностью дипольного момента $p(\omega)$. 1) Найти объемную плотность заряда двойного слоя; 2) получить решение задачи 10.295.

10.297. Линейная плотность дипольного момента кольца $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, z = 0\}$ равна $p(\varphi)\mathbf{e}_r$. Какова объемная плотность заряда в сферических координатах?

10.298. На поверхности круглого цилиндра находится заряд, плотность которого $\sigma(\varphi, z)$. Записать объемную плотность заряда в цилиндрических координатах, если радиус цилиндра r_0 .

10.299. Плотность заряда на поверхности полого цилиндра, радиус которого r_0 , равна $\sigma(z)$. Какова объемная плотность тока, возникающего при вращении цилиндра около оси с угловой скоростью ω ? Ответ дать в цилиндрических координатах.

10.300. На поверхности круглого цилиндра расположены диполи, ориентированные по радиусу, плотность момента которых $p(\varphi, z)$. Записать объемную плотность заряда в цилиндрических координатах, если радиус цилиндра r_0 .

10.301. На поверхности круглого цилиндра $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, -\infty < z < \infty\}$ расположены диполи, ориентированные по радиусу, плотность момента которых $p(\varphi, z)$. Найти объемную плотность заряда, применяя методику решения задачи 10.296.

10.302. Линейная плотность дипольного момента кольца $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, z = 0\}$ равна $p(\varphi)\mathbf{e}_r$. Какова объемная плотность заряда в цилиндрических координатах?

10.303. На круглую мембрану, радиус которой r_0 , действует поперечная сила, распределенная по диаметру с линейной плотностью $p(r)$. Записать силу, действующую на единицу площади мембраны, в полярных координатах.

10.304. Линейная плотность дипольного момента кольца $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, z = 0\}$ равна $p(\varphi)\mathbf{e}_z$. Какова объемная плотность заряда в сферических координатах?

10.305. На отрезке $[-l, l]$ оси Oz пространства $\mathbb{R}^3$ находится тонкий стержень, линейная плотность массы которого $\rho(z)$. Записать пространственную плотность массы: 1) в декартовых координатах; 2) в цилиндрических координатах; 3) в сферических координатах.

10.306. Виток с током эквивалентен магнитному диполю. Какова плотность тока в витке, эквивалентном точечному магнитному диполю с моментом $\mathbf{M}$? Ответ дать в сферических координатах.

10.307. Получить формулу замены переменных (см. задачу 10.278) для производной $\delta(x)$, $x \in \mathbb{R}^n$:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \delta(x - x_0) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial}{\partial \xi_j} \frac{\delta(\xi - \xi_0)}{I(\xi)}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

10.308. В точке $(x = r_0 > 0; y = 0) \in \mathbb{R}^2$ расположен диполь, момент которого: 1) $p_0 \mathbf{e}_x$; 2) $p_0 \mathbf{e}_y$. Записать плотность заряда в полярных координатах.

10.309. В точке $(x = r_0 > 0; y = z = 0) \in \mathbb{R}^3$ расположен диполь, момент которого $p_0 \mathbf{e}_x$. Записать объемную плотность заряда в: 1) цилиндрических; 2) сферических координатах.

10.310. Решить предыдущую задачу для диполя $p_0 \mathbf{e}_y$.

10.311. Решить задачу 10.309 для диполя $p_0 \mathbf{e}_z$.

10.312. Линейная плотность дипольного момента кольца $\{x, y, z: x^2 + y^2 = r_0^2, z = 0\}$ равна $p(\varphi) \mathbf{e}_z$. Какова объемная плотность заряда в сферических координатах?

10.313. Для кольца из предыдущей задачи найти объемную плотность заряда в цилиндрических координатах.

Пример 10.14. Определение обобщенного дифференциального оператора. Для оператора (10.26), определенного на функциях класса $C^2(\Omega) \cap C^1(\bar{\Omega})$, где Ω — ограниченная область в $\mathbb{R}^n$ с кусочно-гладкой границей S , справедлива 2-я формула Грина

$$\int_{\Omega} \rho \mathcal{L} u v \, dx - \int_{\Omega} \rho \mathcal{L} v u \, dx = \int_S p \left(u \frac{\partial v}{\partial n} - v \frac{\partial u}{\partial n} \right) ds. \quad (10.37)$$

На этой формуле основано определение обобщенного оператора. Пусть $f \in \mathcal{D}'(\bar{\Omega})$, $A_0(x)$ и $A_1(x)$ — непрерывные на S функции; обобщенным оператором $\rho \mathcal{L}$ на функциях f называется функционал, действующий по правилу

$$(\rho \mathcal{L} f, \psi) = (f, \rho \mathcal{L} \psi) + \int_S p \left(A_0 \frac{\partial \psi}{\partial n} - A_1 \psi \right) ds, \quad (10.38)$$

где $\psi \in \mathcal{D}(\bar{\Omega})$. Это определение можно записать в форме (10.37), если обозначить $A_0(x) = f|_S$, $A_1(x) = \frac{\partial f}{\partial n}|_S$:

$$(\rho \mathcal{L} f, \psi) = (f, \rho \mathcal{L} \psi) + \int_S p \left(f|_S \frac{\partial \psi}{\partial n} - \frac{\partial f}{\partial n}|_S \psi \right) ds. \quad (10.39)$$

Частный случай. Функция $f(x) \in C^2(\Omega)$, и существуют непрерывные продолжения f и Df на $\overline{\Omega}$ (предельные значения $f|_{S^-}$ и $\left.\frac{\partial f}{\partial n}\right|_{S^-}$ (см. (10.20)) не обязательно совпадают с $f|_S$ и $\left.\frac{\partial f}{\partial n}\right|_S$, так как последние две функции могут быть заданы произвольно). Преобразование интеграла $(f, \rho \mathcal{L} \psi)$ в соотношении (10.39) с помощью формулы Грина (10.37) приводит к следующему результату:

$$(\rho \mathcal{L} f, \psi) = \left(\{ \rho \mathcal{L} f \} - \frac{\partial}{\partial n} (p[f]_S \delta_S) - p \left[\frac{\partial f}{\partial n} \right]_S \delta_S, \psi \right),$$

где $[f]_S = f|_S - f|_{S^-}$ и т. д. Из полученного равенства (оно справедливо при любой $\psi \in \mathcal{D}(\overline{\Omega})$) следует, что

$$\rho \mathcal{L} f = \{ \rho \mathcal{L} f \} - \frac{\partial}{\partial n} (p[f]_S \delta_S) - p \left[\frac{\partial f}{\partial n} \right]_S \delta_S.$$

10.314. Дана функция $f(x) \in C^2(B)$, где $B \subset \mathbb{R}^n$ — шар, радиус которого r_0 ; существуют непрерывные продолжения f и Df на $\overline{B} = B \cup S$; на сфере S определены функции $A_0(x) = f|_S$ и $A_1(x) = \left.\frac{\partial f}{\partial n}\right|_S$ класса C . Доказать, что обобщенный оператор Лапласа,

$$\Delta f = \{ \Delta f \} + [f]_S \cdot \delta'(r - r_0) + \left[\frac{\partial f}{\partial r} \right]_S \cdot \delta(r - r_0). \quad (10.40)$$

10.315. Функция f определена в круге $B \in \mathbb{R}^2$, радиус которого r_0 , $f|_S = 0$, $\left.\frac{\partial f}{\partial n}\right|_S = 0$, где $S = \partial B$; вычислить обобщенный оператор Лапласа Δf , если:

$$1) f = r^2; \quad 2) f = r^n \sin n\varphi, \quad n \in \mathbb{N}; \quad 3) f = \ln r.$$

10.316. Функция f определена в шаре $B \in \mathbb{R}^3$, радиус которого r_0 , $f|_S = 0$, $\left.\frac{\partial f}{\partial n}\right|_S = 0$, где $S = \partial B$. Вычислить обобщенный оператор Лапласа Δf , если:

$$1) f = 1; \quad 2) f = r_0^2 - r^2; \quad 3) f = r \sin \theta \cos \varphi; \quad 4) f = \frac{1}{r}; \quad 5) f = r.$$

10.317. В шаре $B \in \mathbb{R}^3$, радиус которого r_0 , заданы функции

$$\begin{aligned} 1) f(r) &= r, \quad f|_{r_0} = 0, \quad \left.\frac{\partial f}{\partial r}\right|_{r_0} = 1; \\ 2) f(r) &= \frac{1}{r}, \quad f|_{r_0} = 0, \quad \left.\frac{\partial f}{\partial r}\right|_{r_0} = -\frac{1}{r_0^2}. \end{aligned}$$

Вычислить обобщенный оператор Лапласа Δf .

10.318. Пусть Ω — ограниченная область в $\mathbb{R}^n$ с кусочно-гладкой границей S , $H = \{x, t : x \in \Omega, 0 < t\}$; доказать, что в H задачи а) и б) для функции $u(x, t)$ эквивалентны.

$$1 \text{ а) } \rho u_{tt} = -\rho \mathcal{L}u + F(x, t), \\ u|_S = \mu(x, t), \quad u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0;$$

$$1 \text{ б) } \rho u_{tt} = -\rho \mathcal{L}u + F(x, t) + \frac{\partial}{\partial n}(p\mu\delta_S), \\ u|_S = 0, \quad u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0.$$

$$2 \text{ а) } \rho u_{tt} = -\rho \mathcal{L}u + F(x, t), \\ \frac{\partial u}{\partial n}\Big|_S = \mu(x, t), \quad u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0;$$

$$2 \text{ б) } \rho u_{tt} = -\rho \mathcal{L}u + F(x, t) + p\mu\delta_S, \\ \frac{\partial u}{\partial n}\Big|_S = 0, \quad u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0.$$

$$3 \text{ а) } \rho u_{tt} = -\rho \mathcal{L}u + F(x, t), \\ \left(\alpha u + \beta \frac{\partial u}{\partial n}\right)\Big|_S = \mu(x, t), \quad u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0;$$

$$3 \text{ б) } \rho u_{tt} = -\rho \mathcal{L}u + F(x, t) + \frac{\partial}{\partial n}(pA\delta_S) + pB\delta_S, \\ \left(\alpha u + \beta \frac{\partial u}{\partial n}\right)\Big|_S = 0, \quad u(x, 0) = u_t(0) = 0$$

при условии $\alpha A(x, t) + \beta B(x, t) = \mu(x, t)$.

10.319. Дана ограниченная область $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ с кусочно-гладкой границей S ; на S заданы функции $\alpha(x)$ и $\beta(x)$, такие что

$$\alpha \in C(S), \quad \beta \in C(S), \quad \alpha \geq 0, \quad \beta \geq 0, \quad \alpha + \beta > 0. \quad (10.41)$$

Оператор $\mathcal{L}$ (10.26), определенный на множестве $\mathcal{M}_{\mathcal{L}}$ функций $u(x, t)$ класса $C^2(\overline{\Omega})$, удовлетворяющих условию

$$\left(\alpha u + \beta \frac{\partial u}{\partial n}\right)\Big|_S = 0, \quad (10.42)$$

эрмитов (см. [15]), т. е.

$$\forall u, v \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}: (\rho \mathcal{L}v, u) = (v, \rho \mathcal{L}u). \quad (10.43)$$

Пусть $\mathcal{M}_{\mathcal{L}}^0$ — множество функций $f(x) \in D'(\overline{\Omega})$ и непрерывных на S функций $f|_S$ и $\frac{\partial f}{\partial n}\Big|_S$, связанных условием (10.42). Доказать, что

$$\forall f \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}^0, \quad \forall u \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}: (f, \rho \mathcal{L}u) = (\rho \mathcal{L}f, u). \quad (10.44)$$

10.320. Существуют положительные значения $\lambda_1, \lambda_2, \dots$, которым соответствуют нетривиальные сферически симметричные решения $u_1, u_2, \dots$ задачи

$$\begin{aligned} \Delta u(x) + \lambda u(x) &= 0, \quad x \in B, \\ \left(\alpha u + \beta \frac{\partial u}{\partial r} \right) \Big|_S &= 0, \quad r = |x|, \end{aligned} \quad (10.45)$$

где $B \subset \mathbb{R}^3$ — шар, радиус которого r_0 , $S = \partial B$, функции $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ удовлетворяют условиям (10.41). При $\beta = 0$ вычислить интеграл $\int_B f(x) u_n(x) dx$, если: 1) $f = 1 - \frac{r^2}{r_0^2}$; 2) $f = \frac{1}{r}$; 3) $f = r$.

10.321. Функция u_n — нетривиальное сферически симметричное решение задачи (10.45), соответствующее значению $\lambda_n > 0$. При $\alpha = 0$ вычислить интеграл $I_n = \int_B (r - r_0)^2 u_n dx$.

10.322. Вычислить интеграл $I_n = \int_B \left(1 - \frac{r_0}{r}\right) u_n dx$, где $u_n(x)$ — нетривиальное сферически симметричное решение задачи (10.45) при постоянных значениях $\alpha = h$, $\beta = 1$.

10.323. Пусть $B \subset \mathbb{R}^2$ — круг, радиус которого r_0 , $S = \partial B$. Функция $f(x)$ класса $C^2(B \setminus \{x_0\}) \cap C^1(\overline{B} \setminus \{x_0\})$ удовлетворяет уравнению Пуассона $\Delta f(x) = -a\delta(x - x_0)$, $x \in B$, $x_0 \in B$, и граничным условиям (10.42), а функция $u(x) \in C^2(B) \cup C^1(\overline{B})$ — нетривиальное решение уравнения $\Delta u(x) + \lambda u(x) = 0$, $x \in B$, $\lambda > 0$, удовлетворяющее тому же граничному условию. Вычислить интеграл $\int_B f(x) u(x) dx$.

10.324. При построении интегрального преобразования Ганкеля (см. [20]) с ядром $r J_n(r)$, $n \in \mathbb{N}_0$, вводится пространство $\mathcal{H}_n$ основных функций

$$\psi(\lambda) = \int_0^\infty \varphi(r) J_n(\lambda r) r dr, \quad \varphi(r) \in \mathcal{D}(\overline{\mathbb{R}}_+).$$

Последовательность $\{\psi_k(\lambda)\} \subset \mathcal{H}_n$ называется сходящейся, если сходится последовательность $\{\varphi_k\} \subset \mathcal{D}(\overline{\mathbb{R}}_+)$. Доказать, что

$$\psi(\lambda) \in C^\infty(\overline{\mathbb{R}}_+), \quad \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \lambda \psi(\lambda) = 0.$$

10.325. Всякий линейный непрерывный функционал на пространстве $\mathcal{H}_n$ называется обобщенной функцией, множество ко-

торых обозначается символом $\mathcal{H}'_n$. Пусть $f(r)$ — локально интегрируемая функция на $(0, \infty)$ и

$$\int_0^{\infty} |f| \sqrt{r} \, dr < \infty.$$

Доказать, что функционал f , заданный соотношением

$$(f(r), r\psi(r)) = \int_0^{\infty} f(r) \psi(r) r \, dr, \quad \psi(r) \in \mathcal{H}_n,$$

принадлежит пространству $\mathcal{H}'_n$.

10.326. Доказать, что функционал $\frac{1}{r}\delta(r - r_0)$, действующий по правилу

$$\left(\frac{1}{r}\delta(r - r_0), r\psi(r)\right) = \psi(r_0), \quad \psi \in \mathcal{H}_n, \quad r_0 \geq 0,$$

принадлежит пространству $\mathcal{H}'_n$.

10.4. Ответы

10.1. 1); 4).

10.2. 1) $[0; 1]$; 2) $\left[\frac{1}{2}; 1\right]$; 3) $\left[\frac{2}{3}; 1\right]$; 4) $\{0\}$.

10.3. 1); 2).

10.4. 1); 2); 4).

10.5. 1); 4).

10.9. У к а з а н и е. Доказать, что каждый из составляющих интервалов множества A_1 войдет в один из составляющих интервалов множества A_2 и воспользоваться свойством 1.2.

10.10. $\mu(B) = \sum_{k=1}^N (b_k - a_k)$. У к а з а н и е. Применить определение 1.5, где $S = [b_N - a_1]$.

10.11. Р е ш е н и е. Промежутки $S = [a; b]$ и $\Delta = (a_1; b_1)$ изображены на рис. 10.2, руководствуясь которым можно составить систему

$$\begin{cases} S = B \cup C_S B, \\ \Delta = B \cup C_\Delta B, \\ \Delta = S \cup C_\Delta S, \end{cases} \implies \begin{cases} S = B \cup C_S B, \\ B \cup C_\Delta B = S \cup C_\Delta S, \end{cases} \implies C_\Delta B = C_S B \cup C_\Delta S.$$

По свойству 1.5 $\mu(C_\Delta B) = \mu(C_S B) + \mu(C_\Delta S)$, или $\mu(C_\Delta B) = \mu(C_S B) + a - a_1 + b_1 - a$. Так как $b_1 - a_1 = \mu(\Delta)$, а $\mu(B) = b_1 - a_1 - \mu(C_S B)$, то отсюда следует результат.



Рис. 10.2

10.12. У к а з а н и е. Применить свойство 1.7.

10.13. Р е ш е н и е. Пусть интервал Δ содержит множество A . Этот интервал можно представить в виде $\Delta = B \cup C_\Delta B$, а так как $B \subset A \subset \Delta$, то также в виде $\Delta = A \cup C_\Delta B$. На основании свойства 1.3 $\mu(\Delta) \leq \mu(A) + \mu(C_\Delta B)$ и свойства 1.7 $\mu(B) = \mu(A) + \mu(C_\Delta B)$, откуда следует требуемое неравенство.

10.14. Р е ш е н и е. Необходимо показать, что

$$\forall \varepsilon > 0 \exists A \supset B: \mu(A) < \mu(B) + \varepsilon.$$

Пусть интервал Δ содержит множество B . Согласно свойству 1.11 для любого $\varepsilon > 0$ существует замкнутое множество $\tilde{B}$ такое, что

$$\tilde{B} \subset C_\Delta B, \mu(\tilde{B}) > \mu(C_\Delta B) - \varepsilon.$$

Открытое множество $A = C_\Delta \tilde{B}$ содержит B , и

$$\mu(A) = \mu(\Delta) - \mu(\tilde{B}) < \mu(\Delta) - \mu(C_\Delta B) + \varepsilon = \mu(B) + \varepsilon.$$

10.16. У к а з а н и е. Достаточно показать, что внешняя мера каждого из множеств меньше ε .

10.19. У к а з а н и е. Применить свойства 1.4 и 1.11.

10.20. У к а з а н и е. Применить свойства 1.9 и 1.12.

10.21. $\mu(E) = \mu(E_1) - \mu(E_2)$.

10.22. $\mu(G_0) = 1$.

10.23. Множество измеримо, его мера равна нулю.

10.24. $\mu(P_0) = 0$.

10.25. $\mu(E) = \frac{\pi}{6}$.

10.26. $\mu_1 = \mu_2 = 0$.

10.27. Да.

10.28. Да.

10.29. Да.

10.30. Р е ш е н и е. Пусть $A = \{x \in X: f(x) = g(x)\}$, $E = \{x \in X: f(x) \neq g(x)\}$, тогда множество $A = X \setminus E$ измеримо (свойство 1.20), следовательно, $f(x)$ измерима на A . Стало быть, $g(x)$, равная $f(x)$ на A , измерима на A . Поскольку $g(x)$ измерима на E (свойство 2.1), то она измерима на $X = A \cup E$.

10.31. У к а з а н и е. Применить свойства 2.2, 2.3.

10.32. Да.

10.33. Да.

10.34. Да.

10.35. Да.

10.36. 1) Да; 2) да.

10.37. 1) Да; 2) да.

10.38. У к а з а н и е. Показать, что множество $B = \{x \in X: f(x) \leq a\}$ замкнуто и применить соотношение $E(f > a) = X \setminus E(f \leq a)$.

10.39. Р е ш е н и е вытекает из соотношений: 1) $E(f = a) = E(f \geq a) \setminus E(f > a)$; 2) $E(f \leq a) = X \setminus E(f > a)$; 3) $E(f < a) = X \setminus E(f \geq a)$.

