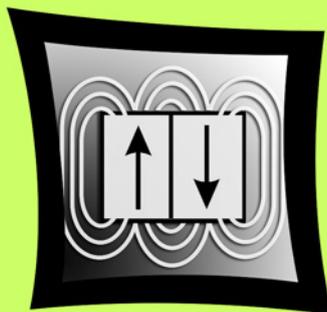


А. В. Бармасов, В. Е. Холмогоров

Курс общей физики для природопользователей Электричество



bhv®



**Бармасов А. В.
Холмогоров В. Е.**

Курс общей физики для природопользователей Электричество

под ред. А. П. Бобровского

Допущено Научно-методическим советом по физике
Министерства образования и науки Российской Федерации
в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся
по естественно-научным и техническим направлениям и специальностям

Санкт-Петербург
«БХВ-Петербург»

2010

УДК 530.1(075.8)

ББК 22.3я73

Б24

Бармасов, А. В.

Б24 Курс общей физики для природопользователей.

Электричество / А. В. Бармасов, В. Е. Холмогоров / Под ред.

А. П. Бобровского. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 448 с.: ил. —

(Учебная литература для вузов)

ISBN 978-5-9775-0420-1

Книга является четвертой из серии книг полного курса общей физики для природопользователей и представляет собой расширенный адаптированный лекционный курс. Важной особенностью книги является сочетание фундаментальности и профилизации в рамках ограниченного числа лекционных часов. Профилизация курса заключается в выборе приоритетов и в иллюстрациях применения физики в геологии, биологии, почвоведении и экологии, что создает основу для изучения спецкурсов.

Изложены основные разделы курса: электростатика, электрическое поле, диэлектрики, проводники, электрическая емкость, электрический ток в металлах, электролитах, вакууме и газах, биоэлектричество, электрические свойства горных пород, принципы электроразведки.

Структура изложения удобна для подготовки к тестированию остаточных знаний в вузах. Приводятся вопросы для самопроверки.

*Для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по естественно-научным и техническим направлениям*

УДК 530.1(075.8)

ББК 22.3я73

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Татьяна Лапина</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Алексей Семенов</i>
Компьютерная верстка	<i>Натальи Смирновой</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Дизайн серии	<i>Инны Тачиной</i>
Оформление обложки	<i>Елены Беляевой</i>
Фото	<i>Кирилла Сергеева</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 30.12.09.

Формат 70×100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 36,12.

Тираж 1500 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию № 77.99.60.953.Д.005770.05.09 от 26.05.2009 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ГУП "Типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

ISBN 978-5-9775-0420-1

© Бармасов А. В., Холмогоров В. Е., 2010

© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2010

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	1
ПРИНЯТЫЕ ТЕРМИНЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ	7
ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА.....	17
1.1. Электрические взаимодействия. Исторический очерк	17
1.2. Электрические заряды, электростатика.....	28
1.3. Закон сохранения зарядов.....	31
1.4. Взаимодействие электрических зарядов; закон Кулона	33
1.5. Единицы измерения заряда.....	39
ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. НАПРЯЖЁННОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ	47
2.1. Электрическое поле	47
2.2. Вектор напряжённости электрического поля	48
2.3. Линии напряжённости электростатического поля и их свойства	50
2.4. Принцип суперпозиции электростатических полей; электрический диполь	53
ГЛАВА 3. ТЕОРЕМА ГАУССА	65
3.1. Вектор электрической индукции (электрическое смещение)	65
3.2. Поток вектора индукции	68
3.3. Теорема Гаусса.....	71
3.4. Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости. Скачок нормальной составляющей вектора E на заряженной поверхности	76

3.5. Поле между двумя параллельными бесконечными равномерно заряженными плоскостями	79
3.6. Поле шарового конденсатора	81
3.7. Поле равномерно заряженной сферы	82
3.8. Поле равномерно заряженного цилиндра	83
3.9. Поле шарового слоя.....	84
3.10. Дифференциальная форма записи уравнений электростатики, уравнение Пуассона.....	85

ГЛАВА 4. ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ91

4.1. Потенциал электростатического поля; работа сил электростатического поля при перемещении заряда	91
4.2. Разность потенциалов, абсолютный электромметр	97
4.3. Связь потенциала с напряжённостью электростатического поля.....	102
4.4. Потенциалы электростатических полей, создаваемых простейшими заряженными телами.....	106
4.4.1. Шаровой конденсатор	107
4.4.2. Плоский конденсатор	107
4.4.3. Цилиндрический конденсатор.....	108

ГЛАВА 5. ДИЭЛЕКТРИКИ109

5.1. Дипольный момент молекулы	109
5.2. неполярные и полярные молекулы.....	110
5.3. Поляризация диэлектриков.....	112
5.4. Диэлектрические восприимчивость и проницаемость вещества	115
5.5. Поляризация полярных диэлектриков во внешнем электростатическом поле	118
5.6. Электростатическое поле на границе двух диэлектриков	123
5.7. Кристаллические диэлектрики. Изотропный и анизотропный кристаллические диэлектрики.....	125
5.8. Сегнетоэлектрики	126
5.9. Пьезоэлектрики	139
5.9.1. Пьезоэлектрические текстуры	144
5.9.2. Электрострикция.....	145
5.10. Пирозэлектрики.....	146
5.11. Электреты, термоэлектреты, фотоэлектреты	148

ГЛАВА 6. ПРОВОДНИКИ.**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЁМКОСТЬ.....151**

6.1. Проводники	151
6.2. Модель металла Друде—Лоренца	153
6.3. Электроёмкость проводника.....	157
6.4. Конденсаторы.....	167
6.5. Ёмкость простых конденсаторов и двухпроводной линии.....	170
6.5.1. Плоский конденсатор	170
6.5.2. Шаровой конденсатор	171
6.5.3. Цилиндрический конденсатор	172
6.5.4. Двухпроводная линия	173
6.6. Размерность абсолютной диэлектрической проницаемости в СИ	173
6.7. Энергия заряженного конденсатора	174
6.8. Соединения конденсаторов	176
6.9. Энергия электрического поля системы разделённых неподвижных зарядов	177
6.10. Энергия поляризованного диэлектрика.....	181

ГЛАВА 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ.....183

7.1. Электрический ток.....	183
7.2. Опытная проверка электронного характера проводимости металлов.....	188
7.3. Сила и плотность тока.....	190
7.4. Закон Ома	194
7.4.1. Измерение сопротивлений мостовым методом	199
7.5. Удельное электрическое сопротивление и проводимость.....	201
7.6. Опыт Стюарта—Толмена.....	206
7.7. Закон Ома в дифференциальной форме	209
7.8. Закон Джоуля—Ленца.....	210
7.9. Вывод законов Ома и Джоуля по классической теории электропроводности металлов.....	218
7.10. Закон Видемана—Франца.....	221
7.11. Электродвижущая сила	222
7.12. Сторонние источники ЭДС и внутреннее сопротивление источника ЭДС. Закон Ома для замкнутой цепи.....	224
7.13. Мощность во внешней цепи. КПД источника ЭДС	226
7.14. Правила Кирхгофа для разветвлённых электрических цепей	227
7.15. Компенсационный метод измерения ЭДС	229

ГЛАВА 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ, В ВАКУУМЕ И В ГАЗАХ.....	233
8.1. Электрический ток в электролитах	233
8.2. Электролиз.....	240
8.3. Законы Фарадея	242
8.4. Источники тока	245
8.5. Эмиссия электронов	255
8.6. Электрический ток в вакууме; закон Богуславского—Ленгмюра (закон трёх вторых)	259
8.7. Электровакуумные приборы.....	260
8.8. Электровакуумный диод	261
8.9. Многоэлектродные лампы	263
8.10. Вольт-амперные характеристики электровакуумных ламп.....	267
8.11. Электрический ток в газах: самостоятельный, несамостоятельный и искровой разряды	275
8.11.1. Ударная ионизация	277
8.11.2. Тлеющий разряд.....	282
8.11.3. Дуговой разряд.....	286
8.11.4. Высокочастотный безэлектродный разряд.....	288
8.11.5. Нестационарные (импульсные) разряды	288
8.11.6. Коронный разряд	288
8.11.7. Искровой разряд.....	289
8.11.8. Несамостоятельная электропроводность газов.....	291
8.12. Электрические токи в атмосфере Земли.....	296
8.13. Газоразрядные источники света.....	300

ГЛАВА 9. БИОЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД.

ПРИНЦИПЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ.....	307
--------------------------------------	------------

9.1. Биоэлектричество	307
9.2. Электрические свойства горных пород	318
9.3. Диэлектрическая проницаемость горных пород	327
9.4. Поляризуемость пород	330
9.5. Принципы электроразведки.....	332
9.6. Классификация методов структурной электроразведки	336
9.7. Электрическое профилирование. Вертикальное электрическое зондирование.....	337
9.8. Электрический каротаж	339
9.9. Метод заряда	341

ПРИЛОЖЕНИЯ.....	345
Приложение 1. Справочные данные.....	347
Приложение 2. Словарь терминов, используемых в электричестве и электротехнике.....	350
Приложение 3. Краткая хронология истории электричества и электротехники.....	373
Приложение 4. Краткие биографические справки	388
Список литературы	409
Дополнительная литература	414
Предметный указатель.....	426

Предисловие

Важнейшая задача цивилизации — научить человека мыслить.

*Т. Эдисон*¹

Доводы, до которых человек додумывается сам, обычно убеждают его больше, нежели те, которые пришли в голову другим.

*Б. Паскаль*²

Трудных наук нет, есть только трудные изложения.

*А. И. Герцен*³

Книга — книгой,
А мозгами двигай.

*В. В. Маяковский*⁴

Четвёртая книга полного курса общей физики для природопользователей написана на основе лекций, читаемых авторами на протяжении многих лет в Санкт-Петербургском государственном университете и Российском государственном гидрометеорологическом университете. В книге учтены замечания и пожелания студентов биолого-почвенного факультета, геологического факультета, медицинского факультета и факультета географии и геоэкологии СПбГУ, факультета экологии и физики природной среды РГГМУ.

Книга представляет собой интегрированное учебное пособие для студентов и бакалаврантов всех форм обучения нефизических направлений и специ-

¹ Томас Альва Эдисон (Edison, 1847—1931 гг.) — крупнейший американский изобретатель.

² Блез Паскаль (Pascal, 1623—1662 гг.) — французский физик.

³ Александр Иванович Герцен (1812—1870 гг.) — русский революционер, писатель, философ.

⁴ Владимир Владимирович Маяковский (1893—1930 гг.) — русский поэт.

альностей вузов: "Биология", "Геология", "Гидрометеорология", "Почвоведение", "Природопользование", "Экология и природопользование", "Геология и геохимия горючих полезных ископаемых", "Геофизика", "Геохимия", "Геоэкология", "Гидрогеология, грунтоведение и инженерная геология", "Гидрология", "Метеорология", "Океанология", "Прикладная геохимия, минералогия, петрология", "Экологическая геология", "Экология" и близким к ним. Стоит напомнить, что направление "Рациональное природопользование" 21 мая 2006 г. утверждено Президентом РФ в качестве одного из восьми приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации.

Учебных пособий по общей физике такой профессиональной направленности и такого объёма в российской библиографии раньше не было. Авторы ставили своей целью сделать физику доступной всем, стремясь изложить полный курс общей физики максимально ясным и доступным языком. В предисловии к своему бестселлеру "Краткая история времени" один из наиболее влиятельных и известных физиков-теоретиков современности Стивен Уильям Хокинг (Hawking, род. в 1942 г.) написал: *"Мне сказали, что каждая включённая в книгу формула вдвое уменьшит число покупателей. Тогда я решил вообще обходиться без формул. Правда, в конце я всё-таки написал одно уравнение — знаменитое уравнение Эйнштейна $E = mc^2$ ".* Авторы данного пособия считают, что курс общей физики не может не использовать адекватный математический аппарат. При этом авторы стремились изложить общую физику не как набор формул, а как логичную науку, знание которой требует не столько памяти, сколько рассуждений. Отличительной особенностью изложения материала является постоянное сопоставление близких по внешним проявлениям физических явлений из разных разделов курса. Некоторые наиболее важные положения рассматриваются с разных точек зрения и приводятся в разных разделах курса. Такой подход упрощает понимание и запоминание материала.

Данное учебное пособие написано с учётом высказанных ещё в 1945 г. выдающимся российским физиком Яковом Ильичом Френкелем (1894—1952 гг.) идей о преподавании физики в вузах, основанных на его собственном гигантском опыте учёного, профессора высшей школы и автора фундаментальных учебных пособий¹. Распространённый взгляд о том, *"что студент может овладеть преподаваемой дисциплиной, не заглядывая ни в одну книгу, является совершенно неприемлемым,* — писал Френкель. — *Это при-*

¹ Френкель Я. И. Система преподавания в вузах требует пересмотра // Вестник высшей школы. — 1945. — № 4. — С. 35.