10.40. Р е ш е н и е. Эквивалентность следует из соотношений:

$$\begin{aligned} E(f \geq a) &= \bigcap_{n=1}^{\infty} E_n\left(f > a - \frac{1}{n}\right); & E(f < a) &= X \setminus E(f \geq a); \\ E(f \leq a) &= \bigcap_{n=1}^{\infty} E_n\left(f < a + \frac{1}{n}\right); & E(f > a) &= X \setminus E(f < a). \end{aligned}$$

10.42. Р е ш е н и е, п. 1. $E(|f| > a) = \begin{cases} X, & a < 0, \\ E(f > a) \cup E(f < -a), & a \geq 0. \end{cases}$

10.43. Измерима. Р е ш е н и е:

$$E\left(\frac{1}{f} > a\right) = \begin{cases} E(f > 0), & a = 0, \\ E(f > 0 \cap E\left(f < \frac{1}{a}\right)), & a > 0, \\ E(f > 0) \cup E(f < 0) \cap E\left(f < \frac{1}{a}\right), & a < 0. \end{cases}$$

10.45. Р е ш е н и е п. 1. Функция $g(x) + a$ измерима (задача 10.40, п. 1) и $E(f - g > a) = E(f > g + a)$, где множество $E(f > g + a)$ измеримо (свойство 2.7). У к а з а н и е п. 3. Применить тождество $f \cdot g = \frac{1}{4}[(f + g)^2 - (f - g)^2]$ и решение задачи 10.41 п. 2.

10.49. Р е ш е н и е. Функция $f(y)$ измерима (свойство 2.4), а множество значений y , при которых $f(y) > a$, в силу непрерывности $f(y)$, открыто и представимо в виде (свойство 1.1)

$$\{y: f > a\} = \bigcup_k \delta_k, \text{ где } \delta_k = \{y: \alpha_k < y < \beta_k\}.$$

Пусть $\delta_k \xrightarrow{f} \Delta_k = \{x: \alpha_k < x < \beta_k\}$, тогда $E(h > a) = E(g(f) > a) = \bigcup_k \{y: \alpha_k < y < \beta_k\} = \bigcup_k \{x: \alpha_k < x < \beta_k\}$ — измеримое множество.

10.50. У к а з а н и е. Решить задачу, аналогичную задаче 10.49; аналогом интервала является открытый прямоугольник.

10.51. Р е ш е н и е. $E(\sup_n f_n(x) > a) = \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n(f > a)$, $E(\inf_n f_n(x) < a) = \bigcap_{n=1}^{\infty} E_n(f < a)$; см. также задачу 10.39.

10.53. Р е ш е н и е. Пусть $\tilde{f}(x)$ — дифференцируемое продолжение функции $f(x)$ на отрезок $[0; 2]$:

$$\tilde{f}(x) = \begin{cases} f(x), & x \in [0; 1], \\ f(1) - f'(1) + xf'(1), & x \in [1; 2]. \end{cases}$$

Для любого $x \in [0; 1]$ последовательность

$$\varphi_n(x) = n \left[\tilde{f}\left(x + \frac{1}{n}\right) - \tilde{f}_n(x) \right] \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \tilde{f}'(x) = f'(x).$$

Таким образом, функция $f'(x)$ является пределом последовательности непрерывных, следовательно, измеримых функций (свойство 2.4), а потому измерима (свойство 2.8).

10.54. У к а з а н и е. Применить свойство 2.8.

10.56. Р е ш е н и е. Пусть $\tilde{B} < B$, $E \subset [A; \tilde{B}]$. Если разбиение отрезка $[A; B]$ выполнить так, что $\tilde{B} = y_m$, $m < n$ — точка деления, то $\mu(E_i) = 0$, $i \geq m + 1$, и задача сводится к решенной.

10.57. Р е ш е н и е. Из неравенства $A \leq f(x) \leq B$ следуют неравенства

$$A \sum_{k=0} \mu(E_k) \leq \sum_{k=0} y_k \mu(E_k) \leq B \sum_{k=0} \mu(E_k) \implies A\mu(X) \leq S \leq \mu(X),$$

и остается перейти к пределу при $\lambda \rightarrow 0$.

10.58. $c\mu(X)$.

10.60. Интеграл равен нулю.

10.61. У к а з а н и е. Воспользоваться определением интеграла как предела интегральных сумм.

10.62. Интегралы равны. Р е ш е н и е. Пусть $Y = E(f \neq g)$, $Z = E(f = g)$. Так как $\mu(Y) = 0$, $X = Y \cup Z$, $Y \cap Z = \emptyset$, то

$$\int_Y f(x)dx = \int_Y g(x)dx = 0, \quad \int_Z f(x)dx = \int_Z g(x)dx.$$

Отсюда, в силу аддитивности интеграла (см. задачу 10.61), следует результат.

10.63. У к а з а н и е. Применить соотношение $E(f > 0) = \bigcup_{n=1}^{\infty} E\left(f > \frac{1}{n}\right)$.

10.64. У к а з а н и е. Воспользоваться определением интеграла как предела интегральных сумм.

10.66. У к а з а н и е. Применить теорему о среднем (см. задачу 10.57) к разности функций.

10.67. Р е ш е н и е. Пусть $Y = E(f \leq 0)$, $Z = E(f < 0)$, $\int_Y |f(x)|dx = I_1 \geq 0$, $\int_Z |f(x)|dx = I_2 \geq 0$, тогда

$$\begin{cases} \int_X f(x)dx = \int_Y f(x)dx - \int_Z |f(x)|dx = I_1 - I_2, \\ \int_X |f(x)|dx = \int_Y |f(x)|dx + \int_Z |f(x)|dx = I_1 + I_2, \end{cases}$$

откуда следует $|I_1 - I_2| \leq I_1 + I_2$.

10.68. У к а з а н и е. Применить определение интеграла как предела интегральных сумм.

10.69. У к а з а н и е. Применить критерий интегрируемости по Риману, используя суммы Дарбу.

10.70. Интеграл равен нулю.

10.71. 1) $\frac{1}{4}$; 2) 1; 3) 0.

10.72. 1) 1; 2) 1.

10.73. 1) $1 - 2 \ln 2$; 2) $3\left(1 - \frac{\pi}{4}\right)$. У к а з а н и е. См. задачи 10.58, 10.61.

10.74. 1) $2(1 + \mathbf{G})$, $\mathbf{G} \approx 0,916$ — постоянная Каталана; 2) $1 - \frac{\pi^2}{12}$.

10.75. 1.

10.77. Решение. Пусть $X = E(f = \infty)$, $Y = E \setminus X$, тогда $X \cup Y = E$, $X \cap Y = \emptyset$ и

$$\int_E [f(x)]_N dx = \int_X [f(x)]_N dx + \int_Y [f(x)]_N dx = \int_X N dx + \int_Y [f(x)]_N dx \geq N\mu(X).$$

Ограниченность произведения $N\mu(X)$ при $N \rightarrow \infty$ возможна, если $\mu(X) = 0$.

10.78. Решение. Из неравенств

$$0 \leq \int_E [f(x)]_1 dx \leq \int_E f(x) dx = 0$$

следует, что $[f(x)]_1 \sim 0$. Функция $[f(x)]_1$ принимает одно из двух значений: $f(x)$, 1; следовательно в точках, где $[f(x)]_1 = 0$, равна нулю и $f(x)$.

10.82. Решение. Из неравенства

$$[f_1(x)]_N + [f_2(x)]_N \leq f_1(x) + f_2(x) = f(x)$$

после интегрирования и перехода к пределу при $N \rightarrow \infty$ получается оценка

$$\int_E f_1(x) dx + \int_E f_2(x) dx \leq \int_E f(x) dx.$$

Для завершения решения достаточно установить обратное неравенство. Если $f_1(x) \leq N$ и $f_2(x) \leq N$, то

$$[f(x)]_N \leq f(x) = f_1(x) + f_2(x) \leq [f_1(x)]_N + [f_2(x)]_N.$$

Если одна из функций больше N , пусть $f_1(x) > N$, то $[f_1(x)]_N = N$, $[f_2(x)]_N \geq 0$, так что

$$[f(x)]_N = N \leq [f_1(x)]_N + [f_2(x)]_N.$$

Итак, в любом случае

$$[f(x)]_N \leq [f_1(x)]_N + [f_2(x)]_N \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \int_E f(x) dx \leq \int_E f_1(x) dx + \int_E f_2(x) dx.$$

10.83. У к а з а н и е. Применить соотношение $[kf]_N = k[f]_{\frac{N}{k}}$.

10.84. 1) Да; интеграл равен $+\infty$; 2) нет.

10.85. Да; интеграл равен нулю.

10.86. У к а з а н и е. $|f(x)| = f_+(x) + f_-(x)$; см. также задачу 10.67.

10.87. У к а з а н и е. Если $f \sim g$, то $f_+ \sim g_+$, $f_- \sim g_-$.

10.89. Р е ш е н и е (фрагменты). 1) Пусть $k \geq 0$; в этом случае $(kf)_+ = kf_+$, $(kf)_- = kf_-$ — ситуация задачи 10.83. 2) Пусть $k = -1$, тогда $(-f)_+ = f_-$, $(-f)_- = f_+$ и

$$\int_E [-f(x)] dx = \int_E f_-(x) dx - \int_E f_+(x) dx = - \int_E f(x) dx.$$

3) Если $k < 0$, то $k = -|k|$ и задача сводится к 1) и 2).

10.91. 1) Да; интеграл равен $+\infty$; 2) нет.

10.92. 1) Существует интеграл в смысле главного значения, равный нулю; 2) нет.

10.93. Нет.

10.94. Да.

10.95. 1) $\frac{e}{e-1}$; 2) 1; 3) e .

10.96. 1) Интеграл условно сходится и равен $\pi/2$; 2) нет.

Решение 2). Если функция суммируема, то сходится интеграл функции $|f(x)|$. В данном случае интеграл

$$\int_0^{\infty} \left| \frac{\sin x}{x} \right| dx = \sum_{n=0}^{\infty} \int_{\pi n}^{\pi(n+1)} \left| \frac{\sin x}{x} \right| dx = \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\pi} \frac{\sin \xi}{\xi + \pi n} d\xi > \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\pi(n+1)} \int_0^{\pi} \sin \xi d\xi =$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{\pi(n+1)} \text{ расходится.}$$

10.97. 1) Нет; 2) нет.

10.98. Нет.

10.99. Нет.

10.100. Да.

10.101. Решение. Пусть $a_1 = \alpha_1 f_1$, $a_2 = \alpha_2 f_2$, тогда

$$|\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2|^2 = |a_1 + a_2|^2 = (a_1 + a_2)(\bar{a}_1 + \bar{a}_2) = |a_1|^2 + \bar{a}_1 a_2 + a_1 \bar{a}_2 + |a_2|^2 \leq |a_1|^2 + |a_1||a_2| + |a_2|^2 \leq 2(|a_1|^2 + |a_2|^2) = 2(|\alpha_1|^2 |f_1|^2 + |\alpha_2|^2 |f_2|^2).$$

В конце преобразований применено неравенство между средним арифметическим и средним геометрическим двух неотрицательных чисел:

$$\frac{|a_1| + |a_2|}{2} \geq \sqrt{|a_1||a_2|}.$$

10.102. Решение. Пусть ξ — вещественное число. Если $f \in L_2$, $g \in L_2$, то в силу линейности L_2 линейная комбинация $\xi|f| + |g| \in L_2$. Следовательно,

$$0 \leq \|\xi|f| + |g|\|^2 = \xi^2 \|f\|^2 + 2|f||g| + \|g\|^2.$$

Поскольку квадратный трехчлен относительно ξ не меняет знак, то его дискриминант не положителен:

$$(2|f||g|)^2 - 4\|f\|^2\|g\|^2 \leq 0 \implies |(f, g)| \leq \|f\|\|g\|.$$

10.103. Решение. Неравенство можно записать в виде $\|f + g\| \leq \|f\| + \|g\|$, тогда

$$\|f + g\|^2 = (f + g, f + g) = \|f\|^2 + (f, g) + (g, f) + \|g\|^2 \leq \|f\|^2 + 2|(f, g)| + \|g\|^2 \leq \|f\|^2 + 2\|f\|\|g\| + \|g\|^2 = (\|f\| + \|g\|)^2, \text{ откуда следует требуемое неравенство.}$$

10.105. Решение. Пространству $C^2[-1; 1]$ принадлежит последовательность функций

$$f_n(x) = \begin{cases} -1, & -1 \leq x \leq -\frac{1}{n}, \\ nx, & -\frac{1}{n} < x \leq \frac{1}{n}, \\ 1, & \frac{1}{n} < x \leq 1. \end{cases}$$

Эта последовательность фундаментальна, так как

$$\int_{-1}^1 (\varphi_m(x) - \varphi_n(x))^2 dx = \frac{2}{\min(m, n)},$$

но она не сходится ни к какой функции $f(x) \in C^2[-1; 1]$. В самом деле, пусть $\psi(x) = \text{sign } x$, $x \in [-1; 1]$, тогда в результате применения неравенство Минковского

$$\left(\int_{-1}^1 (f(x) - \psi(x))^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\int_{-1}^1 (f(x) - \varphi_n(x))^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} + (\varphi_n(x) - \psi(x))^2 dx)^{\frac{1}{2}}.$$

Поскольку $f(x)$ — непрерывная функция, разность $f(x) - \psi(x)$ не равна тождественно нулю, так что интеграл слева положителен. Интеграл во втором слагаемом справа стремится к нулю при $n \rightarrow \infty$. Следовательно, первый интеграл справа не стремится к нулю.

10.109. 2) Нет.

10.110. 2) Да.

10.111. Решение п. 2. Пусть $x_0 \in (0; 1]$. При каждом k промежуток $(0; 1]$ разделен на k промежутков $\left(\frac{i-1}{k}; \frac{i}{k}\right]$, в один из которых попадает x_0 . Соответствующие i_0 и k определяют такое n , что $\varphi_n(x_0) = 1$. При $i \neq i_0$ и при том же k соответствующий член последовательности $\varphi_m(x_0) = 0$. Таким образом, в последовательности $\{\varphi_n(x_0)\}$ имеются подпоследовательности из единиц и из нулей, что означает отсутствие предела.

10.112. Да.

10.113. Да.

10.115. Решение. $|(f_n - f, g)| \leq \|g\| \|f_n - f\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$.

10.116. Указание. Применить теорему Лузина (свойство 2.10).

10.117. Указание. Применить теорему Вейерштрасса: для любой непрерывной на $[a; b]$ функции $f(x)$ и для любого $\varepsilon > 0$ существует такой многочлен $P(x)$, что $|f(x) - P(x)| < \varepsilon$.

10.118. Решение (фрагменты). Пусть $f(x) \in L_2(E)$. 1) Согласно теореме Лузина (свойство 2.10) существует такая $\varphi(x) \in C(E)$, что $\|f(x) - \varphi(x)\| < \frac{\varepsilon}{2}$.

2) Можно построить непрерывную периодическую функцию

$$\psi(x) = \begin{cases} \varphi(x), & x \in [-\pi + \delta; \pi], \\ \varphi(\pi), & x = -\pi, \\ \text{линейная функция,} & x \in [-\pi; -\pi + \delta], \end{cases}$$

отсюда следует, что при надлежащем δ $\|\varphi(x) - \psi\| < \frac{\varepsilon}{4}$.

3) По теореме Вейерштрасса (об аппроксимации тригонометрическими многочленами) для любой функции $\psi(x) \in C[-\pi; \pi]$, удовлетворяющей условию $\psi(-\pi) = \psi(\pi)$, найдется такой тригонометрический многочлен $T(x)$, что $|\psi(x) - T(x)| < \frac{\varepsilon}{4\sqrt{2\pi}}$. Из полученных оценок в 1), 2), 3) вытекает неравенство $\|f(x) - T(x)\| < \varepsilon$, которое завершает решение.

10.120. Указание. Применить обобщенную формулу замкнутости (задача 10.119), в которой $g(x)$ — характеристическая функция множества ΔE (задача 10.46).

10.121. Решение. Нужно доказать, что

$$\forall x^k: \|x^k - S_n(x^k)\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \implies \forall f \in L_2: \|f - S_n(f)\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0,$$

и применить свойство 5.4. Вследствие неравенства Минковского

$$\|P - S_n(P)\| = \left\| \sum_{k=1}^m a_k(x^k - S_n(x^k)) \right\| \leq \sum_{k=1}^m |a_k| \|x^k - S_n(x^k)\|.$$

Каждое слагаемое конечной суммы стремится к нулю, так что формула замкнутости установлена для любого многочлена, множество которых всюду плотно в L_2 (задача 10.117).

10.122. У к а з а н и е. Воспользоваться свойством 5.5.

10.123. У к а з а н и е. Воспользоваться свойством 5.5.

10.124. У к а з а н и е. Показать, что x^n есть (конечная) линейная комбинация полиномов Лежандра.

10.125. 1) $[0, \infty)$; 2) $(-\infty, \infty)$; 3) $[-a, 0]$ при $a \leq 1$, $[-a, 0] \cup [1, a]$ при $a > 1$.

10.126. $\text{supp } \varphi = \{x: |x_j| \leq \varepsilon_j, j = \overline{1, n}\}.$

10.127. $h(x) \in C^\infty(\mathbb{R}^n).$

10.131. Нет.

10.132. Сходятся к: 1) $h(x) \varphi(x)$; 2) $\varphi(Ax + b).$

10.134. Р е ш е н и е. По определению

$$k(x) = \int_{\Omega_\varepsilon} \omega_\varepsilon(x - y) dy.$$

Так как Ω — ограниченная область, а $\omega_\varepsilon(x) \in C^\infty$, то

$$D^\alpha \kappa(x) = D_x^\alpha \int_{\Omega_\varepsilon} \omega_\varepsilon(x - y) dy = \int_{\Omega_\varepsilon} D_x^\alpha \omega_\varepsilon(x - y) dy \in C^\infty.$$

Поскольку $\omega_\varepsilon(x) \geq 0$, то $\kappa(x) \geq 0$. Если $x \in \Omega$, то (рис. 10.3) $\text{supp } \omega_\varepsilon(x - y) = \overline{B}(x, \varepsilon) \subset \Omega_\varepsilon$, следовательно,

$$\kappa(x) = \int_B (x, \varepsilon) \omega_\varepsilon(x - y) dy = \int_{B_\varepsilon} \omega_\varepsilon(\xi) d\xi = 1;$$

если $x \in \Omega_\varepsilon \setminus \Omega$, то $B(x, \varepsilon) \subseteq \Omega_\varepsilon$, поэтому

$$\kappa(x) \leq \int_B (x, \varepsilon) \omega_\varepsilon(x - y) dy = 1;$$

если $x \notin \Omega_\varepsilon$, то $\chi(x) = 0$ и $\kappa(x) = 0$.

10.135. Р е ш е н и е. Сходимость следует из равномерных оценок:

$$\exists k_0 \forall k > k_0: \begin{cases} \varphi_k(x) = \kappa\left(\frac{x}{k}\right) = 1, \\ |D^\alpha \varphi_k(x)| = \frac{1}{k^{|\alpha|}} |D^\alpha \kappa(t)|_{t=\frac{x}{k}} \leq \frac{M_\alpha}{k^{|\alpha|}}. \end{cases}$$

10.137. 1) $(f, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi dx$; 2) $(f, \varphi) = \int_0^{\infty} \varphi dx$; 3) $(f, \varphi) = \int_0^{\pi} \sin x \varphi(x) dx$.

10.139. Р е ш е н и е. Линейность: по определению δ -функции

$$(\delta, \mu_1 \varphi_1 + \mu_2 \varphi_2) = \mu_1 \varphi_1(0) + \mu_2 \varphi_2(0) = \mu_1 (\delta, \varphi_1) + \mu_2 (\delta, \varphi_2).$$

Непрерывность: при $k \rightarrow \infty$.

$$(\delta, \varphi_k) = \varphi_k(0) \rightarrow \varphi(0) = (\delta, \varphi).$$

Сингулярность: если бы существовала такая локально интегрируемая в пространстве $\mathbb{R}^n$ функция $f(x)$, что $\int f(x) \varphi(x) dx = \varphi(0)$, то для $\varphi(x) = \omega_\varepsilon(x)$, где ε достаточно мало,

$$\omega_\varepsilon(0) = \left| \int f(x) \omega_\varepsilon(x) dx \right| \leq \omega_\varepsilon(0) \int_{B_\varepsilon} |f| dx < \omega_\varepsilon(0);$$

второе неравенство — следствие локальной интегрируемости: $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{B_\varepsilon} |f| dx = 0$.