вело бы к ничем не оправданной затрате преподавателем времени — при наличии хорошего печатного курса, апробированного или составленного им (преподаватель чаще всего излагает своим слушателям один и тот же материал из года в год, а иногда и по нескольку раз в один и тот же год — для разных потоков). Это также вызвало бы нерациональную затрату времени студентами, вынужденными в течение многих месяцев посещать лекции даже в том случае, если они имеют возможность ознакомиться с излагаемым материалом по книге в несравненно более короткое время... Роль профессоров и преподавателей заключается в первую очередь в организации консультаций (групповых и индивидуальных), на которых дискуссия по трудным вопросам курса, возникающая в процессе консультации, может перерасти и в лекцию". В 1960-е гг. американский физик-теоретик Ричард Фейнман (Feynman, 1918—1988 гг.) писал: "Студент должен иметь возможность обсуждать различные идеи, размышлять и высказывать свои мысли. Невозможно многому научиться, просто сидя на лекции, или даже просто решая предложенные задачи"¹. Задолго до этого российский физик Николай Алексеевич Умов (1846—1915 гг.) отмечал: "Всякое знание остаётся мёртвым, если в учащихся не развивается инициатива и самостоятельность". Авторы этого учебного пособия считают данный подход заслуживающим внимания, и при написании курса общей физики стремились создать его именно для такого подхода к преподаванию физики. Впрочем, английский историк Эдуард Гиббон (Gibbon, 1737—1794 гг.) писал: "...обучение редко приносит плоды кому-либо, кроме тех, кто предрасположен к нему, но им оно почти не нужно"...

Особенностью пособия является наличие списка принятых в данном издании терминов и обозначений, а в приложениях — справочных данных и словаря терминов (на русском и английском языках), используемых в данном разделе физики. В словаре приводятся краткие толкования основных понятий, терминов, формулировки законов и т. п., по возможности без использования математических формул. Приводимые толкования, как правило, не повторяют дословно, а скорее дополняют приводимые в тексте учебника определения. Статьи словаря представлены в алфавитном порядке.

С целью приближения "теоретической" науки к повседневной жизни в курсе даны примеры, которые могут вызвать особый интерес молодого читателя. В книге широко используется образная наглядность. Важной особенностью курса является сочетание фундаментальности и профулизации, проявившей-

¹ Фейнман Р. Дюжина лекций: шесть попроще и шесть посложнее / Пер. с англ. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. — 318 с. — С. 30—31.

ся в выборе приоритетов и в примерах применения физики в геологии, биологии, почвоведении, метеорологии, экологии и т. п. Степень освещения практических вопросов, их актуальность являются главной отличительной чертой данного учебного пособия. Именно это позволяет рекомендовать книгу самой широкой аудитории. Пособие может быть использовано студентами и преподавателями вузов и техникумов, полезно учащимся лицеев и колледжей, а также абитуриентам, готовящимся к поступлению в вузы. Структура изложения удобна для подготовки к тестированию остаточных знаний в вузах. Приводятся вопросы для самопроверки. Относительная простота и иллюстративность изложения материала, дополненные примерами из различных областей естествознания, доступными цитатами из оригинальных работ учёных и историческими ссылками, а также "выход за рамки" общей физики делают данное пособие полезным также для изучения курса "Концепции современного естествознания" студентами гуманитарных специальностей.

Другой особенностью пособия является то, что большое количество справочного материала позволяет использовать его в качестве справочника при изучении теоретического материала, выполнении лабораторных работ и решении задач. В пособии также приводятся ссылки на сайты сети Интернет, на которых читатель сможет найти дополнительную и более детальную справочную информацию.

Помимо общего списка использованной литературы в конце книги приводится литература, рекомендуемая для углублённого изучения данной темы или для написания рефератов (с учётом разных уровней подготовленности читателя — от популярной до специальной).

В разделе "Приложения" приведена краткая хронология истории развития данного раздела физики, а также краткие биографические справки.

Таким образом, авторы, отдавая себе отчёт в том, что *"никто не обнимет необъятного"*¹, пытались найти некую "золотую середину", совмещая в учебном пособии и учебник, и справочник. Делалось это осознанно, поскольку авторы понимают, что студенты нефизических специальностей хотели бы иметь одно универсальное учебное пособие по физике, пригодное как для освоения теоретического курса, так и для решения задач и выполнения лабораторных работ. Первые отклики на данный курс показали, что большинство читателей поняли и положительно оценили такое стремление авторов. Тем не менее, кому-то это пособие покажется слишком простым, а кому-то чрезмерно сложным. Некоторые посчитают его слишком объёмным, а некоторые —

¹ Козьма Прутков. Мысли и афоризмы. — 1854 г.