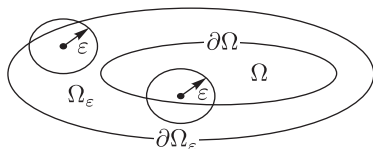


Рис. 10.3

10.140. Р е ш е н и е. Линейность вытекает из линейности интеграла. Непрерывность: пусть $\varphi_k \rightarrow \varphi$, $\text{supp } \varphi_k \subset B_r$, тогда при $k \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned} \left| \left(\mathcal{P} \frac{1}{x}, \varphi_k \right) - \left(\mathcal{P} \frac{1}{x}, \varphi \right) \right| &= \left| \int_0^r \frac{\varphi_k(x) - \varphi(x) - (\varphi_k(-x) - \varphi(-x))}{x} dx \right| = \\ &= \left| \int_0^r \frac{\varphi'_k(\tilde{x}) - \varphi'(\tilde{x})}{x} 2x dx \right| \leq 2r \max_{B_r} |\varphi'_k - \varphi'| \rightarrow 0. \end{aligned}$$

Сингулярность: пусть $\varphi(x) = x \omega_\varepsilon(x)$, тогда $\left(\mathcal{P} \frac{1}{x}, x \omega_\varepsilon(x) \right) = \int \omega_\varepsilon(x) dx = 1$; если бы $\mathcal{P} \frac{1}{x} = f(x)$ была локально интегрируемой в $\mathbb{R}$, то при $\varepsilon \rightarrow 0$ (см. решение предыдущей задачи)

$$\left| \int f(x) x \omega_\varepsilon(x) dx \right| \leq \varepsilon \omega_\varepsilon(0) \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} |f(x)| dx = \omega_1(0) \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} |f(x)| dx \rightarrow 0.$$

10.141. 1) $\mathbb{R}$; 2) $[0; \infty)$; 3) $[0, \pi]$; 4) $\{0\}$; 5) $\mathbb{R}$.

10.142. У к а з а н и е. $(\tilde{\delta}, \psi) = (\delta, \varphi)$, где $\varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^n)$, $\psi^{(k)}(0) = \varphi^{(k)}(0)$, $k = 0, 1, \dots, m$.

10.146. Р е ш е н и е. Если $\mathcal{A}x = x$, а $b = -x_0$, то формула замены переменных (10.10) принимает вид $(\delta(x - x_0), \varphi(x)) = (\delta(x), \varphi(x + x_0)) = \varphi(x_0)$, т. е. $(\delta(x - x_0), \varphi(x)) = \varphi(x_0)$.

10.147. Р е ш е н и е. Из соотношений (10.9) и (10.7) следует, что

$$\begin{aligned} (h(x) \delta(x), \varphi(x)) &= (\delta(x), h(x) \varphi(x)) = h(0) \varphi(0) = h(0) (\delta(x), \\ &\varphi(x)) = (h(0) \delta(x), \varphi(x)), \end{aligned}$$

откуда по (10.8) $h(x) \delta(x) = h(0) \delta(x)$.

10.152. У к а з а н и е. Воспользоваться последовательностью (10.2) и определением (10.11).

10.155. $\delta(g(x)) = |h'(0)| \delta(x - h(0))$. У к а з а н и е. В интеграле $(f(g), \varphi) = \int f(g(x)) \varphi(x) dx$, где $f(x)$ — локально интегрируемая функция, сделать замену $g(x) = y$ и полученное соотношение распространить, по определению, на функции $f \in \mathcal{D}'(\mathbb{R})$.

10.156. Р е ш е н и е п.4. Свойство следует из формулы (10.10) и коммутативности прямого произведения:

$$\begin{aligned} ((f \cdot g)(x - x_0, y), \varphi(x, y)) &= ((f \cdot g)(x, y), \varphi(x + x_0, y)) = \\ &= ((g \cdot f)(x, y), \varphi(x + x_0, y)) = (g(y), (f(x), \varphi(x + x_0, y))) = \\ &= (g(y), (f(x - x_0), \varphi(x, y))) = ((g(y) \cdot f(x - x_0), \varphi(x, y))) = \\ &= (f(x - x_0) \cdot g(y), \varphi(x, y)). \end{aligned}$$

10.157. Сходятся к нулю.

10.159. $\pi \delta(x)$.

10.160. $\pi \delta(x)$.

10.162. Существует и равен нулю.

10.163. Существует и равен нулю.

10.167. 1) $q_0 \delta(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0)$; 2) $q_0 \delta(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0) \cdot \delta(z - z_0)$.

10.168. 1) $q(x) \cdot \delta(y - y_0)$; 2) $q(y) \cdot \delta(x) \cdot \delta(z - z_0)$.

10.173. Доказательство. Так как функционал линеен, то

$$\Delta h = h(y + \Delta y) - h(y) = (f, \Delta \varphi).$$

Из непрерывности функционала следует, что

$$\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \Delta h = (f, \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \Delta \varphi) = (f, 0) = 0.$$

Таким образом, $h \in C(\mathbb{R}^n)$. Аналогично проводится доказательство существования производных.

10.174. 1) $\frac{a+b}{\pi[x^2 + (a+b)^2]}$; 2) $\sqrt{\frac{\pi}{\alpha+\beta}} e^{-\frac{\alpha\beta x^2}{\alpha+\beta}}$; $(\alpha|x| + \frac{1}{\alpha})e^{-\alpha|x|}$.

10.175. 1) $(x\eta(x) + \frac{1}{2\alpha})e^{-\alpha x}$; 2) $\frac{\alpha \sin \beta x - \beta \cos \beta x + \beta e^{-\alpha x}}{\alpha^2 + \beta^2}$.

10.180. 1) $\eta(x)x^\alpha$; 2) $\frac{2\eta(x)}{\alpha^2} \sin \frac{\alpha x^2}{2}$; 3) $\eta(x) \frac{2}{\alpha^3} (\alpha x - \sin \alpha x)$;

$$4) \eta(x) \begin{cases} \frac{\beta \operatorname{ch} \alpha x - \alpha \operatorname{sh} \alpha x + \alpha e^{-\beta x}}{\alpha^2 + \beta^2}, & \alpha \neq \beta, \\ \frac{\operatorname{ch} \alpha x - \alpha x e^{-|\alpha|x}}{2|\alpha|}, & \alpha = \beta. \end{cases}$$

10.181. 1) $\begin{cases} \frac{\beta \sin \alpha x - \alpha \sin \beta x}{\beta^2 - \alpha^2}, & \alpha \neq \beta, \\ \frac{\sin \alpha x - \alpha x \cos \alpha x}{2\alpha}, & \alpha = \beta; \end{cases}$ 2) $\begin{cases} \frac{\alpha(\cos \alpha x - \cos \beta x)}{\beta^2 - \alpha^2}, & \alpha \neq \beta, \\ \frac{x \sin \alpha}{2}, & \alpha = \beta; \end{cases}$

$$3) \frac{\beta(\operatorname{ch} \beta x - \cos \alpha x)}{\alpha^2 + \beta^2}; \quad 4) \begin{cases} \frac{\alpha \operatorname{sh} \alpha x - \beta \operatorname{sh} \beta x}{\alpha^2 - \beta^2}, & \alpha \neq \beta, \\ \frac{\operatorname{sh} \alpha x + \alpha x \operatorname{ch} \alpha x}{2\alpha}, & \alpha = \beta. \end{cases}$$

10.182. 1) $\eta(x)xJ_1(x)$; 2) $\eta(x)xJ_0(x)$; 3) $\frac{1}{3}\eta(x)x^2J_2(x)$;

$$4) \eta(x) \cos x; \quad 5) \eta(x)(2J_1(x) - \sin x); \quad 6) \eta(x)x(I_1(x) - \frac{2}{3}xI_2(x)).$$

10.183. 1) $\operatorname{erf} \frac{\alpha}{2\sqrt{x}}$; 2) $\frac{1}{\sqrt{\alpha}} \operatorname{erf}(\alpha\sqrt{x})$; 3) $2\sqrt{\frac{x}{\pi}} e^{-\frac{\alpha^2}{4x}} - \alpha \operatorname{erf} \frac{\alpha}{2\sqrt{x}}$;

$$4) \frac{\sqrt{\pi}}{2} (x + \frac{\alpha^2}{2}) \operatorname{erf} \frac{\alpha}{2\sqrt{x}} - \alpha \sqrt{\frac{x}{\pi}} e^{-\frac{\alpha^2}{4x}}.$$

10.184. $\eta(x)B(\alpha+1, \beta+1)x^{\alpha+\beta+1}$.

10.185. $\eta(x) \begin{cases} \frac{e^{\beta x} - e^{\alpha x}}{\beta - \alpha}, & \alpha \neq \beta, \\ x e^{\alpha x}, & \alpha = \beta. \end{cases}$

10.186. $\frac{x^{\alpha+\beta-1}}{\Gamma(\alpha+\beta)} e^{-\alpha x}$.

10.187. Решение. Пример последовательности, сходящейся в $\mathcal{D}^n$ к 1, дан в задаче 10.135. Если $\psi_k(x, y) \rightarrow 1$ в $\mathbb{R}^{2n}$, то $\psi_k(x, 0) \rightarrow 1$ в $\mathbb{R}^n$, поэтому

$$\begin{aligned} \lim_{k \rightarrow \infty} (f(x) \cdot \delta(y), \psi_k(x, y)\varphi(x+y)) &= \lim_{k \rightarrow \infty} (f(x), (\delta(y), \psi_k(x, y)\varphi(x+y))) = \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} (f(x), \psi_k(x, 0)\varphi(x)) = (f(x), \varphi(x)). \end{aligned}$$

Существование свертки доказано. Коммутативность следует из коммутативности прямого произведения $\delta(x) \cdot f(x)$ (задача 10.166 2)).

10.188. 1) $f(x-a)$; 2) $\delta(x-a-b)$.

10.189. 1) 0; 2) $\frac{\cos \alpha x}{a}$; 3) $\frac{\operatorname{ch} \alpha x}{a}$.

10.195. Сходится к нулю.

10.196. Если $f_k \rightarrow \delta(x)$ (см. пример 10.8 и задачу 10.156), то $f_k^{(m)} \rightarrow \delta^{(m)}$.

10.199. $\delta'(g(x)) = h'(0)|h'(0)|\delta'(x-h(0)) - h''(0)\operatorname{sign} h'\delta(x-h(0))$.

См. указание к задаче 10.155.

10.201. 1) $\sum_{k=0}^m C_m^k D^k \delta(x)$; 2) $\sum_{k=0}^{\lfloor \frac{m-1}{2} \rfloor} (-1)^{k+1} C_m^{2k+1} D^{m-2k-1} \delta(x)$, $\sum_0^{-1} = 0$;
3) $\sum_{k=0}^{\lfloor \frac{m}{2} \rfloor} (-1)^k C_m^{2k} D^{m-2k} \delta(x)$.

10.202. 1) $f = 0$; 2) $f = 0$; 3) $f = -\delta'(x)$; 4) $f = (n+1)\delta(x)$.

10.203 Доказательство. Если $\{x'_l\}$ — точки разрыва $f'(x)$, то

$$\begin{aligned} (f', \varphi) &= -(f, \varphi') = - \int_{-\infty}^{\infty} f \varphi' dx = - \sum_l \int_{x'_l}^{x'_{l+1}} f \varphi' dx = \\ &= - \sum_l \left(f \varphi \Big|_{x'_l}^{x'_{l+1}} - \int_{x'_l}^{x'_{l+1}} \{f'\} \varphi dx \right) = \sum_l [f]_{x'_l} \varphi(x'_l) + \int_{-\infty}^{\infty} \{f'\} \varphi dx = \\ &= (\{f'\} + \sum_l [f]_{x'_l} \delta(x-x'_l), \varphi). \end{aligned}$$

Если x'_l не есть точка разрыва $f(x)$, то $[f]_{x'_l} = 0$. В проделанной выкладке сумма конечна, так как φ финитна.

10.204. $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x-n)$.

10.205. У к а з а н и е. Функцию представить в форме

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{2} - \frac{x-2\pi n}{2\pi} \right) (\eta(x-2\pi) - \eta(x-2\pi(n+1))).$$

10.206. У к а з а н и е. Функцию $\int_0^x f(x) dx$, где $f(x)$ определена в предыдущей

задаче, разложить в ряд Фурье по функциям e^{inx} , продифференцировать ряд дважды (по свойству из задачи 10.194) и воспользоваться результатом предыдущей задачи.

10.208. 1) $\delta(x)$, $\delta'(x)$; 2) $\eta(x)$, $\delta(x)$;

3) $-e^{-x}\eta(x) + \delta(x)$, $e^{-x}\eta(x) - \delta(x) + \delta'(x)$;

4) $2\delta(x)$, $2\delta'(x)$; 5) $\cos x \operatorname{sign} x$, $-\sin |x| + 2\delta(x)$,

6) $-\sin |x| + 2\delta(x)$, $-\cos x \operatorname{sign} x + 2\delta'(x)$;

7) $-\operatorname{sign} x + 2\delta(x)$, $-2\delta(x) + 2\delta'(x)$;

8) $f'(x) = -2x + (2x+1)\eta(x) - \delta(x)$, $f''(x) = -2 + 2\eta(x) + \delta(x) - \delta'(x)$.

10.209. 1) $\eta(x) D^m h(x) + \sum_{k=0}^{m-1} D^k h(0) D^{m-k-1} \delta(x)$; 2) Если $m > n$, то $n! D^{m-n-1} \delta(x)$, если $m \leq n$, то $\frac{n!}{(n-m)!} x^{n-m} \eta(x)$.

10.210. $f'(|x|) \operatorname{sign} x$, $f''(|x|) + 2f'(0) \delta(x)$.

10.211. 1) $\operatorname{sign} x$, 2) $\delta(x)$; 2) $-e^{-|x|} \operatorname{sign} x$, $e^{-|x|} - 2\delta(x)$;
 3) $\cos 2x \operatorname{sign} x$, $-2 \sin 2|x| + 2\delta(x)$;
 4) $(\cos x - x \sin x) \operatorname{sign} x$, $-2 \sin |x| - |x| \cos x + 2\delta(x)$;
 5) $\sin |x| + |x| \cos x$, $(2 \cos x - x \sin x) \operatorname{sign} x$;
 6) $(1 - |x|) e^{-|x|} \operatorname{sign} x$, $(|x| - 2) e^{-|x|} + 2\delta'(x)$.

10.212. 1) $2 \sum_k \operatorname{sign} f'(x_k) \delta(x - x_k)$, где $\{x_k\}$ — множество нулей $f(x)$;
 2) $f'(x) \operatorname{sign} f(x)$, $f''(x) \operatorname{sign} f(x) + 2 \sum_k |f'(x_k)| \delta(x - x_k)$.

10.213. 1) $2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k \delta(x - \pi k)$; 2) $2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^{k+1} \delta\left(x - \frac{2k+1}{2}\pi\right)$.

10.214. 1) $\operatorname{sign}(x+1)$, $2\delta(x+1)$;
 2) $2x \operatorname{sign}(x^2 - 1)$, $2 \operatorname{sign}(x^2 - 1) + 4\delta(x+1) + 4\delta(x-1)$;
 3) $\cos x \operatorname{sign}(\sin x)$, $-|\sin x| + 2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(x - \pi k)$;
 4) $-\sin x \operatorname{sign}(\cos x)$, $-|\cos x| + 2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(x - \frac{2k+1}{2}\pi\right)$.

10.215. 1) $(-1)^m \delta^{m-1}(x)$; 2) $a^m \delta^{m-1}(ax+b)$.

10.216. $(-1)^m D^m \delta(x)$.

10.217. $\mathcal{P} \frac{1}{x}$.

10.218. 1) $f' = -2\alpha x e^{-\alpha x^2} \eta(x) + \delta(x)$, $f'' = 2\alpha(2\alpha x^2 - 1) e^{-\alpha x^2} \eta(x) + \delta'(x)$,
 $f''' = 4\alpha^2 x(3 - 2\alpha x^2) e^{-\alpha x^2} \eta(x) - 2\alpha \delta(x) + \delta''(x)$;
 2) $f' = \frac{\eta(x-1)}{x}$, $f'' = -\frac{\eta(x-1)}{x^2} + \delta(x-1)$,
 $f''' = \frac{2\eta(x-1)}{x^3} - \delta(x-1) + \delta'(x-1)$;
 3) $f' = (\cos x - x \sin x) \eta(x)$, $f'' = -(2 \sin x + x \cos x) \eta(x) + \delta(x)$,
 $f''' = (x \sin x - 3 \cos x) \eta(x) + \delta'(x)$;
 4) $f' = -\frac{\eta(x)}{(1+x)^2}$, $f'' = \frac{2\eta(x)}{(1+x)^3} - \delta(x) + \delta'(x)$,
 $f''' = -\frac{6\eta(x)}{(1+x)^4} + 2\delta(x) - \delta'(x) + \delta''(x)$.

- 10.219.** 1) $f^m = \delta^{(m-1)}(x - |a|) - \delta^{(m-1)}(x + |a|)$, $m = 1, 2, \dots$;
 2) $f^m = \delta^{(m-1)}(x - |a|) + \delta^{(m-1)}(x + |a|)$, $m = 1, 2, \dots$;
 3) $f' = \eta(x^2 - a^2) + |a|\delta(x - |a|) + |a|\delta(x + |a|)$,
 $f^m = \delta^{(m-2)}(x - |a|) - \delta^{(m-2)}(x + |a|) + |a|\delta^{(m-1)}(x - |a|) +$
 $+ |a|\delta^{(m-1)}(x + |a|)$, $m = 2, 3, \dots$;
 4) $f' = \text{sign } x\eta(x^2 - a^2) + |a|\delta(x - |a|) - |a|\delta(x + |a|)$,
 $f^m = \delta^{(m-2)}(x - |a|) + \delta^{(m-2)}(x + |a|) + |a|\delta^{(m-1)}(x - |a|) -$
 $- |a|\delta^{(m-1)}(x + |a|)$, $m = 2, 3, \dots$;
 5) $f^m = 2\delta^{(m-1)}(x + 1) - 2\delta^{(m-1)}(x) + 2\delta^{(m-1)}(x - 1)$.

- 10.220.** 1) $f' = 2x\eta\left(\frac{1}{2} - x\right) + \eta\left(x - \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{4}\delta\left(x - \frac{1}{2}\right)$,
 $f'' = 2\eta\left(\frac{1}{2} - x\right) + \frac{1}{4}\delta'\left(x - \frac{1}{2}\right)$,
 $f^m = \frac{1}{4}\delta^{(m-1)}\left(x - \frac{1}{2}\right) - 2\delta^{(m-3)}\left(\frac{1}{2} - x\right)$, $m = 3, 4, \dots$;
 2) $f' = -2x\eta(1 - x)$, $f'' = -2\eta(1 - x) + 2\delta(x - 1)$,
 $f^m = 2\delta^{(m-3)}(x - 1) + \delta^{(m-2)}(x - 1)$, $m = 3, 4, \dots$;
 3) $f' = 2(x + 1) - 2(2x + 1)\eta(x)$, $f'' = 2 - 4\eta(x) - 2\delta(x)$,
 $f^m = -2\delta^{(m-2)}(x) - 4\delta^{(m-3)}(x)$, $m = 3, 4, \dots$;
 4) $f' = -2 + 2x\eta(x) - 2(x - 1)\eta(x - 1) + \delta(x) + \delta(x - 1)$,
 $f'' = 2\eta(x) - 2\eta(x - 1) + \delta'(x) + \delta'(x - 1)$,
 $f^m = 2\delta^{(m-3)}(x) - 2\delta^{(m-3)}(x - 1) + \delta^{(m-2)}(x)$, $m = 3, 4, \dots$;
 5) $f' = 1 + (2x - 5)\eta(x - 1) - 2(x - 2)\eta(x - 2)$,
 $f'' = 2\eta(x - 1) - 2\eta(x - 2) - 3\delta(x - 1)$,
 $f^m = 2\delta^{(m-3)}(x - 1) - 2\delta^{(m-3)}(x - 2) - 3\delta^{(m-2)}(x - 1)$;
 6) $-2x\eta(x + 1) + 2(x + 1)\eta(x - 1)$,
 $f'' = -2\eta(x + 1) + 2\eta(x - 1) + 2\delta(x + 1) + 4\delta(x - 1)$,
 $f^m = -2\delta^{(m-3)}(x + 1) + 2\delta^{(m-3)}(x - 1) + 2\delta^{(m-2)}(x + 1) +$
 $+ 4\delta^{(m-2)}(x - 1)$, $m = 3, 4, \dots$.

10.226. У к а з а н и е. Записать прямое произведение для функций δ' и 1.

10.228. 1) δ ; 2) 0.

10.229. Р е ш е н и е. Если $\alpha > 0, \beta > 0$, то (см. задачу 10.176)

$$\begin{aligned} f_\alpha * f_\beta &= \frac{\eta(x)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^x y^{\alpha-1}(x-y)^{\beta-1} dy = \frac{\eta(x)x^{\alpha+\beta-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^1 \xi^{\alpha-1}(1-\xi)^{\beta-1} d\xi = \\ &= \frac{\eta(x)x^{\alpha+\beta-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} B(\alpha, \beta) = \frac{\eta(x)x^{\alpha+\beta-1}}{\Gamma(\alpha+\beta)} = f_{\alpha+\beta}; \end{aligned}$$

если $\alpha < 0, \beta < 0$, то при целых $m > -\alpha, n > -\beta$ по определению (см. также задачу 10.230)

$$f_\alpha * f_\beta = f_{\alpha+m}^{(m)} * f_{\beta+n}^{(n)} = (f_{\alpha+m} * f_{\beta+n})^{(m+n)} = f_{\alpha+m+\beta+n}^{(m+n)} = f_{\alpha+\beta}.$$

$$\mathbf{10.231.} \quad \frac{\eta(x)}{\sqrt{\pi x}}. \text{ Решение. } f_{-\frac{1}{2}} * \eta = f'_{\frac{1}{2}} * \eta = (f_{\frac{1}{2}} * \eta)' = \frac{d}{dx} \frac{\eta(x)}{\Gamma(\frac{1}{2})} \int_0^x \frac{d\xi}{\sqrt{x-\xi}} = \\ = \frac{d}{dx} \frac{2\eta(x)\sqrt{x}}{\sqrt{\pi}} = \frac{2\delta(x)\sqrt{x}}{\sqrt{\pi}} + \frac{\eta(x)}{\sqrt{\pi x}} = \frac{\eta(x)}{\sqrt{\pi x}}.$$

$$\mathbf{10.232.} \quad \frac{\eta(x)}{\Gamma(\frac{1}{4})\sqrt[4]{x^3}}.$$

$$\mathbf{10.233.} \quad \frac{\eta(x)}{\sqrt{\pi x}} - \frac{\eta(x-1)}{\sqrt{\pi(x-1)}}.$$

$$\mathbf{10.234.} \quad \frac{\eta(x)}{\sqrt{\pi}} \frac{d}{dx} \int_0^x \frac{f(\xi)d\xi}{\sqrt{x-\xi}}.$$

$$\mathbf{10.235.} \quad 2\eta(x)\sqrt{\frac{x}{\pi}}.$$

$$\mathbf{10.236.} \quad \frac{4\eta(x)\sqrt[4]{x}}{\Gamma(\frac{1}{4})}.$$

$$\mathbf{10.237.} \quad \frac{2}{\sqrt{\pi}}(\eta(x)\sqrt{x} - \eta(x-1)\sqrt{x-1}).$$

$$\mathbf{10.238.} \quad \frac{\eta(x)}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \frac{f(\xi)d\xi}{\sqrt{x-\xi}}.$$

10.241. $-p\delta'(x)$. Решение. Чтобы получить точечный диполь, нужно устремить к нулю расстояние Δx между зарядами $-q$ и q в конечном диполе при условии постоянства произведения $q\Delta x = p$, где p — дипольный момент. Плотность $\rho(x)$ является пределом плотности заряда конечного диполя, образованного зарядами $-q$ и q в точках $x=0$ и Δx соответственно:

$$\rho(x) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} [q\delta(x-\Delta x) - q\delta(x)]$$

при условии $q\Delta x = p$. По определению сходимости в $\mathcal{D}'$ (см. (10.13)) при $\Delta x \rightarrow 0$

$$(q\delta(x-\Delta x) - q\delta(x), \varphi(x)) = q(\varphi(\Delta x) - \varphi(0)) = p \frac{\Delta \varphi}{\Delta x} \rightarrow p\varphi'(0) = (-p\delta'(x), \varphi(x)).$$

$$\mathbf{10.242.} \quad -p(x) \cdot \delta'(y - y_0).$$

$$\mathbf{10.243.} \quad -p \frac{\partial \delta(x - x_0)}{\partial l}.$$

$$\mathbf{10.244.} \quad -p\delta(x) \cdot \delta(y) \cdot \delta'(z - z_0).$$

$$\mathbf{10.245.} \quad -p(z) \cdot \delta'(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0).$$

$$\mathbf{10.246.} \quad -\frac{p}{\sqrt{2}}(\delta'(x) \cdot \delta(y - y_0) + \delta(x) \cdot \delta'(y - y_0)).$$

10.247. Доказательство для $n=2$. Для функции $\varphi \in \mathcal{D}$, $\text{supp } \varphi \subset B_r$, применимо интегральное представление (см. [15])

$$2\pi\varphi(x_0) = \int_{\partial B_r} \left(\frac{\partial}{\partial n} \varphi(x) \ln \frac{1}{|x - x_0|} - \varphi(x) \frac{\partial}{\partial n} \ln \frac{1}{|x - x_0|} \right) ds - \\ - \int_{B_r} \Delta \varphi(x) \ln \frac{1}{|x - x_0|} dx,$$

где $\mathbf{n}$ — внешняя нормаль, согласно которому

$$2\pi\varphi(x_0) = - \int_{B_r} \Delta\varphi \ln \frac{1}{|x - x_0|} dx = - \int \Delta\varphi \ln \frac{1}{|x - x_0|} dx.$$

По определению обобщенной производной

$$\begin{aligned} \left(\Delta \ln \frac{1}{|x - x_0|}, \varphi(x) \right) &= \left(\ln \frac{1}{|x - x_0|}, \Delta\varphi(x) \right) = \\ &= \int \Delta\varphi(x) \ln \frac{1}{|x - x_0|} dx = -2\pi\varphi(x_0) = (-2\pi\delta(x - x_0), \varphi(x)). \end{aligned}$$

10.248. $\sigma\delta_S$.

10.249. $-\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}}(\mu\delta_S)$.

10.250. 4); 5); 6).

10.251. 1); 3).

10.252. Решение. 1) Если $\varphi \in \mathcal{D}$, то (в силу финитности) $\varphi \in \mathcal{J}$. Пусть $D^\alpha \varphi_k \xrightarrow{\mathbb{R}^n} D^\alpha \varphi$ в $\mathcal{D}$; так как носители функций φ_k ограничены равномерно по k , то

$$x^\beta D^\alpha \varphi_k \xrightarrow{\mathbb{R}^n} x^\beta D^\alpha \varphi.$$

2) Функция $e^{-|x|} \in \mathcal{J}$, но не принадлежит $\mathcal{D}$. 3) Множество функций $\mathcal{D}$ называется плотным в $\mathcal{J}$, если для любой $\varphi \in \mathcal{J}$ существует последовательность функций из $\mathcal{D}$, сходящаяся к φ в $\mathcal{J}$. Если $\varphi \in \mathcal{J}$, то таковой является последовательность

$$\varphi_k(x) = \varphi(x) \kappa\left(\frac{x}{k}\right),$$

где $\kappa\left(\frac{x}{k}\right)$ определена в задаче 10.135. Например,

$$\begin{aligned} x^\beta D_{x_1}^{\alpha_1} \varphi_k(x) &= x^\beta \sum_{m=0}^{\alpha_1} C_{\alpha_1}^m D_{x_1}^{\alpha_1-m} \varphi(x) D_{x_1}^m \kappa\left(\frac{x}{k}\right) = \\ &= x^\beta \sum_{m=0}^{\alpha_1} C_{\alpha_1}^m D_{x_1}^{\alpha_1-m} \varphi(x) \frac{1}{k^{\alpha_1}} D_t^m \kappa(t)|_{t=\frac{x}{k}} \xrightarrow{\mathbb{R}^n} x^\beta D_{x_1}^{\alpha_1} \varphi(x), \end{aligned}$$

так как предел слагаемых при $m \geq 1$ равен нулю (см. оценки в решении задачи 10.135).

10.254. 1) Нет; 2) да.

10.257. Решение. Определен функционал $(f, \varphi) = (f, \kappa\varphi)$, $\varphi \in \mathcal{J}$. Нужно доказать его линейность и непрерывность. Линейность очевидна. Доказательство непрерывности. Пусть $\varphi_k \rightarrow \varphi$ в $\mathcal{J}$, или $\psi_k = \varphi_k - \varphi \rightarrow 0$, тогда $\kappa\psi_k \rightarrow 0$ в $\mathcal{D}$, следовательно,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (f, \psi_k) = \lim_{k \rightarrow \infty} (f, \kappa\psi_k) = 0.$$

Каждая функция $\varphi \in \mathcal{J}$ является пределом сходящейся последовательности $\varphi_k \in \mathcal{D}$; так как предел существует, то он единствен.

10.259. У к а з а н и е. Из формулы, установленной в предыдущей задаче, следует, что

$$\left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{inx}, \varphi(x) \right) = 2\pi \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - 2\pi n), \varphi(x) \right).$$

10.260. 1) $\frac{\pi}{a} \operatorname{cth} \pi a$; $S_1 = \frac{\pi^2}{6}$, $S_2 = \frac{\pi^2}{8}$, $S_3 = \frac{\pi^2}{16}$; 2) $\frac{\pi}{a \operatorname{sh} \pi a}$; 3) $\frac{\pi^2}{\sin^2 \pi a}$; 4) $\frac{\pi^3}{32}$.

Решение, п. 1. В данном случае $\varphi(x) = \frac{1}{\frac{x^2}{4\pi^2} + a^2}$, преобразование Фурье

$$F[\varphi](n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{inx} dx}{\frac{x^2}{4\pi^2} + a^2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{i|n|x} dx}{\frac{x^2}{4\pi^2} + a^2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} 2\pi i \operatorname{res}_{z=2\pi|a|i} f(z),$$

где $f(z)$ — подынтегральная функция. В итоге сумма ряда

$$S = \frac{\pi}{|a|} \sum_{n \in \mathbb{Z}} e^{-2\pi|a||n|} = \frac{\pi}{|a|} \left(1 + 2 \frac{e^{-2\pi|a|}}{1 - e^{-2\pi|a|}}\right) = \frac{\pi}{|a|} \operatorname{cth} \pi|a| = \frac{\pi}{a} \operatorname{cth} \pi a.$$

10.261. 1) $\left(\frac{\pi-x}{2}\right)^2 - \frac{\pi^2}{12}$, $x \in [0; 2\pi]$; 2) $\frac{\pi}{a} \frac{\operatorname{ch}(\pi-x)}{\operatorname{sh} \pi a}$, $x \in [0; 2\pi]$;

$$3) \begin{cases} \frac{\pi}{4} \operatorname{sign} x, & x \in (-\pi; \pi), \\ 0, & x = \pi n. \end{cases}$$

Указание, п. 1. Сумма ряда удовлетворяет дифференциальному уравнению $S'' + \frac{1}{2} = 0$.

10.264. Указание. Применить (10.24).

10.265. 1) $\delta'(x) - \delta'(x-1)$; 2) $-\sin x + \delta(x) + \delta(x-\pi)$;
3) $2\delta(x) - \delta(x-1) - \delta(x+1) - \delta'(x-1) + \delta'(x+1)$;
4) $-|\cos x| + 2\delta\left(x - \frac{\pi}{2}\right) + \delta'(x) - \delta'(x-\pi)$.

10.266. 1) $\delta(x) - 2\delta(x-1) - \delta'(x) - 2\delta'(x-1)$; 2) $2 - 2\delta(x) - \delta'(x-1)$;
3) $2\delta(x-1) - 2\delta(x+1) + 2\delta'(x) - \delta'(x-1) - \delta'(x+1)$.

10.268. Доказательство. Пусть

$$\tilde{u}(x, t) = \begin{cases} 0, & x = 0, \\ u(x, t), & 0 < x \leq l, \end{cases}$$

$$\tilde{u}_x(x, t) = u_x(x, t),$$

где $u(x, t)$ — решение задачи 10.151. В соответствии с (10.28)

$$\rho \mathcal{L} \tilde{u} = \{\rho \mathcal{L} \tilde{u}\} - p(0)[\tilde{u}]_{x=0} \delta'(x) = \{\rho \mathcal{L} u\} - p(0)\mu(t)\delta'(x)$$

(там, где $\{\tilde{u}_{xx}\}$ существует, она совпадает с $\{u_x\}$, а $\tilde{u}_{tt} = u_{tt}$.) Следовательно, подстановка u_{tt} и $\{\rho \mathcal{L} u\}$ в исходное уравнение преобразует его к виду

$$\rho \tilde{u}_{tt} = -\rho \mathcal{L} \tilde{u} + F - p(0)\mu(t)\delta'(x);$$

при этом $\tilde{u}(0, t) = \tilde{u}(l, t) = \tilde{u}_x(x, 0) = 0$. Если $\tilde{u}(x, t)$ — решение задачи 10.152, то из уравнения вытекает, что $[\tilde{u}]_{x=0} = \mu(t)$, т. е., $\tilde{u}(+0, t) - \tilde{u}(0, t) = \mu(t)$, следовательно, $\tilde{u}(+0, t) = \mu(t)$. Так как $\delta'(x) = 0$ при $x \in (0; l]$, то функция $\tilde{u}(x, t)$ удовлетворяет всем условиям задачи 10.151.

10.270. Указание. Ввести функцию

$$\tilde{u}(x, t) = u(x, t), \quad \tilde{u}_x(x, t) = u_x(x, t), \quad 0 < x \leq l,$$

$$\tilde{u}(0, t) = u(0, t) - A(t), \quad \tilde{u}_x(0, t) = u_x(0, t) - B(t),$$

где $\alpha A(t) - \beta B(t) = \mu(t)$.

10.271. Доказательство. При $x = b$ подстановка в соотношении (10.27)

$$I(b) = p(b)[f(b)X'(b) - f'(b)X(b)] = 0.$$

Действительно, если $\beta_2 = 0$, то по (10.31) $X(b) = 0$, $f(b) = 0$; если $\beta_2 \neq 0$, то $X'(b) = -\frac{\alpha_2}{\beta_2}f(b)$, $f'(b) = \frac{\alpha_2}{\beta_2}f(b)$, так что $I(b) = 0$. Аналогично устанавливается равенство $I(a) = 0$.

10.272. 1) $\frac{2}{\lambda^2}[X'(0) - X'(l)]$; 2) $\frac{2}{\lambda}X\left(\frac{l}{2}\right)$; 3) $\frac{1}{\lambda}\left[X'(0) - X'(l) - \frac{4}{l}X\left(\frac{l}{2}\right)\right]$;
4) $\frac{X'(0) - X'(l)e^{\alpha l}}{\lambda + \alpha^2}$; 5) $\frac{\sin \alpha l}{\alpha^2 - \lambda}X'(l)$.

Решение, п. 4. Вычисление интеграла основано на свойстве (10.31). Пусть

$$\tilde{f} = \begin{cases} 0, & x = 0, x = l, \\ f, & 0 < x < l, \end{cases}$$

$$\tilde{f}'(x) = f'(x);$$

тогда

$$(f, X) = (\tilde{f}, X) = -\frac{1}{\lambda}(\tilde{f}, X'') = -\frac{1}{\lambda}(\tilde{f}'', X) = -\frac{1}{\lambda}(\alpha^2 f + \delta'(x) - f(l)\delta'(x-l), X),$$

откуда следует ответ.

10.273. $\left(\frac{al^2 + bl + c}{h} + 2al + b - \frac{2a}{\lambda h}\right) \frac{X(l)}{\lambda} + \left(c - \frac{2a}{\lambda}\right) \frac{X'(0)}{\lambda}.$

10.274. 1) $-\frac{1}{\lambda}[aX(0) + (al + b)X'(l)]$; 2) $\frac{1}{\lambda l}X\left(\frac{l}{2}\right).$

10.275. $\frac{1}{\lambda}A\rho(x_0)X(x_0)$; если $\beta_1 = 0$, то $x_0 \neq a$, если $\beta_2 = 0$, то $x_0 \neq b$.

Решение:

$$(\rho X, f) = \frac{1}{\lambda}(f, \rho \mathcal{L}X) = \frac{1}{\lambda}(\rho \mathcal{L}f, X) = \frac{1}{\lambda}(\rho A\delta(x - x_0), X) =$$

$$= \frac{A}{\lambda}(\delta(x - x_0), \rho X) = \frac{1}{\lambda}A\rho(x_0)X(x_0).$$

10.276. Указание. Последовательность $\delta_n(x) = \sum_{k=1}^n \frac{X_k(x_0)X_k(x)}{\|X_k\|^2}$ сходится в пространстве $\mathcal{D}'[a; b]$ к $\delta(x - x_0)$.

10.277. 1) $f'(x) = \delta(x) - \delta(x - 1)$, $f''(x) = -\delta(x) + \delta'(x) - \delta'(x - 1)$;
2) $f'(x) = \frac{1}{x} + \delta(x - 1)$, $f''(x) = -\frac{1}{x^2} + \delta(x - 1) + \delta'(x - 1)$.

10.278. Решение. Формула замены переменных

$$\int f(x) \varphi(x) dx = \int f(x(\xi)) \varphi(x(\xi)) I(\xi) d\xi$$

приводит к определению

$$(\delta(x - x_0), \varphi(x)) = (I(\xi) \delta(x(\xi) - x(\xi_0)), \varphi(x(\xi))).$$

С другой стороны, $(\delta(x - x_0), \varphi(x)) = \varphi(x_0) = \varphi(x(\xi_0)) = (\delta(\xi - \xi_0), \varphi(x(\xi)))$.

10.279. 1) $\frac{1}{r}\delta(r - r_0) \cdot \delta(\varphi - \varphi_0)$; 2) $\frac{1}{r}\delta(r - r_0) \cdot \delta(\varphi - \varphi_0) \cdot \delta(z - z_0)$;
3) $\frac{\delta(r - r_0)}{r^2} \cdot \frac{\delta(\theta - \theta_0)}{\sin \theta} \cdot \delta(\varphi - \varphi_0)$, $\theta_0 \in (0, \pi)$.

$$10.280. \quad q_0 \frac{\delta(r-r_0)}{r} \cdot \delta(\varphi - \varphi_0).$$

10.281. $q(\varphi) \cdot \delta(r - r_0)$. Р е ш е н и е. Если заряд q_0 (см. задачу 10.280) равномерно распределить на дуге $\Delta l = r_0 \Delta \varphi$, то его линейная плотность будет $q(\varphi_0) = \frac{q_0}{\Delta l}$, а пространственная плотность

$$q(\varphi_0) \frac{1}{r} \delta(r - r_0) (\delta(\varphi - \varphi_0, r_0 \Delta \varphi) = q(\varphi_0) \delta(r - r_0),$$

$$10.282. \quad 1) q_0 \frac{\delta(r-r_0)}{r} \cdot \delta(\varphi - \varphi_0) \cdot \delta(z - z_0); \quad 2) q_0 \frac{\delta(r-r_0)}{r} \cdot \frac{\delta(\theta - \theta_0)}{\sin \theta} \cdot \delta(\varphi - \varphi_0).$$

$$10.283. \quad q(\varphi) \cdot \delta(r - r_0) \cdot \delta(z).$$

$$10.284. \quad \mathbf{j} = \mathbf{e}_\varphi J \frac{\delta(r-r_0)}{r} \cdot \delta\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right).$$

10.285. Р е ш е н и е. Сферически симметричную функцию $f \in \mathcal{D}'(\mathbb{R}^n)$ достаточно задать на сферически симметричных основных функциях $\varphi(r)$ (задача 10.152). Для сферически симметричной регулярной обобщенной функции

$$\begin{aligned} (f(x), \varphi(r(x))) &= \int_0^\infty dr \int_{S_r} f(x) \varphi(r) ds = \int_0^\infty |S_r| f(x) \varphi(r) dr = \\ &= \int_0^\infty f(r) \varphi(r) dr = (f(r), \varphi(r)), \quad \text{где } f(r) = |S_r| f(x). \end{aligned}$$

$$10.286. \quad 1) Q \frac{\delta(r)}{4\pi r^2}; \quad 2) Q \frac{\delta(r)}{2\pi r} \cdot \delta(z).$$

$$10.287. \quad 1) \frac{m}{2\pi} \frac{\delta(r-z_0)}{r^2} \cdot \frac{\delta(\theta)}{\sin \theta}; \quad 2) m \frac{\delta(r)}{2\pi r} \cdot \delta(z - z_0).$$

$$10.288. \quad j_n = \frac{J}{2\pi r_0^2} \left[\frac{\delta(\theta)}{\sin \theta} - \frac{\delta(\theta - \pi)}{\sin \theta} \right].$$

$$10.289. \quad 1) -\frac{\delta(r)}{2\pi r} \cdot \delta'(z); \quad 2) -\frac{p}{2\pi} \cdot \begin{cases} \frac{\delta'(r-z_0)}{r^2} \cdot \frac{\delta(\theta)}{\sin \theta}, & z_0 > 0, \\ \frac{\delta'(r-z_0)}{r^2} \cdot \frac{\delta(\theta - \pi)}{\sin \theta}, & z_0 < 0. \end{cases}$$

10.291. Р е ш е н и е. Ряд Фурье функции $h \in L^2(\Omega)$ по полной ортонормальной в $L^2(\Omega)$ системе функций можно почленно интегрировать, поэтому

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n h_k \psi_k(\omega) \cdot D^m \delta(r - r_0), \varphi(r, \omega) \right) &= \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n h_k \psi_k(\omega), (-1)^m \varphi_r^{(m)}(r_0, \omega) \right) = \\ &= \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n h_k \psi_k(\omega), (-1)^m \varphi_r^{(m)}(r_0, \omega) \right) = \left(h(\omega), (-1)^m \varphi_r^{(m)}(r_0, \omega) \right) = \\ &= (h(\omega) \cdot D^m \delta(r - r_0), \varphi(r, \omega)). \end{aligned}$$

$$10.292. \quad \sigma(\theta, \varphi) \cdot \delta(r - r_0).$$

$$10.293. \quad \mathbf{j} = \mathbf{e}_\varphi \varphi r_0 \sigma(\theta) \sin \theta \cdot \delta(r - r_0).$$

$$10.294. \quad q(\varphi) \cdot \frac{\delta(r-r_0)}{r} \cdot \delta\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right).$$

$$10.295. -p(\theta, \varphi) \cdot \delta'(r-r_0).$$

$$10.296. 1) -p(\omega) \cdot \delta'(r-r_0); 2) n=3, p(\omega)=p(\theta, \varphi).$$

У к а з а н и е. См. решение задачи 10.241.

$$10.297. -p(\varphi) \cdot \delta'(r-r_0) \cdot \delta\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right).$$

$$10.298. \sigma(\varphi, z) \cdot \delta(r-r_0),$$

$$10.299. \mathbf{j} = r_0 \omega \sigma(z) \cdot \delta(r-r_0) \mathbf{e}_\varphi.$$

$$10.300. -p(\varphi) \cdot \delta'(r-r_0).$$

$$10.301. -p(\varphi, z) \cdot \delta'(r-r_0).$$

$$10.302. -p(\varphi) \cdot \delta'(r-r_0) \cdot \delta(z).$$

$$10.303. f(r, \varphi) = \frac{p(r)}{r} \cdot [\delta(\varphi) + \delta(\varphi - \pi)].$$

$$10.304. \rho(r, \theta, \varphi) = \frac{\sigma(r, \varphi) \eta(r_0 - r)}{r} \cdot \frac{\delta\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)}{\sin \theta}.$$

$$10.305. 1) \delta(x) \cdot \delta(y) \cdot \rho(z) \eta(l - |z|); 2) \frac{\delta(r)}{2\pi r} \cdot \rho(z) \eta(l - |z|);$$

$$3) \frac{\rho(r) \eta(l - r)}{2\pi r^2} \cdot \frac{\delta(\theta)}{\sin \theta} + \frac{\rho(-r) \eta(l - r)}{2\pi r^2} \cdot \frac{\delta(\theta - \pi)}{\sin \theta}.$$

$$10.306. \mathbf{j} = \frac{Mc}{\pi} \frac{\delta(r)}{r^3} \cdot \frac{\delta\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)}{\sin \theta} \cdot \mathbf{e}_\varphi.$$

$$10.308. 1) -p_0 \frac{\delta'(r-r_0)}{r} \cdot \delta(\varphi); 2) -p_0 \frac{\delta(r-r_0)}{r^2} \cdot \delta'(\varphi).$$

$$10.309. 1) -p_0 \frac{\delta'(r-r_0)}{r} \cdot \delta(\varphi) \cdot \delta(z); 2) -p_0 \frac{\delta(r-r_0)}{r^2} \cdot \delta\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \delta(\varphi).$$

$$10.310. 1) -p_0 \frac{\delta(r-r_0)}{r^2} \cdot \delta'(\varphi) \cdot \delta(z); 2) -p_0 \frac{\delta(r-r_0)}{r^3} \cdot \delta\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \delta'(\varphi).$$

$$10.311. 1) -p_0 \frac{\delta(r-r_0)}{r} \cdot \delta(\varphi) \cdot \delta'(z); 2) -p_0 \frac{\delta(r-r_0)}{r^3} \cdot \delta'\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \delta(\varphi).$$

$$10.312. -p(\varphi) \frac{\delta(r-r_0)}{r^2} \cdot \delta'\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right). \text{ У к а з а н и е. Применить выражение для плотности заряда в ответе 2) задачи 10.311.}$$

$$10.313. -p(\varphi) \frac{\delta(r-r_0)}{r} \cdot \delta'(z). \text{ У к а з а н и е. Применить выражение для плотности заряда в ответе 1) задачи 10.311.}$$

$$10.314. \text{ У к а з а н и е. См. задачу 10.290.}$$

$$10.315. 1) 4 - 2r_0 \delta(r-r_0) - r_0^2 \delta'(r-r_0);$$

$$2) (-nr_0^{n-1} \delta(r-r_0) - r_0^n \delta'(r-r_0)) \cdot \sin n\varphi;$$

$$3) -2\pi \delta(\mathbf{r}) - \frac{1}{r_0} \delta(r-r_0) - \ln r_0 \delta'(r-r_0).$$

$$10.316. 1) -\delta'(r-r_0); 2) -6 + 2r_0 \delta(r-r_0);$$

$$3) (-r_0 \delta'(r-r_0) - \delta(r-r_0)) \cdot \sin \theta \cos \varphi; 4) \frac{2}{r} + \delta(r-r_0) - r_0 \delta'(r-r_0);$$

$$5) -4\pi \delta(\mathbf{r}) + \frac{1}{r_0^2} \delta(r-r_0) - \frac{1}{r_0} \delta'(r-r_0).$$

10.317.

$$\begin{aligned} 1) \Delta f &= \frac{2}{r} - r_0 \delta'(r - r_0); \\ 2) \Delta f &= -4\pi \delta(\mathbf{r}) - \frac{1}{r_0} \delta'(r - r_0). \end{aligned} \quad (10.46)$$

У к а з а н и е к п. 2. Применить (10.17).

10.319. У к а з а н и е. В соотношении (10.156) интеграл по S равен нулю.

$$\begin{aligned} \mathbf{10.320.} \quad 1) & -\frac{24\pi}{\lambda_n^2} u'_n(r_0); \quad 2) \frac{4\pi}{\lambda_n} [u_n(0) - r_0 u'_n(r_0)]; \\ 3) & \frac{4\pi}{\lambda_n^2} [r_0(2 - \lambda_n r_0^2) u'_n(r_0) - 2u_n(0)]. \end{aligned}$$

Р е ш е н и е п. 1, п. 2. 1) Вычисление основано на соотношении (10.42) (оно применимо, так как $f \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}$) и формуле Грина (10.37):

$$\begin{aligned} \int_B f u_n dx &= (f, u_n) = -\frac{1}{\lambda_n} (f, \Delta u_n) = -\frac{1}{\lambda_n} (\Delta f, u_n) = \frac{6}{r_0^2 \lambda_n} (1, u_n) = \\ &= \frac{6}{r_0^2 \lambda_n} \int_B u_n dx = -\frac{6}{r_0^2 \lambda_n^2} \int_B \Delta u_n dx = -\frac{6}{r_0^2 \lambda_n^2} \int_S u'_n ds - \frac{24\pi}{\lambda_n^2} u'_n(r_0). \end{aligned}$$

2) Так как $f \notin \mathcal{M}_{\mathcal{L}}$, то соотношение (10.43) не применимо. Можно построить такую функцию $\tilde{f}$, что $\tilde{f} \in \mathcal{M}_{\mathcal{L}}$ и $I_n(f) = I_n(\tilde{f})$:

$$\begin{aligned} \tilde{f} &= \begin{cases} f(r), & r < r_0, \\ 0, & r = r_0, \end{cases} \\ \tilde{f}'(r_0) &= \frac{1}{r_0^2}. \end{aligned}$$

В силу (10.44) и (10.46)

$$\begin{aligned} I_n(f) &= (\tilde{f}, u_n) = -\frac{1}{\lambda_n} (\tilde{f}, \Delta u_n) = -\frac{1}{\lambda_n} (\Delta \tilde{f}, u_n) = \\ &= -\frac{1}{\lambda_n} \left(\left(-4\pi \delta(\mathbf{r}) - \frac{1}{r_0} \delta'(r - r_0) \right), u_n \right) = -\frac{1}{\lambda_n} \left(-4\pi u_n(0) + \frac{1}{r_0} u'_n(r_0) 4\pi r_0^2 \right) = \\ &= \frac{4\pi}{\lambda_n} [u_n(0) - r_0 u'_n(r_0)]. \end{aligned}$$

$$\mathbf{10.321.} \quad \frac{16\pi r_0}{\lambda_n} [u_n(r_0) - u_n(0)].$$

$$\mathbf{10.322.} \quad \frac{4\pi r_0}{\lambda_n} [u_n(r_0) - u_n(0)].$$

$$\mathbf{10.323.} \quad \frac{a u(x_0)}{\lambda_n}. \quad \text{Р е ш е н и е. На основании (10.44)}$$

$$\int_B f u dx = (f, u) = -\frac{1}{\lambda} (f, \Delta u) = -\frac{1}{\lambda} (\Delta f, u) = \frac{a}{\lambda} (\delta(x - x_0), u) = \frac{a u(x_0)}{\lambda}.$$

Основные формулы

Формулы векторного анализа:

$$\begin{aligned}\operatorname{div}(\varphi \mathbf{a}) &= \varphi \operatorname{div} \mathbf{a} + (\mathbf{a} \nabla \varphi), \\ \operatorname{rot}(\varphi \mathbf{a}) &= \varphi \operatorname{rot} \mathbf{a} + [\nabla \varphi, \mathbf{a}], \\ \nabla(\mathbf{a}, \mathbf{b}) &= (\mathbf{a} \nabla) \mathbf{b} + (\mathbf{b} \nabla) \mathbf{a} + [\mathbf{a} \operatorname{rot} \mathbf{b}] + [\mathbf{b} \operatorname{rot} \mathbf{a}], \\ \operatorname{div}[\mathbf{a} \mathbf{b}] &= (\mathbf{b} \operatorname{rot} \mathbf{a}) - (\mathbf{a} \operatorname{rot} \mathbf{b}), \\ \operatorname{rot}[\mathbf{a} \mathbf{b}] &= \mathbf{a} \operatorname{div} \mathbf{b} - \mathbf{b} \operatorname{div} \mathbf{a} + (\mathbf{b} \nabla) \mathbf{a} - (\mathbf{a} \nabla) \mathbf{b}, \\ \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{a} &= \nabla \operatorname{div} \mathbf{a} - \Delta \mathbf{a}.\end{aligned}$$

Дифференциальные операции в ортогональных криволинейных координатах. Декартовы координаты (x_1, x_2, x_3) некоторой точки $x \in \mathbb{R}^3$ и ее криволинейные координаты (q_1, q_2, q_3) связаны известными соотношениями $x_i = x_i(q_1, q_2, q_3)$, $i = 1, 2, 3$. Пусть A_1, A_2, A_3 — компоненты вектора $\mathbf{A}$ в криволинейной системе, u — скалярная функция, dl — элемент длины, h_1, h_2, h_3 — коэффициенты Ламе, тогда

$$\begin{aligned}dl^2 &= dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 = dq_1^2 + dq_2^2 + dq_3^2, \\ h_i &= \sqrt{\left(\frac{\partial x_1}{\partial q_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial x_2}{\partial q_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial x_3}{\partial q_i}\right)^2}, \quad i = 1, 2, 3, \\ (\nabla u)_i &= \frac{1}{h_i} \frac{\partial u}{\partial q_i}, \quad i = 1, 2, 3, \\ \operatorname{div} \mathbf{A} &= \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[\frac{\partial}{\partial q_1} (h_2 h_3 A_1) + \frac{\partial}{\partial q_2} (h_3 h_1 A_2) + \frac{\partial}{\partial q_3} (h_1 h_2 A_3) \right], \\ (\operatorname{rot} \mathbf{A})_1 &= \frac{1}{h_2 h_3} \left[\frac{\partial}{\partial q_2} (h_3 A_3) - \frac{\partial}{\partial q_3} (h_2 A_2) \right], \\ (\operatorname{rot} \mathbf{A})_2 &= \frac{1}{h_3 h_1} \left[\frac{\partial}{\partial q_3} (h_1 A_1) - \frac{\partial}{\partial q_1} (h_3 A_3) \right], \\ (\operatorname{rot} \mathbf{A})_3 &= \frac{1}{h_1 h_2} \left[\frac{\partial}{\partial q_1} (h_2 A_2) - \frac{\partial}{\partial q_2} (h_1 A_1) \right], \\ \Delta u &= \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[\frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{h_2 h_3}{h_1} \frac{\partial u}{\partial q_1} \right) + \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{h_3 h_1}{h_2} \frac{\partial u}{\partial q_2} \right) + \frac{\partial}{\partial q_3} \left(\frac{h_1 h_2}{h_3} \frac{\partial u}{\partial q_3} \right) \right].\end{aligned}$$

Цилиндрические координаты:

$$\begin{aligned}x_1 &= x, \quad x_2 = y, \quad x_3 = z, \quad q_1 = r, \quad q_2 = \varphi, \quad q_3 = z, \quad x = r \cos \varphi, \quad y = r \sin \varphi, \quad z = z; \\ dl^2 &= dr^2 + r^2 d\varphi^2 + dz^2, \quad h_r = 1, \quad h_\varphi = r, \quad h_z = 1; \\ (\nabla u)_r &= \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (\nabla u)_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi}, \quad (\nabla u)_z = \frac{\partial u}{\partial z}; \\ \operatorname{div} \mathbf{A} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial A_z}{\partial z};\end{aligned}$$

$$(\operatorname{rot} \mathbf{A})_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z}, \quad (\operatorname{rot} \mathbf{A})_\varphi = \frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r}, \quad (\operatorname{rot} \mathbf{A})_z = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r A_\varphi) - \frac{1}{r} \frac{\partial A_r}{\partial \varphi},$$

$$\Delta u = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}.$$

Сферические координаты:

$$x_1 = x, \quad x_2 = y, \quad x_3 = z, \quad q_1 = r, \quad q_2 = \theta, \quad q_3 = \varphi,$$

$$x = r \sin \theta \cos \varphi, \quad y = r \sin \theta \sin \varphi, \quad z = r \cos \theta,$$

$$dl^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2, \quad h_r = 1, \quad h_\theta = r, \quad h_\varphi = r \sin \theta;$$

$$(\nabla u)_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (\nabla u)_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta}, \quad (\nabla u)_\varphi = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial u}{\partial \varphi};$$

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(r^2 A_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta}(\sin \theta A_\theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi}.$$

$$(\operatorname{rot} \mathbf{A})_r = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta}(\sin \theta A_\varphi) - \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A_\theta}{\partial \varphi},$$

$$(\operatorname{rot} \mathbf{A})_\theta = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A_r}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r A_\varphi),$$

$$(\operatorname{rot} \mathbf{A})_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r A_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial A_r}{\partial \theta},$$

$$\Delta u = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2}.$$

Гамма-функция $\Gamma(z)$ и бета-функция $B(z, \zeta)$. $\Gamma(z)$ — аналитическая функция, особые точки которой $z = 0, -1, -2, \dots$ (простые полюсы) и $z = \infty$ (точка сгущения полюсов),

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt, \quad \operatorname{Re} z > 0, \quad \Gamma(z) = \frac{\Gamma(z+n+1)}{z(z+1)\dots(z+n)}, \quad \operatorname{Re} z > -n, \quad n \in \mathbb{N}.$$

Гамма-функция не имеет нулей. Основные соотношения: рекуррентная формула $\Gamma(z+1) = z\Gamma(z)$, формула удвоения $\sqrt{\pi}\Gamma(2z) = 2^{2z-1}\Gamma(z)\Gamma(z+1/2)$, формула дополнения $\Gamma(z)\Gamma(1-z) = \frac{\pi}{\sin \pi z}$. Частные значения:

$$\Gamma(n+1) = n!, \quad \Gamma(n+1/2) = \frac{\sqrt{\pi}(2n)!}{2^{2n}n!}, \quad \Gamma(1/2-n) = \frac{(-1)^n \sqrt{\pi} 2^{2n}n!}{(2n)!}.$$

$$B(z, \zeta) = \int_0^1 t^{z-1} (1-t)^{\zeta-1} dt, \quad \operatorname{Re} z > 0, \quad \operatorname{Re} \zeta > 0, \quad B(z, \zeta) = \frac{\Gamma(z)\Gamma(\zeta)}{\Gamma(z+\zeta)}.$$

Формула Лежандра: $2^{2z-1}B(z, z) = B(z, 1/2)$.

Логарифмическая производная Γ -функции $\psi(z) = \frac{d}{dz} \ln \Gamma(z) = \frac{\Gamma'(z)}{\Gamma(z)}$ — мероморфная функция с простыми полюсами $z = -0, -1, -2, \dots$. Основные соотношения для $\psi(z)$:

$$\psi(z+1) = \frac{1}{z} + \psi(z+1), \quad \psi(z+1/2) + \psi(z) + 2 \ln 2 = 2\psi(2z),$$

$$\psi(1-z) - \psi(z) = \pi \operatorname{ctg} \pi z.$$

$-\psi(1) = -\Gamma'(1) = \gamma \approx 0,577$ — постоянная Эйлера.
Неполная гамма-функция $\gamma(z, a) = \int_0^a t^{z-1} e^{-t} dt$, $\operatorname{Re} z > 0$.

Числа Бернулли. Ряд Лорана

$$\frac{z}{e^z - 1} = 1 - \frac{z}{2} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\beta_n}{n!} z^n$$

сходится в кольце $0 < |z| < 2\pi$. Числа β_n удовлетворяют рекуррентному соотношению $(1 + \beta)^{n+1} - \beta^{n+1} = 0$, $n \in \mathbb{N}$, в котором после возведения в степень нужно заменить β^k на β_k . Все числа β_n рациональны, $\beta_{2m+1} = 0$, $m \in \mathbb{N}$, множество их значений ограничено. Числа $B_n = (-1)^n \beta_{2n}$ — положительные и называются числами Бернулли. Несколько первых чисел Бернулли: $B_1 = \frac{1}{6}$, $B_2 = \frac{1}{30}$, $B_3 = \frac{1}{40}$, $B_4 = \frac{1}{30}$, $B_5 = \frac{1}{66}$, $B_6 = \frac{691}{2730}$, $B_7 = \frac{7}{6}$.

Дзета-функция Римана. По определению

$$\zeta(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^x}, \quad x > 1.$$

Интегральное представление: $\zeta(x) = \frac{1}{\Gamma(x)} \int_0^{\infty} \frac{t^{x-1} dt}{e^t - 1}$.

При $x = 2m$, $m \in \mathbb{N}$,

$$B_m = \frac{2(2m)!}{(2\pi)^{2m}} \zeta(2m).$$

Эллиптические интегралы. Эллиптические интегралы 1-го и 2-го рода

$$F(\varphi, k) = \int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}, \quad E(\varphi, k) = \int_0^{\varphi} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi.$$

Полные эллиптические интегралы первого и второго рода

$$K(k) = F(\pi/2, k), \quad E(k) = E(\pi/2, k).$$

Интегралы Френеля:

$$C(z) = \int_0^z \cos \frac{\pi t^2}{2} dt, \quad S(z) = \int_0^z \sin \frac{\pi t^2}{2} dt.$$

Интегралы вероятности:

$$\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt, \quad \operatorname{erf}(-x) = -\operatorname{erf} x, \quad \operatorname{erf} \infty = 1;$$

$$\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt, \quad \operatorname{erf} x + \operatorname{Erf} x = 1.$$

Асимптотическое разложение: $\sqrt{\pi} x e^{x^2} \operatorname{erf} x = 1 + \frac{1}{8x^2} + o\left(\frac{1}{x^2}\right)$, $x \rightarrow +\infty$.

Цилиндрические функции. Функция Бесселя первого рода порядка ν

$$J_{\nu}(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \left(\frac{z}{2}\right)^{2m+\nu}}{m! \Gamma(m + \nu + 1)}$$

удовлетворяет уравнению Бесселя

$$u'' + \frac{1}{z}u' + \left(1 - \frac{\nu^2}{z^2}\right)u = 0;$$

$J_\nu(z)$ — аналитическая функция переменной z с особыми точками $z = 0$ (при нецелом ν) и $z = \infty$, целая функция переменной ν ;

$$J_{-n}(z) = (-1)^n J_n(z), \quad n \in \mathbb{N}_0,$$

$$J_n(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{i(z \sin \varphi - n\varphi)} d\varphi = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sin(z \sin \varphi - n\varphi) d\varphi, \quad n \in \mathbb{N}_0.$$

Асимптотические формулы:

$$J_\nu(z) = \frac{z^\nu}{2^\nu \Gamma(\nu+1)} \left(1 + O(z^2)\right); \quad \nu \in \mathbb{Z}, \quad z \rightarrow 0;$$

$$J_n(z) = \frac{z^n}{2^n n!} \left(1 + O(z^2)\right), \quad n \in \mathbb{N}_0, \quad z \rightarrow 0,$$

$$J_\nu(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \left[\cos\left(x - \frac{\pi\nu}{2} - \frac{\pi}{4}\right) + O\left(\frac{1}{x}\right) \right], \quad x \rightarrow +\infty.$$

Функция Бесселя второго рода порядка ν :

$$Y_\nu(z) = \frac{\cos \pi\nu J_\nu(z) - J_{-\nu}(z)}{\sin \pi\nu}, \quad \nu \in \mathbb{Z},$$

$$Y_n(z) = \lim_{\nu \rightarrow n} Y_\nu(z), \quad n \in \mathbb{Z},$$

является решением уравнения Бесселя. $Y_\nu(z)$ — аналитическая функция переменной z с особыми точками $z = 0$ и $z = \infty$ и целая функция переменной ν . $Y_{-n}(z) = (-1)^n Y_n(z)$.

Асимптотические формулы:

$$Y_\nu(z) = -\frac{2^\nu \Gamma(\nu)}{\pi z^\nu} \left(1 + O(z^2)\right), \quad \operatorname{Re} \nu > 0, \quad \nu \in \mathbb{Z}, \quad z \rightarrow 0;$$

$$Y_0(z) = \frac{2}{\pi} \ln z + O(1), \quad z \rightarrow 0;$$

$$Y_\nu(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \left[\sin\left(x - \frac{\pi\nu}{2} - \frac{\pi}{4}\right) + O\left(\frac{1}{x}\right) \right], \quad x \rightarrow +\infty.$$

Функции Ганкеля:

$$H_\nu^{(1)}(z) = J_\nu(z) + i Y_\nu(z), \quad H_\nu^{(2)}(z) = J_\nu(z) - i Y_\nu(z).$$

Асимптотика при $z = x \rightarrow +\infty$: $H_\nu^{(1,2)}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \left(e^{\pm i(x - \frac{\pi\nu}{2} - \frac{\pi}{4})} + O\left(\frac{1}{x}\right) \right)$.

Рекуррентные соотношения для цилиндрических функций

$$Z_\nu(z) = C_1 J_\nu(z) + C_2 Y_\nu(z),$$

где C_1 и C_2 не зависят ни от z , ни от ν :

$$\frac{d}{dz}(z^\nu Z_\nu(z)) = z^\nu Z_{\nu-1}(z), \quad \frac{d}{dz}(z^{-\nu} Z_\nu(z)) = -z^{-\nu} Z_{\nu+1}(z),$$

$$zZ'_\nu(z) + \nu Z_\nu(z) = zZ_{\nu-1}(z), \quad Z_{\nu-1}(z) + Z_{\nu+1}(z) = \frac{2\nu}{z} Z_\nu(z),$$

$$zZ'_\nu(z) - \nu Z_\nu(z) = -zZ_{\nu+1}(z), \quad Z_{\nu-1}(z) - Z_{\nu+1}(z) = 2Z'_\nu(z).$$

Функции Бесселя полуцелого порядка:

$$J_{n-1/2}(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} z^n \left(-\frac{d}{zdz}\right)^n \cos z, \quad Y_{n-1/2}(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} z^n \left(-\frac{d}{zdz}\right)^n \sin z,$$

$$H_{n-1/2}^{(1),(2)}(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} z^n \left(-\frac{d}{zdz}\right)^n e^{\pm iz},$$

$$J_{1/2}(z) = Y_{-1/2}(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \sin z, \quad Y_{1/2}(z) = J_{-1/2}(z) = -\sqrt{\frac{2}{\pi z}} \cos z,$$

$$H_{1/2}^{(1)}(z) = -iH_{-1/2}^{(1)}(z) = -i\sqrt{\frac{2}{\pi z}} e^{iz}, \quad H_{1/2}^{(2)}(z) = iH_{-1/2}^{(2)}(z) = i\sqrt{\frac{2}{\pi z}} e^{-iz}.$$

Вронскианы и некоторые формулы:

$$W[J_\nu, J_{-\nu}] = -\frac{2 \sin \pi \nu}{\pi z}, \quad W[J_\nu, Y_\nu] = \frac{2}{\pi z},$$

$$W[J_\nu, H_\nu^{(1),(2)}] = \pm \frac{2i}{\pi z}, \quad W[H_\nu^{(1)}, H_\nu^{(2)}] = -\frac{4i}{\pi z},$$

$$J_\nu(z)J_{-\nu+1}(z) + J_{-\nu}(z)J_{\nu-1}(z) = \frac{2 \sin \pi \nu}{\pi z}, \quad J_\nu(z)Y_{\nu-1}(z) - Y_\nu(z)J_{\nu-1}(z) = \frac{2}{\pi z}.$$

Модифицированные функции Бесселя $I_\nu(z)$ и $K_\nu(z)$ являются решениями модифицированного уравнения Бесселя

$$u'' + \frac{1}{z}u' - \left(1 + \frac{\nu^2}{z^2}\right)u = 0.$$

$$I_\nu(z) = e^{-\frac{i\pi\nu}{2}} J_\nu(iz) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^{2m+\nu}}{m! \Gamma(m+\nu+1)},$$

$$K_\nu(z) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} \frac{I_{-\nu}(z) - I_\nu(z)}{\sin \pi \nu}, & \nu \notin \mathbb{Z}, \\ \lim_{\nu \rightarrow n} K_\nu(z), & n \in \mathbb{Z}, \end{cases}$$

$$K_\nu(z) = \frac{i\pi}{2} e^{\frac{i\pi\nu}{2}} H_\nu^{(1)}(iz) = -\frac{i\pi}{2} e^{-\frac{i\pi\nu}{2}} H_\nu^{(2)}(-iz),$$

$$I_{-n}(z) = I_n(z), \quad n \in \mathbb{N}_0, \quad K_{-\nu}(z) = K_\nu(z).$$

$$I_n(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{z \cos \varphi - in\varphi} d\varphi = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi e^{z \cos \varphi} \cos(n\varphi) d\varphi, \quad n \in \mathbb{N}_0.$$

$$K_\nu(z) = \frac{2^\nu \Gamma(\nu + 1/2) z^\nu}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{\cos t \, dt}{(z^2 + t^2)^{\nu+1/2}}.$$

Асимптотические формулы:

$$K_\nu(z) = -\frac{2^{\nu-1} \Gamma(-\nu)}{z^\nu} \left(1 + \mathcal{O}(z^2)\right), \quad \nu > 0, \quad z \rightarrow 0;$$

$$K_0(z) = \ln \frac{1}{z} + \mathcal{O}(1), \quad z \rightarrow 0;$$

$$I_\nu(x) = \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}} \left[1 + \mathcal{O}\left(\frac{1}{x}\right)\right], \quad x \rightarrow +\infty;$$

$$K_\nu(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2x}} e^{-x} \left[1 + \mathcal{O}\left(\frac{1}{x}\right)\right], \quad x \rightarrow +\infty.$$

Рекуррентные соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz}(z^\nu I_\nu(z)) &= z^\nu I_{\nu-1}(z), & \frac{d}{dz}(z^{-\nu} I_\nu(z)) &= z^{-\nu} I_{\nu+1}(z), \\ zI'_\nu(z) + \nu I_\nu(z) &= zI_{\nu-1}(z), & I_{\nu-1}(z) - I_{\nu+1}(z) &= \frac{2\nu}{z} I_\nu(z), \\ zI'_\nu(z) - \nu I_\nu(z) &= zI_{\nu+1}(z), & I_{\nu-1}(z) + I_{\nu+1}(z) &= 2I'_\nu(z). \\ \frac{d}{dz}(z^\nu K_\nu(z)) &= -z^\nu K_{\nu-1}(z), & \frac{d}{dz}(z^{-\nu} K_\nu(z)) &= -z^{-\nu} K_{\nu+1}(z), \\ zK'_\nu(z) + \nu K_\nu(z) &= -zK_{\nu-1}(z), & K_{\nu-1}(z) - K_{\nu+1}(z) &= -\frac{2\nu}{z} K_\nu(z), \\ zK'_\nu(z) - \nu K_\nu(z) &= -zK_{\nu+1}(z), & K_{\nu-1}(z) + K_{\nu+1}(z) &= -2K'_\nu(z). \end{aligned}$$

Модифицированные функции Бесселя полуцелого порядка:

$$\begin{aligned} I_{n-1/2}(z) &= \sqrt{\frac{2}{\pi z}} z^n \left(\frac{d}{zdz}\right)^n \operatorname{ch} z, & K_{n-1/2}(z) &= \sqrt{\frac{\pi}{2z}} z^n \left(-\frac{d}{zdz}\right)^n e^{-z}, \\ I_{-1/2}(z) &= \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \operatorname{ch} z, & I_{1/2}(z) &= \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \operatorname{sh} z, & K_{1/2}(z) &= \sqrt{\frac{\pi}{2z}} e^{-z}. \end{aligned}$$

Вронскианы и некоторые формулы:

$$\begin{aligned} W[I_\nu, I_{-\nu}] &= -\frac{2\sin \pi\nu}{\pi z}, & W[I_\nu, K_\nu] &= -\frac{1}{z}, \\ I_\nu(z)I_{-\nu+1}(z) - I_{-\nu}(z)I_{\nu-1}(z) &= -\frac{2\sin \pi\nu}{\pi z}, \\ I_\nu(z)K_{\nu+1}(z) + K_\nu(z)I_{\nu+1}(z) &= \frac{1}{z}. \end{aligned}$$

Функции Кельвина:

$$J_\nu(ze^{\pm \frac{3i\pi}{4}}) = \operatorname{ber}_\nu z \pm i \operatorname{bei}_\nu z, \quad e^{\mp \frac{i\pi\nu}{2}} K_\nu(ze^{\pm \frac{i\pi}{4}}) = \operatorname{ker}_\nu z \pm i \operatorname{kei}_\nu z.$$

Модифицированная функция Струве:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_\nu(z)\Gamma(\nu + \frac{1}{2}) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{z}{2}\right)^\nu \int_0^{\frac{\pi}{2}} \operatorname{sh}(z \cos \varphi) (\sin \varphi)^{2\nu} d\varphi, \quad \operatorname{Re} \nu > -\frac{1}{2}, \\ \mathbf{L}_\nu(z) &= \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^{\nu+2m+1}}{\Gamma(m + \frac{3}{2})\Gamma(\nu + m + \frac{3}{2})}. \end{aligned}$$

Классические ортогональные полиномы. Полиномы Якоби

$$P_n^{(\alpha, \beta)}(x) = \frac{(-1)^n}{2^n n!} (1-x)^{-\alpha} (1+x)^{-\beta} \frac{d^n}{dx^n} [(1-x)^{n+\alpha} (1+x)^{n+\beta}],$$

где $\alpha > -1$, $\beta > -1$, ортогональны с весом $\rho(x) = (1-x)^\alpha (1+x)^\beta$ на промежутке $(-1, 1)$ и удовлетворяют уравнению

$$(1-x^2)u'' + [\beta - \alpha - (\alpha + \beta + 2)x]u' + n(n + \alpha + \beta + 1)u = 0.$$

Квадрат нормы: $\|P_n^{(\alpha, \beta)}\|^2 = \frac{2^{\alpha+\beta+1} \Gamma(n+\alpha+1) \Gamma(n+\beta+1)}{n! (2n+\alpha+\beta+1) \Gamma(n+\alpha+\beta+1)}.$

Полиномы Лежандра

$$P_n(x) = P_n^{(0,0)} = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n$$

ортогональны на промежутке $(-1, 1)$ с весом $\rho(x) = 1$ и удовлетворяют уравнению Лежандра

$$(1 - x^2)u'' - 2xu' + n(n+1)u = 0.$$

Свойство четности: $P_n(-x) = (-1)^n P_n(x)$. Квадрат нормы: $\|P_n\|^2 = \frac{2}{2n+1}.$

Рекуррентные соотношения:

$$xP_n(x) = \frac{n+1}{2n+1}P_{n+1}(x) + \frac{n}{2n+1}P_{n-1}(x), \quad P_n(x) = \frac{P'_{n+1}(x) - P'_{n-1}(x)}{2n+1}, \quad n \geq 1.$$

Производящая функция:

$$\frac{1}{\sqrt{1-2tx+x^2}} = \sum_{n=0}^{\infty} P_n(x)t^n, \quad |t| < 1.$$

Несколько первых полиномов:

$$\begin{aligned} P_0(x) &= 1, & P_1(x) &= x, & P_2(x) &= \frac{3x^2 - 1}{2}, \\ P_3(x) &= \frac{5x^3 - 3x}{2}, & P_4(x) &= \frac{35x^4 - 30x^2 + 3}{8}. \end{aligned}$$

Частные значения:

$$P_n(1) = 1, \quad P_n(-1) = (-1)^n, \quad P_{2n+1}(0) = 0, \quad P_{2n}(0) = \frac{(-1)^n (2n)!}{2^{2n} (n!)^2}.$$

Второе решение уравнения Лежандра — функции Лежандра второго рода:

$$Q_0(x) = \frac{1}{2} \ln \frac{1+x}{1-x}, \quad Q_1(x) = \frac{x}{2} \ln \frac{1+x}{1-x}, \quad Q_3(x) = \frac{1}{4} (3x^2 - 1) \ln \frac{1+x}{1-x} - \frac{3}{2}x, \dots;$$

функции $Q_n(x)$ удовлетворяют тому же рекуррентному соотношению, что и полиномы Лежандра

$$xQ_n(x) = \frac{n+1}{2n+1}Q_{n+1}(x) + \frac{n+1}{2n+1}Q_{n-1}(x).$$

Полиномы Чебышева–Лагерра

$$L_n^\alpha(x) = \frac{1}{n!} x^{-\alpha} e^x \frac{d^n}{dx^n} (x^{n+\alpha} e^{-x}), \quad \alpha > -1,$$

ортогональны с весом $\rho(x) = x^\alpha e^{-x}$ на полуоси $(0, \infty)$ и удовлетворяют уравнению

$$xu'' + (1 + \alpha - x)u' + nu = 0.$$

Квадрат нормы: $\|L_n^\alpha\|^2 = \frac{\Gamma(n+\alpha+1)}{n!}.$

Рекуррентные соотношения:

$$xL_n^\alpha(x) = -(n+1)L_{n+1}^\alpha(x) + (2n+\alpha+1)L_{n-1}^\alpha(x) - (n+\alpha)L_n^\alpha(x),$$

$$\frac{d}{dx}L_n^\alpha(x) = -L_{n-1}^{\alpha+1}(x), \quad n \geq 1.$$

Производящая функция:

$$\frac{e^{-\frac{xt}{1-t}}}{(1-t)^{\alpha+1}} = \sum_{n=0}^{\infty} L_n^\alpha(x)t^n, \quad |t| < 1;$$

$$L_0^\alpha(x) = 1, \quad L_1^\alpha(x) = 1 + \alpha - x, \quad L_2^\alpha(x) = (\alpha+2)(\alpha+1) - 2(\alpha+2)x + x^2.$$

Полиномы Чебышева-Эрмита

$$H_n(x) = (-1)^n e^{x^2} \frac{d^n}{dx^n} e^{-x^2}$$

ортогональны с весом $\rho(x) = e^{-x^2}$ на оси $(-\infty, \infty)$ и удовлетворяют уравнению

$$u'' - 2xu' + 2nu = 0.$$

Свойство четности: $H_n(-x) = (-1)^n H_n(x)$.

Квадрат нормы: $\|H_n\|^2 = 2^n n! \sqrt{\pi}$. Рекуррентные соотношения:

$$xH_n(x) = \frac{1}{2}H_{n+1}(x) - nH_{n-1}(x), \quad H'_n(x) = 2nH_{n-1}(x), \quad n \geq 1.$$

Производящая функция:

$$e^{2xt-t^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n(x)}{n!} t^n;$$

$$H_0(x) = 1, \quad H_1(x) = 2x, \quad H_2(x) = 4x^2 - 2, \quad H_3(x) = 8x^3 - 12x.$$

Присоединенные функции Лежандра

$$P_n^m(x) = (1-x^2)^{\frac{m}{2}} P_n^{(m)}(x), \quad m, n \in \mathbb{N},$$

ортогональны на промежутке $(-1, 1)$ с весом $\rho(x) = 1$ и удовлетворяют уравнению

$$(1-x^2)u'' - 2xu' + \left[n(n+1) - \frac{m^2}{1-x^2} \right] u = 0.$$

Квадрат нормы: $\|P_n^m\|^2 = \frac{(n+m)!}{(n-m)!} \frac{2}{2n+1}$. Если $x = \cos \theta$, то:

$$P_0^0(\cos \theta) = 1, \quad P_1^0(\cos \theta) = \cos \theta, \quad P_1^1(\cos \theta) = \sin \theta,$$

$$P_2^0(\cos \theta) = \frac{1}{2}(3\cos^2 \theta - 1), \quad P_2^1(\cos \theta) = 3\sin \theta \cos \theta, \quad P_2^2(\cos \theta) = 3\sin^2 \theta,$$

$$P_3^0(\cos \theta) = \frac{1}{2}(5\cos^3 \theta - 3\cos \theta), \quad P_3^1(\cos \theta) = \frac{15\cos^2 \theta - 3}{2} \sin \theta,$$

$$P_3^2(\cos \theta) = 15\sin^2 \theta \cos \theta, \quad P_3^3(\cos \theta) = 15\sin^3 \theta,$$

$$P_4^0(\cos \theta) = \frac{1}{8}(35\cos^4 \theta - 30\cos^2 \theta + 3), \quad P_4^1(\cos \theta) = \frac{5}{2}\sin \theta \cos \theta (7\cos^2 \theta - 3),$$

$$P_4^2(\cos \theta) = \frac{15}{2}\sin^2 \theta (7\cos^2 \theta - 1), \quad P_4^3(\cos \theta) = 105\sin^3 \theta \cos \theta,$$

$$P_4^4(\cos \theta) = 105\sin^4 \theta, \quad P_n^n(\cos \theta) = \frac{(2n)!}{2^n n!} \sin^n \theta.$$

Сферические функции. Сферическими функциями $Y_n(\theta, \varphi)$ порядка n называются однородные гармонические многочлены $u_n(\mathbf{r})$ степени n , рассматриваемые на единичной сфере: $r^n Y_n(\theta, \varphi) = u_n(\mathbf{r})$, т.е. между сферическими функциями и однородными гармоническими многочленами имеется взаимно однозначное соответствие (см. [15]). Функции $Y_n(\theta, \varphi)$ выражаются через фундаментальные сферические функции:

$$Y_n(\theta, \varphi) = \sum_{m=-n}^{m=n} Y_n^m(\theta, \varphi).$$

Фундаментальные сферические функции

$$Y_n^m(\theta, \varphi) = P_n^{|m|}(\cos \theta) \cdot \begin{cases} \sin m\varphi, & m = 1, 2, \dots, n, \\ \cos m\varphi, & m = 0, -1, \dots, -n, \end{cases}$$

ортогональны (с весом $\rho = 1$) на единичной сфере,

$$\int_{S_1} Y_n^m(\mathbf{s}) Y_n^{m'}(\mathbf{s}) ds = 0, \quad (m, n) \neq (m', n'),$$

и удовлетворяют дифференциальному уравнению

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + n(n+1)u = 0, \quad n \in \mathbb{N}.$$

Квадрат нормы: $\|Y_n^m\|^2 = \frac{(n+|m|)!}{(n-|m|)!} \frac{2\pi(1+\delta_{nm})}{2n+1}$.

Несколько первых фундаментальных сферических функций:

$$\begin{aligned} Y_1^1(\theta, \varphi) &= \sin \theta \sin \varphi, & Y_2^1(\theta, \varphi) &= 3 \sin \theta \cos \theta \sin \varphi, \\ Y_2^2(\theta, \varphi) &= 3 \sin^2 \theta \sin 2\varphi, & Y_3^1(\theta, \varphi) &= \frac{1}{2}(15 \cos^2 \theta - 3) \sin \theta \sin \varphi, \\ Y_3^2(\theta, \varphi) &= 15 \sin^2 \theta \cos \theta \sin 2\varphi, & Y_3^3(\theta, \varphi) &= 15 \sin^3 \theta \sin 3\varphi, \\ Y_4^1(\theta, \varphi) &= \frac{5}{4} \sin 2\theta (7 \cos^2 \theta - 3) \sin \varphi, & Y_4^2(\theta, \varphi) &= \frac{15}{2} \sin^2 \theta (7 \cos^2 \theta - 1) \sin 2\varphi, \\ Y_4^3(\theta, \varphi) &= 105 \sin^3 \theta \cos \theta \sin 3\varphi, & Y_4^4(\theta, \varphi) &= 105 \sin^4 \theta \sin 4\varphi. \end{aligned}$$

Теорема сложения для полиномов Лежандра:

$$P_n((\mathbf{s}, \mathbf{s}')) = \sum_{m=-n}^{m=n} \frac{2}{1+\delta_{0m}} \frac{(n-|m|)!}{(n+|m|)!} Y_n^m(\mathbf{s}) Y_n^m(\mathbf{s}'),$$

$\mathbf{s}, \mathbf{s}'$ — единичные векторы.

Гипергеометрические функции. По определению

$$\forall \lambda \in \mathbb{C}: (\lambda)_n = \begin{cases} 1, & n = 0, \\ \lambda(\lambda+1)(\lambda+2) \cdot \dots \cdot (\lambda+n-1), & n \in \mathbb{N}. \end{cases}$$

Гипергеометрический ряд

$$F(\alpha, \beta, \gamma, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\alpha)_n (\beta)_n}{(\gamma)_n n!} z^n, \quad \gamma \neq -1, -2, -3, \dots$$

сходится в круге $|z| < 1$ и определяет аналитическую (относительно аргумента z) функцию $F(\alpha, \beta, \gamma, z)$, называемую гипергеометрической функцией. Функция $F(\alpha, \beta, \gamma, z)$ симметрична относительно первых двух аргументов: $F(\alpha, \beta, \gamma, z) = F(\beta, \alpha, \gamma, z)$; при $\alpha = -n$, $n \in \mathbb{N}_0$, гипергеометрическая функция $F(-n, \beta, \gamma, z) = p_n(z)$, где $p_n(z)$ — многочлен степени n . Решения гипергеометрического уравнения (уравнения Гаусса)

$$z(1-z)u'' + [\gamma - (\alpha + \beta + 1)z]u' - \alpha\beta u = 0$$

в окрестностях особых точек $z = 0$, $z = 1$, $z = \infty$ выражаются через гипергеометрические ряды:

в окрестности $|z| < 1$ точки $z = 0$

$$u_1(z) = F(\alpha, \beta, \gamma, z), \quad u_2(z) = z^{1-\gamma} F(\alpha - \gamma + 1, \beta - \gamma + 1, 2 - \gamma, z);$$

в окрестности $|z - 1| < 1$ точки $z = 1$

$$u_3(z) = F(\alpha, \beta, \alpha + \beta - \gamma + 1, 1 - z),$$

$$u_4(z) = (1 - z)^{\gamma - \alpha - \beta} F(\gamma - \beta, \gamma - \alpha, \gamma - \alpha - \beta + 1, 1 - z);$$

в окрестности $|z| > 1$ точки $z = \infty$

$$u_5(z) = z^{-\alpha} F\left(\alpha, \alpha - \gamma + 1, \alpha - \beta + 1, \frac{1}{z}\right),$$

$$u_6(z) = z^{-\beta} F\left(\beta, \beta - \gamma + 1, \beta - \alpha + 1, \frac{1}{z}\right).$$

Аналитическое продолжение гипергеометрического ряда, определенного в круге $|z| < 1$, на всю комплексную плоскость определяет многозначную аналитическую функцию с особыми точками $z = 0$, $z = 1$, $z = \infty$. Гипергеометрические функции от аргументов z , $1 - z$, $1 - 1/z$ связаны следующими соотношениями (они являются средством аналитического продолжения гипергеометрической функции):

$$F(\alpha, \beta, \gamma, z) = \frac{\Gamma(\gamma)\Gamma(\gamma - \alpha - \beta)}{\Gamma(\gamma - \alpha)\Gamma(\gamma - \beta)} F(\alpha, \beta, \alpha + \beta - \gamma + 1, 1 - z) +$$

$$+ \frac{\Gamma(\gamma)\Gamma(\alpha + \beta - \gamma)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} (1 - z)^{\gamma - \alpha - \beta} F(\gamma - \alpha, \gamma - \beta, \gamma - \alpha - \beta + 1, 1 - z),$$

$|\arg(1 - z)| < \pi$,

$$F(\alpha, \beta, \gamma, z) = \frac{\Gamma(\gamma)\Gamma(\beta - \alpha)}{\Gamma(\beta)\Gamma(\gamma - \alpha)} (-z)^{-\alpha} F(\alpha, \alpha - \gamma + 1, \alpha - \beta + 1, z^{-1}) +$$

$$+ \frac{\Gamma(\gamma)\Gamma(\alpha - \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\gamma - \beta)} (-z)^{-\beta} F(\beta, \beta - \gamma + 1, \beta - \alpha + 1, z^{-1}), \quad |\arg(-z)| < \pi,$$

$$F(\alpha, \beta, \gamma, z) = \frac{\Gamma(\gamma)\Gamma(\beta - \alpha)}{\Gamma(\beta)\Gamma(\gamma - \alpha)} (1 - z)^{-\alpha} F(\alpha, \gamma - \beta, \alpha - \beta + 1, (1 - z)^{-1}) +$$

$$+ \frac{\Gamma(\gamma)\Gamma(\alpha - \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\gamma - \beta)} (-z)^{-\beta} F(\beta, \gamma - \alpha, \beta - \alpha + 1, (1 - z)^{-1}), \quad |\arg(1 - z)| < \pi.$$

Формула дифференцирования:

$$\frac{d^n F(\alpha, \beta, \gamma, z)}{dz^n} = \frac{(\alpha)_n (\beta)_n}{(\gamma)_n} F(\alpha + n, \beta + n, \gamma + n, z).$$

Интегральное представление:

$$F(\alpha, \beta, \gamma, z) = \frac{\Gamma(\gamma)}{\Gamma(\beta)\Gamma(\gamma-\beta)} \int_0^1 t^{\beta-1} (1-t)^{\gamma-\beta-1} (1-tz)^{-\alpha} dt, \quad |\arg(1-z)| < \pi,$$

при условиях $\operatorname{Re} \gamma > \operatorname{Re} \beta > 0$.

Асимптотика при $z \rightarrow \infty$:

$$F(\alpha, \beta, \gamma, z) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\gamma)\Gamma(\beta-\alpha)}{\Gamma(\beta)\Gamma(\gamma-\alpha)} (-z)^{-\alpha} + O(z^{-\alpha}), & \operatorname{Re} \alpha < \operatorname{Re} \beta, \\ \frac{\Gamma(\gamma)\Gamma(\alpha-\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\gamma-\beta)} (-z)^{-\beta} + O(z^{-\beta}), & \operatorname{Re} \alpha > \operatorname{Re} \beta. \end{cases}$$

Вырожденная гипергеометрическая функция определяется рядом

$$\Phi(\alpha, \gamma, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\alpha)_n z^n}{(\gamma)_n n!}, \quad \gamma \neq 0, -1, -2, \dots,$$

радиус сходимости которого $R = \infty$, и является решением дифференциального уравнения Куммера

$$zu'' + (\gamma - z)u' - \alpha u = 0.$$

Выражения некоторых функций через гипергеометрические:

$$(1-z)^{-\mu} = F(\mu, (1, 1, z), \quad (1-z)^n = F(-n, (1, 1, z), \quad n \in \mathbb{N}, \\ z^n = F(-n, 1, 1, z); \quad \ln(1-z) = -zF(1, 1, 2, z), \quad |\arg(1-z)| < \pi;$$

полиномы Лежандра $P_n = F(-n, n+1, 1, \frac{1-z}{2})$; $e^z = \Phi(1, 1, z)$; полиномы

Чебышева-Лагерра: $L_n^\alpha(z) = \frac{(1+\alpha)_n}{n!} \Phi(-n, 1+\alpha, z)$.

Некоторые ряды и интегралы:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi n x}{a}}{n} = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{x}{a}\right), \quad 0 < x \leq a; \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} \sin \frac{\pi n x}{a}}{n} = \frac{\pi x}{2a}, \quad 0 \leq x < a;$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos \frac{(2n+1)\pi x}{2a}}{(2n+1)^2} = \frac{\pi^2}{8} \left(1 - \frac{x}{a}\right), \quad 0 \leq x \leq a;$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin \frac{(2n+1)\pi x}{2a}}{(2n+1)^2} = \frac{\pi^2 x}{8a}, \quad 0 \leq x \leq a;$$

$$\sum_1^{\infty} \frac{t^n \cos nx}{n} = \ln \frac{1}{\sqrt{1+t^2-2tx}}, \quad |t| < 1; \quad e^{\frac{z}{2}\left(t-\frac{1}{t}\right)} = \sum_{-\infty}^{\infty} J_n(z) t^n, \quad 0 < |t| < \infty;$$

$$e^{\frac{z}{2}\left(t+\frac{1}{t}\right)} = \sum_{-\infty}^{\infty} I_n(z) t^n, \quad 0 < |t| < \infty.$$

Разложение плоской волны по косинусам:

$$e^{ikr \cos \varphi} = J_0(kr) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n J_n(kr) \cos n\varphi;$$

разложение плоской волны по полиномам Лежандра:

$$\begin{aligned}
 e^{ikr \cos \theta} &= \sqrt{\frac{\pi}{2kr}} \sum_{n=0}^{\infty} i^n (2n+1) J_{n+\frac{1}{2}}(kr) P_n(\cos \theta); \\
 \int_0^{\infty} e^{-a^2 x^2} dx &= \frac{\sqrt{\pi}}{2a}, \quad a > 0; \quad \int_0^{\infty} e^{-a^2 x^2 \cos bx} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a} e^{-\frac{b^2}{4a^2}}, \quad a > 0; \\
 \int_0^{\infty} e^{-a^2 x^2 - \frac{b^2}{x^2}} dx &= \frac{\sqrt{\pi}}{2a} e^{-2ab}, \quad a > 0, \quad b > 0; \\
 \int_0^{\infty} \frac{x^{\alpha-1}}{1+x} dx &= \frac{\pi}{\sin \pi \alpha}, \quad 0 < \operatorname{Re} \alpha < 1; \quad \int_0^{\infty} \frac{\sin ax}{x} dx = \frac{\pi}{2} \operatorname{sign} a; \\
 \int_0^l \frac{e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2}}}{2a\sqrt{\pi t}} d\xi &= \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{l-x}{2a\sqrt{t}} + \operatorname{erf} \frac{x}{2a\sqrt{t}} \right); \\
 \int_0^l \frac{e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2} - \alpha \xi}}{2a\sqrt{\pi t}} d\xi &= \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{l-x}{2a\sqrt{t}} + \alpha a \sqrt{t} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} - \alpha a \sqrt{t} \right) \right]; \\
 \int_0^l \frac{e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2} - \alpha \xi^2}}{2a\sqrt{\pi t}} d\xi &= \frac{e^{-\frac{4\alpha a^2 t x^2}{1+4\alpha a^2 t}}}{2\sqrt{1+4\alpha a^2 t}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{l(1+4\alpha a^2 t) - x}{2a\sqrt{t(1+4\alpha a^2 t)}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t(1+4\alpha a^2 t)}} \right) \right]; \\
 \int_y^{\infty} e^{-\alpha^2 \xi^2 - \frac{\beta^2}{\xi^2}} d\xi &= \frac{1}{2\alpha} \left[e^{2\alpha\beta} \operatorname{Erf} \left(\alpha y + \frac{\beta}{y} \right) + e^{-2\alpha\beta} \operatorname{erf} \left(\alpha y - \frac{\beta}{y} \right) \right], \quad \alpha > 0, \quad \beta \geq 0; \\
 \int_0^{\infty} e^{-a^2 \lambda^2 t} J_0(\lambda r) J_0(\lambda r') d\lambda &= \frac{1}{2a^2 t} I_0 \left(\frac{r+r'}{2a^2 t} \right) e^{-\frac{r^2+r'^2}{4a^2 t}}.
 \end{aligned}$$

Необходимые условия экстремума функционалов:

$$\begin{aligned}
 \Phi(y) &= \int_{x_0}^x F(x, y, y') dx \implies F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} = 0; \\
 \Phi(y_1, y_2, \dots, y_n) &= \int_{x_0}^x F(x, y_1, y_2, \dots, y_n, y'_1, y'_2, \dots, y'_n) dx \implies \\
 &\implies F_{y_i} - \frac{d}{dx} F_{y'_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \\
 \Phi(y) &= \int_{x_0}^x F(x, y', y'', \dots, y^n) dx \implies \\
 &\implies F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} + \frac{d^2}{dx^2} F_{y''} - \dots (-1)^n \frac{d^n}{dx^n} F_{y^n} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \\
 \Phi((z(x), y)) &= \int_{\Omega} F(x, y, z, z_x, z_y) dx dy = 0 \implies \\
 &\implies F_z - \frac{\partial}{\partial x} [F_p] - \frac{\partial}{\partial y} [F_q] = 0; \quad \frac{\partial}{\partial x} [F_p] = F_{px} + F_{pz} \frac{\partial z}{\partial x} + F_{pp} \frac{\partial p}{\partial x} + F_{pq} \frac{\partial q}{\partial x}, \\
 \frac{\partial}{\partial y} [F_q] &= F_{qy} + F_{qz} \frac{\partial z}{\partial y} + F_{qp} \frac{\partial p}{\partial y} + F_{qq} \frac{\partial q}{\partial y}, \quad p = z_x, \quad q = z_y.
 \end{aligned}$$

Интегральное преобразование Лапласа

Формулы для функций Бесселя J_ν и I_ν применимы при $\operatorname{Re} \nu > -1$.

оригинал	изображение	оригинал	изображение
$t^a, a > -1$	$\frac{\Gamma(a+1)}{p^{a+1}}$	$e^{-p_0 t}$	$\frac{1}{p - p_0}$
$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$	$\cos \omega t$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$
$e^{-\lambda t} \sin \omega t$	$\frac{\omega^2}{(p + \lambda)^2 + \omega^2}$	$e^{-\lambda t} \cos \omega t$	$\frac{p + \lambda}{(p + \lambda)^2 + \omega^2}$
$t \sin \omega t$	$\frac{2p\omega}{(p^2 + \omega^2)^2}$	$t \cos \omega t$	$\frac{p^2 - \omega^2}{(p^2 + \omega^2)^2}$
$\frac{\sin at}{t}$	$\operatorname{arccctg} \frac{a}{p}$	$\frac{ab \sin at * \sin bt}{b^2 - a^2}$	$\frac{1}{p^2 + a^2} - \frac{1}{p^2 + b^2}$
$\operatorname{sh} at$	$\frac{a}{p^2 - a^2}$	$\operatorname{ch} at$	$\frac{p}{p^2 - a^2}$
$J_\nu(at)$	$\frac{(\sqrt{p^2 + a^2} - p)^\nu}{a^\nu \sqrt{p^2 + a^2}}$	$I_\nu(at)$	$\frac{(p - \sqrt{p^2 - a^2})^\nu}{a^\nu \sqrt{p^2 - a^2}}$
$\left(\frac{t}{a}\right)^{\frac{\nu}{2}} J_\nu(2a\sqrt{t})$	$\frac{1}{p^{\nu+1}} e^{-\frac{a}{p}}, a \geq 0$	$\left(\frac{t}{a}\right)^{\frac{\nu}{2}} I_\nu(2a\sqrt{t})$	$\frac{1}{p^{\nu+1}} e^{\frac{a}{p}}, a \geq 0$
$\frac{J_1(at)}{at}$	$\frac{1}{p + \sqrt{p^2 + a^2}}$	$e^{-at} I_0(bt)$	$\frac{1}{\sqrt{(p+a)^2 - b^2}}$
$L_n(t)$	$\frac{1}{p} \left(1 - \frac{1}{p}\right)^n$	$\frac{1}{\sqrt{1+t}}$	$\frac{\sqrt{\pi}}{p} e^p \operatorname{erf} \sqrt{p}$
$\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{a}{t}} \frac{1}{t+a}, a \geq 0$	$e^{ap} \operatorname{erf} \sqrt{ap}$	$\frac{1}{\sqrt{\pi t}} e^{-2a\sqrt{t}}$	$\frac{1}{\sqrt{p}} e^{\frac{a^2}{p}} \operatorname{erf} \frac{a}{\sqrt{p}}$
$\frac{1}{\sqrt{\pi t}} e^{2\sqrt{t}}$	$\frac{1}{\sqrt{p}} e^{\frac{1}{p}} \operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{p}}$	$\operatorname{erf}\left(\frac{t}{2}\right)$	$\frac{1}{p} e^{p^2} \operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{p}}$
$\operatorname{erf}\left(\frac{1}{2}\right) \sqrt{\frac{a}{t}}, a \geq 0$	$\frac{e^{\sqrt{ap}} - 1}{p}$	$e^{-a^2 t^2}$	$\frac{\sqrt{\pi}}{2 a } e^{\frac{p^2}{4a^2}} \operatorname{erf} \frac{p}{2 a }$
$\frac{1}{\sqrt{\pi t}} e^{-\frac{a^2}{4t}}, \alpha \geq 0$	$\frac{\sqrt{p}}{2} e^{\frac{p^2}{4a^2}} \operatorname{erf} \frac{p}{2a}$	$\frac{1}{\sqrt{\pi t}} e^{-2at}, a \geq 0$	$\frac{\sqrt{\pi}}{p} e^p \operatorname{erf} \sqrt{p}$
$1 - 2e^{a^2 t} \operatorname{erf}(a\sqrt{t})$	$\frac{1}{p} \frac{a - \sqrt{p}}{a + \sqrt{p}}, a \geq 0$	$\operatorname{erf}(\sqrt{at}), a \geq 0$	$\frac{\sqrt{a}}{p\sqrt{p+a}}$
$\frac{e^{-\sqrt{at}}}{\sqrt{at}} + \sqrt{a} \operatorname{erf}(\sqrt{at})$	$\frac{\sqrt{p+a}}{p}, a \geq 0$	$e^{a^2 t} \operatorname{erf}(a\sqrt{t})$	$\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{p}(p-a^2)}$

оригинал	изображение	оригинал	изображение
$1 - e^{a^2 t} \operatorname{erf}(a\sqrt{t})$	$\frac{a}{p(\sqrt{p} + a)}, a \geq 0$	$e^{a^2 t} \operatorname{erf}(a\sqrt{t})$	$\frac{1}{\sqrt{p}(\sqrt{p} + a)}$
$\frac{1}{\sqrt{\pi t}} - a e^{a^2 t} \operatorname{erf}(a\sqrt{t})$	$\frac{1}{\sqrt{p} + a}$	$\operatorname{erf} \frac{a}{2\sqrt{t}}, a \geq 0$	$\frac{1}{p} e^{-ap}$
$\frac{\sin 2\sqrt{t}}{\pi t}$	$\operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{p}}$	$\frac{\sin 2\sqrt{t}}{\sqrt{\pi t}}$	$\frac{1}{i\sqrt{p}} e^{-\frac{1}{p}} \operatorname{erf} \frac{i}{\sqrt{p}}$
$\frac{\cos 2\sqrt{at}}{\sqrt{\pi t}}$	$\frac{1}{\sqrt{p}} e^{-\frac{a}{\sqrt{p}}}$	$\sqrt{\frac{2}{\pi t}} \sin at$	$\sqrt{\frac{\sqrt{p^2 + a^2} - p}{p^2 + a^2}}$
$\operatorname{ber}_0(2\sqrt{t})$	$\frac{1}{p} \cos \frac{1}{p}$	$\operatorname{bei}_0(2\sqrt{t})$	$\frac{1}{p} \sin \frac{1}{p}$

Конформные отображения. D_z — область комплексной плоскости (z), D_w — область комплексной плоскости (w), $w = w(z)$ — функция, конформно отображающая D_z на D_w возможно при дополнительных условиях. Ниже используются обозначения: D^+ — верхняя полуплоскость, $\Pi(0, H)$ — полоса, стороны которой параллельны вещественной оси и отстоят от нее на расстояниях, равных нулю, и $H > 0$, $B(z, r)$ — круг с центром в точке z , радиус которого r , $B(r) = B(0, r)$; $A, B, C, \dots$ — комплексные числа, $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ — вещественные числа, $a, b, c, \dots$ — неотрицательные числа, $z = x + iy = re^{i\varphi}$, $w = u + iv = \rho e^{i\theta}$.

1. D_z — внешность отрезка, концы которого z_1 и z_2 (плоскость с разрезом по отрезку (z_1, z_2)), $D_w = \{w: 0 < u < \infty, v = 0\} : w = -\lambda^2 \frac{z - z_1}{z - z_2}$; знак выбран так, что при обходе разреза в положительном направлении (область остается слева) точка $w(z)$ движется также в положительном направлении.

2. $D_z = \{z: 0 < r < \infty, 0 < \varphi < \alpha < 2\pi\}$ — угол α , $D_w = D_w^+ : w = \lambda^2 z^{\frac{\pi}{\alpha}} + \lambda_1$.

3. $D_z = \{z: 0 < r < \infty, 0 < \varphi < \alpha < 2\pi\}$, $D_w = D_w^+$, $L_z = \{z: 0 < r < r_0, \varphi = 0\} \rightarrow L_w = \{0 < u < \infty, v = 0\} : w = \lambda^2 \frac{z^{\frac{\pi}{\alpha}}}{r_0^{\frac{\pi}{\alpha}} - z^{\frac{\pi}{\alpha}}}$.

4. $D_z = \Pi_z(0, H)$, $D_w = D_w^+$, $L_z = \{z: -\infty < x < \infty, y = 0\} \rightarrow L_w = \{w: 0 < u < \infty, v = 0\} : w = e^{\frac{\pi z}{H}}$.

5. $D_z = \{z: 0 < r < \infty, 0 < \varphi < \alpha < 2\pi\}$, $D_w = \Pi_w(0, H)$, $L_z = \{z: 0 < r < \infty, \varphi = 0\} \rightarrow L_w = \{w: -\infty < u < \infty, v = 0\} : w = \frac{H}{\alpha} \ln z + \lambda$.

6. $D_z = D_z^+$, $D_w = B_w(1)$, $z_0 \in D_z \rightarrow w = 0 : w = e^{i\alpha} \frac{z - z_0}{z - \bar{z}_0}$.

7. $D_z = B_z(r_0)$, $D_w = B_w(1)$, $z_0 \in D_z \rightarrow w = 0 : w = r_0 e^{i\alpha} \frac{z - z_0}{z_0 z - r_0^2}$.

8. $D_z = \{z: 0 < r < r_0, 0 < \varphi < \pi\}$ полукруг, $D_w = D_w^+$, $L_z = \{z: -r_0 < x < r_0, y = 0\} \rightarrow L_w = \{w: 0 < u < \infty, v = 0\} : w = \lambda^2 \left(\frac{z + r_0}{z - r_0} \right)^2$.

9. $D_z = D_z^+ \setminus \{z: x = 0, 0 \leq y \leq h\}$ — верхняя полуплоскость с разрезом по отрезку, $D_w = D_w^+$, $z_0 = \infty \longrightarrow w_0 = \infty: w = \sqrt{z^2 + h^2} + \lambda$, $\sqrt{1} = 1$.

10. $D_z = \Pi_z / \{z: -\infty < x < \infty, y = \frac{H}{2}\}$ — полоса с разрезом по лучу, $D_w = \Pi_w(0, 1)$, $L_z = \{z: -\infty < x < 0, y = \frac{H}{2}\} \longrightarrow \{w: -\infty < u < \infty, v = 0\}: w = \frac{2}{\pi} \operatorname{arth} \sqrt{e^{\frac{2\pi z}{H}} + 1} + \lambda$.

11. $D_z = \Pi_z(0, H) / \{z: x = 0, 0 \leq y \leq h < H\}$ — полоса с разрезом по отрезку, $D_w = \Pi_w(0, 1)$, $z_0 = \pm\infty \longrightarrow w_0 = \pm\infty$ ($z = \infty$ — двойная точка (см. [44])); $w = \frac{2}{\pi} \operatorname{arth} \left(\cos \frac{\pi h}{2H} \sqrt{\operatorname{th}^2 \frac{\pi z}{2H} + \operatorname{tg}^2 \frac{\pi h}{2H}} \right) + \lambda$, $\sqrt{1} = 1$.

12. $D_z = D_z^+ / \overline{B}_z(r_0)$ — полуплоскость без полукруга, $D_w = \Pi_w(0, H)$, $L_z = \{z: r = r_0, 0 < \varphi < \pi\} \longrightarrow L_w = \{w: -\infty < u < \infty, v = 0\}$ $w = iH - \frac{2H}{\pi} \ln \frac{z - r_0}{z + r_0} + \lambda$.

13. D_z — плоскость без круга $\overline{B}_z(r_0)$ и отрезка $\{z: r_0 \leq x \leq h, y = 0\}$, $D_w = B_w(1): w = \zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}$, $\zeta = \frac{2h(z + r_0)^2}{z(h + r_0)^2}$, $\sqrt{1} = 1$.

14. Даны два круга $B_{1z}(r_1)$, $B_{2z}(d, r_2)$: 1) $r_2 - r_2 > d$, D_z — область, ограниченная окружностями $\partial B_{1z}(r_1)$, и $\partial B_{2z}(d, r_2)$ — (эксцентрическое кольцо); 2) $r_1 + r_2 < d$, D_z — внешность данных кругов. В обоих случаях D_w — концентрическое кольцо с центром $w = 0$: $w = B \frac{z - x_1}{z - x_2}$, где

$x_{1,2} = -\frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{d} \mp \sqrt{\left(\frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{d}\right)^2 - 4r_2^2}$ — точки, симметричные относительно обеих окружностей.

15. $D_z = D_z^+ \setminus \overline{B}_z(ih, r_0)$, полуплоскость без полукруга, D_w — концентрическое кольцо с центром $w = 0$: $w = B \frac{z - i\sqrt{h^2 - r_0^2}}{z + i\sqrt{h^2 - r_0^2}}$.

16. Дуги L_{1z} и L_{2z} двух окружностей пересекаются в точках $x_{1,2} = \pm a$ и пересекают мнимую ось в точках ih_1 (дуга L_{1z}) и ih_2 (дуга L_{2z}), где $0 < h_1 < h_2$, $D_w = \Pi(0, H)$, $L_{1z} \longrightarrow \{w: -\infty < u < \infty, v = 0\}: w = \frac{h}{\alpha_2 - \alpha_1} \left(\ln \frac{a + z}{a - z} - i\alpha_1 \right) + \lambda$, $\alpha_{1,2} = 2 \operatorname{arctg} \frac{h_{1,2}}{a}$.

17. D_z — плоскость с разрезами по лучам $L_{1z} = \{z: -\infty < x < -a, y = 0\}$, $L_{2z} = \{z: a < x < \infty, y = 0\}$, $D_w = \Pi(0, H)$, $l_{1z} \longrightarrow \{w: -\infty < u < \infty, v = 0\}: w = \frac{H}{\pi} \operatorname{arch} \frac{x}{a} + iH + \lambda$.

18. D_z — внешность отрезка $\{z: -a \leq x \leq a, y = 0\}$, $D_w = \overline{B}_w(1)$, $z_0 = \infty \longrightarrow w_0 = \infty: w = e^{i\alpha} \frac{z + \sqrt{z^2 - a^2}}{a}$.

19. D_z — плоскость с разрезами по отрезкам $\{z: -a \leq x \leq a, y = 0\}$, $\{z: x = 0, -a \leq y \leq a\}$ (внешность креста), D_w — внешность круга $\overline{B}_w(1)$, $z_0 = \infty \longrightarrow w_0 = \infty: w = \frac{e^{i\alpha}}{a\sqrt{2}} (\sqrt{z^2 + a^2} + \sqrt{z^2 + a^2})$.

20. D_z — внешность параболы $y^2 = 2p \left(1 + \frac{p}{2} \right)$ ($z = 0 \notin D_z$), $D_w = D_w^+$: $w = \sqrt{z} - i\sqrt{\frac{p}{2}}$, $\sqrt{1} = 1$.

21. D_z — область, ограниченная параболой $y^2 = 2p\left(1 + \frac{p}{2}\right)$ ($z = 0 \in D_z$),
 $D_w = D_w^+$: $w = i\sqrt{2} \operatorname{ch} \pi \sqrt{\frac{z}{2p}}$, $\sqrt{1} = 1$.

22. D_z — область, ограниченная ветвями гиперболы $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$ ($z = 0 \in D_z$), $D_w = D_w^+$: $w = \left(\frac{z + \sqrt{z^2 - c^2}}{ce^{i\theta}}\right)^{\frac{\pi}{\pi - 2\theta}}$, $\theta = \arcsin \frac{a}{c}$, $c = \sqrt{a^2 + b^2}$.

23. D_z — область, ограниченная правой ветвью гиперболы $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$ ($z = 0 \notin D_z$), $D_w = D_w^+$: $w = i\sqrt{2} \operatorname{ch} \left(\frac{\pi}{2\theta} \operatorname{arch} \frac{z}{c}\right)$, $\theta = \arcsin \frac{a}{c}$, $c = \sqrt{a^2 + b^2}$.

24. D_z — внешность эллипса $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, D_w — внешность круга $\overline{B}_w(1)$, $z_0 = \infty \longrightarrow w_0 = \infty$: $w = e^{i\alpha} \frac{z + \sqrt{z^2 - c^2}}{a + b}$, $c = \sqrt{a^2 - b^2}$.

Литература

1. Абловиц М., Сигур Х. Солитоны и метод обратной задачи. — М.: Мир, 1987.
2. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. — М.: Мир, 1984.
3. Арсенин В.Я. Методы математической физики и специальные функции. — М.: Наука, 1986.
4. Артышев С.Г., Горюнов А.Ф. Методы решения нелинейных задач математической физики. Учебное пособие. — М.: МИФИ, 1992.
5. Баренблатт Г.И. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. — М.: Недра, 1972.
6. Бескин В.С. Осесимметричные стационарные течения в астрофизике. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
7. Бейтмен Г., Зрдейи А. Высшие трансцендентные функции, т. 1, 2. — М.: Наука, 1973, 1974.
8. Бейтмен Г., Зрдейи А. Таблицы интегральных преобразований, т. 1, 2. — М.: Наука, 1969, 1970.
9. Бицадзе А.В., Калинин Д.Ф. Сборник задач по уравнениям математической физики. — М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ, 1999.
10. Брычков Ю.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования обобщенных функций — М.: Наука, 1977.
11. Будаков Б.Н., Самарский А.А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физике. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
12. Васильева А.Б., Тихонов А.Н. Интегральные уравнения. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
13. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков Ф.П. Теория волн. — М.: Наука, 1990.
14. Владимиров В.С. Обобщенные функции и их приложение. — М.: Знание, Математика, кибернетика. № 1, 1990.
15. Владимиров В.С., Жаринов В.В. Уравнения математической физики. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
16. Волковиский Л.И., Луниц Г.Л., Араманович И.Г. Сборник задач по теории функций комплексного переменного — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
17. Габов С.А. Введение в теорию нелинейных волн. — М.: Издательство МГУ, 1988.
18. Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
19. Галицкий И.М., Карнаков Б.М., Коган В.И. Задачи по квантовой механике. — М.: Наука, 1992.
20. Галицын А.С., Жуковский А.Н. Интегральные преобразования и специальные функции в задачах теплопроводности. — М., Едиториал УРСС, 2001.

21. Годунов С. К. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1974.
22. Гюнтер И. М., Кузьмин Р. С. Сборник задач по высшей математике, т. 2. — М.: Физматгиз, 1959.
23. Дмитриев В. И., Захаров Е. В. Интегральные уравнения в краевых задачах электродинамики. — М.: Издательство МГУ, 1987.
24. Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. — М.: Мир, 1988.
25. Евграфов М. А. Сборник задач по теории аналитических функций. — М.: Наука, 1972.
26. Зайцев В. Ф., Полянин А. Д. Справочник по дифференциальным уравнениям с частными производными. Точные решения. — М.: Международная программа образования, 1996.
27. Зайцев В. Ф., Полянин А. Д. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
28. Захаров В. Е., Манахов С. В., Питаевский Л. П. Теория солитонов: метод обратной задачи. — М.: Наука, 1980.
29. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Теория тяготения и эволюция звезд. — М.: Наука, 1971.
30. Инфельд Э. Нелинейные волны, солитоны и хаос. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
31. Карташев А. П., Рождественский Б. Л. Обыкновенные дифференциальные уравнения и основы вариационного исчисления. — М.: Наука, 1980.
32. Кириллов А. А., Гвишиани А. Д. Теоремы и задачи функционального анализа. — М.: Наука, 1979.
33. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. — М.: Наука, 1989.
34. Котляр Я. М. Методы математической физики и задачи гидродинамики. — М.: Высшая школа, 1991.
35. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидродинамика. — М.: Гостехиздат, 1947.
36. Кочина-Полубаринова П. Я. Гидродинамика и теория фильтрации. — М.: Наука, 1991.
37. Кошляков Н. С., Глинер Э. Б., Смирнов М. М. Уравнения в частных производных математической физики. — М.: Высшая школа, 1970.
38. Краснов М. Л., Кисилев А. Н., Макаренко Г. И. Интегральные уравнения. — М.: УРСС, 2003.
39. Кудрявцев Л. Д. Курс математического анализа т. 1, 2. — М.: Дрофа, 2006.
40. Кудряшов Н. А. Автомодельные задачи движения газа в пористой среде. — М.: МИФИ, 1984.
41. Кудряшов Н. А. Аналитические методы в теории нелинейных уравнений в частных производных. — М.: МИФИ, 1993.
42. Кудряшов Н. А. Аналитическая теория нелинейных дифференциальных уравнений. — М.: МИФИ, 2008.
43. Курант Р., Гильберт Д. Методы математической физики, т. 1, 2. — М.: Гостехиздат, 1961.
44. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. — М.: Дань, 2002.

45. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. т. VI. — М.: Физматгиз, 2003.
46. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. т. III. — М.: Физматгиз, 2001.
47. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. т. VI. — М.: Наука, 2001.
48. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. т. 7. Теория упругости. — М.: Наука, 1987.
49. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. т. 8. Электродинамика сплошных сред. — М.: Наука, 2001.
50. Ламб Г. Гидродинамика. — М.: Гостехиздат, 1947.
51. Лебедев Н. Н., Скальская И. П., Уфлянд Я. С. Сборник задач по математической физике. — М.: Гостехиздат, 1955.
52. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М-Л.: ОГИЗ, 1947.
53. Лизоркин П. И. Курс дифференциальных и интегральных уравнений с дополнительными главами анализа. — М.: Наука, 1981.
54. Локшин А. А., Сагомонян Е. А. Нелинейные волны в механике твердого тела. — МГУ, 1989.
55. Лэм Дж. Л. Введение в теорию солитонов. — М.: Меркурий-Пресс, 1983.
56. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967.
57. Марчук Г. М., Лебедев В. М. Численные методы в теории переноса нейтронов. — М.: Атомиздат, 1981.
58. Мегреблиан Р., Холмс Д. Теория реакторов. — М.: Гостехиздат, 1962.
59. Михлин С. Г. Курс математической физики. — М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ, 1968.
60. Муратов Р. З. Потенциалы эллипсоида. — М.: Атомиздат, 1976.
61. Натансон И. П. Теория функций вещественной переменной. СПб.: Лань, 1999.
62. Найфэ А. Введение в методы возмущений. — М.: Мир, 1984.
63. Никифоров А. Ф., Уваров В. Б. Специальные функции математической физики. — Долгопрудный: Интеллект, 2007.
64. Ньюэлл А. Солитоны в математике и физике. — М.: Мир, 1989.
65. Петровский И. Г. Лекции об уравнениях с частными производными. — М.: МГУ, 1984.
66. Петровский И. Г. Лекции по теории интегральных уравнений. — М.: Наука, 1961.
67. Полянин А. Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
68. Полянин А. Д., Вязьмин А. В., Журов А. И., Казенин Д. А. Справочник по точным решениям уравнений по тепло- и масспереносу. — М.: Факториал, 1998.
69. Полянин А. Д., Зайцев В. Ф. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
70. Полянин А. Д., Зайцев В. Ф., Журов А. И. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
71. Полянин А. Д., Манжиров А. Ф. Справочник по интегральным уравнениям. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

72. *Работнов Ю.Н.* Элементы наследственной механики твердых тел. — М.: Наука, 1977.
73. *Рождественский Б.Л., Яненко И.Н.* Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. — М.: Наука, 1978.
74. Сборник задач по уравнениям математической физики. Под ред. В.С. Владимирова — 4-е изд., стереотип. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
75. *Свешников А.Г., Тихонов А.Н.* Теория функций комплексной переменной. — М.: Наука, 1999.
76. *Седов Л.И.* Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. — М.: Наука, 1966.
77. *Сидоров Ю.В., Федорюк М.В., Шабунин М.В.* Теория функций комплексного переменного. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2002.
78. *Смелов В.В.* Лекции по теории переноса нейтронов. — М.: Атомиздат, 1978.
79. *Смирнов В.И.* Курс высшей математики, т. 2, 4. — М.: Физматгиз, 1967, 1958.
80. *Смирнов М.М.* Задачи по уравнениям математической физики. — М.: Наука, 1975.
81. *Соболев В.В.* Точечный источник света между параллельными плоскостями // ДАН СССР, т. 42, № 4, 1944.
82. *Соболев С.Л.* Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1992.
83. *Соболев С.Л.* Применения функционального анализа в математической физике. — М.: Наука, 1988.
84. Солитоны. Под редакцией Р. Буллаф, Ф. Кодри — М.: Мир, 1983.
85. *Стернин Л.Е.* Основы газовой динамики. — М.: МАИ, 1995.
86. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. — М.: Наука, 1989.
87. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. — М.: МГУ, Наука, 2004.
88. *Трикоми Ф.Д.* Интегральные уравнения. — М.: ИЛ, 1960.
89. *Уизем Дж.* Линейные и нелинейные волны. — М.: Мир, 1977.
90. *Фарлоу С.* Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров. — М.: Мир, 1985.
91. *Флюгге З.* Задачи по квантовой механике. т. 2. — Череповец.: Меркурий-Пресс, 2000.
92. *Эльсгольц Л.Э.* Обыкновенные дифференциальные уравнения. — СПб.: Лань, 2002.
93. *Шапиро А., Тьюколски С.* Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды. т. 1, 2. — М.: Мир, 1985.
94. *Шелковников Ф.А., Такайшвили К.Г.* Сборник упражнений по операционному исчислению. Изд. 4-ое, стереотип. — М.: 2006.
95. *Шилов Г.Е.* Математический анализ. Второй специальный курс. — М.: Наука, 1965.

Учебное издание

ГОРЮНОВ Анатолий Федорович

**МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ**

Том II

Редактор *Е.И. Ворошилова*
Оригинал-макет: *Д.П. Вакуленко*
Оформление переплета: *А.В. Андросов*

Подписано в печать 27.07.2015. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 48,25.
Уч.-изд. л. 53,1. Тираж 400 экз. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117342, Москва, ул. Бултерова, 17 Б
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;
<http://www.fml.ru>

Отпечатано с электронных носителей издательства
в АО «ИПК «Чувашия»,
428019, г. Чебоксары, пр-т И. Яковлева, 13

ISBN 978-5-9221-1650-3



9 785922 116503