недостаточно подробным. Это только подтверждает тот факт, что создать действительно универсальное учебное пособие, отвечающее любым требованиям, невозможно. Авторы надеются, что в данном учебном пособии каждый студент, обучающийся по естественно-научным и техническим направлениям и специальностям, сможет найти именно то, что в данный момент ему необходимо. А авторы пытались максимально ему в этом помочь.

Данный курс соответствует требованиям, предъявляемым Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования Российской Федерации второго поколения по дисциплине "Физика" (федеральный компонент) для естественно-научных и технических направлений бакалавриата с общей трудоёмкостью 400—800 часов. Структура данного учебного пособия определяется рекомендуемым объёмом лекций по данному предмету на нефизических специальностях вузов. Как следствие — разделение излагаемого материала на главы и возможный краткий повтор некоторых изложенных ранее материалов. Распределение материала по главам выбрано с учётом опыта преподавания этого курса.

Некоторые из тем, иногда включаемых в раздел "Электричество" (сверхпроводимость, полупроводники, зонная теория твёрдого тела, явления на границе двух металлов), в данном курсе представлены в пятом томе "Магнетизм и электромагнитные явления".

В данном издании максимально возможно учтены рекомендации Международной организации по стандартизации, Международной электротехнической комиссии, Международного союза теоретической и прикладной физики, Международного союза теоретической и прикладной химии, Международной комиссии по освещению и XI Генеральной конференции по мерам и весам по вопросам терминологии, системы единиц СИ и обозначений. Кроме того, по возможности учтены рекомендации ГОСТ 9867-61 "Международная система единиц", ГОСТ 8.04-72 "Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений" и ГОСТ 16263-70 "Метрология. Термины и определения". Вместе с тем в отдельных случаях приводятся и устаревшие, но всё ещё широко применяемые на практике единицы, термины и обозначения.

В качестве иллюстраций использованы как оригинальные рисунки и фотографии авторов и издательства "БХВ-Петербург", так и изображения лицензионного типа Royalty Free, предназначенные для свободного использования (за исключением специально отмеченных).

В качестве задачника, в частности, можно рекомендовать:



Антошина Л. Г., Павлов С. В., Скипетрова Л. А. Общая физика: Сборник задач: Учебн. пособие / Под ред. проф. *Б. А. Струкова*. — М.: ИНФРА-М, 2006.

В качестве пособия по физическому практикуму, в частности, можно рекомендовать:

 *Бармасов А. В., Зароченцева Е. П., Коротков В. И. и др.* Описания лабораторных работ Учебной лаборатории физического эксперимента физического факультета СПбГУ. Часть IV: Электричество. Постоянный электрический ток. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007.

В качестве справочника физических величин, в частности, можно рекомендовать:

 *Nordling C., Österman J.* Physics Handbook for Science and Engineering. — 8th ed. — Lund: Studentlitteratur, 2006.

Основной курс общей физики для природопользователей состоит из следующих томов:

- механика¹;
- колебания и волны²;
- молекулярная физика и термодинамика³;
- электричество;
- магнетизм и электромагнитные явления;
- оптика и квантовая физика;
- атомная и ядерная физика.

Авторы признательны Анне Михайловне Бармасовой за целый ряд ценных советов и замечаний.

Авторы приносят искреннюю благодарность рецензентам пособия, а также главному редактору издательства "БХВ-Петербург" Екатерине Владимировне Кондуковой и зам. главного редактора Татьяне Николаевне Лапиной.

Авторы

¹ Бармасов А. В., Холмогоров В. Е. Курс общей физики для природопользователей. Механика / Под ред. А. С. Чирцова. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008.

² Бармасов А. В., Холмогоров В. Е. Курс общей физики для природопользователей. Колебания и волны / Под ред. А. П. Бобровского. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009.

³ Бармасов А. В., Холмогоров В. Е. Курс общей физики для природопользователей. Молекулярная физика и термодинамика / Под ред. А. П. Бобровского. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009.

Принятые термины и обозначения

В данном издании векторные величины обычно обозначаются жирным шрифтом, а скалярные — обычным (например, E — скалярная величина, а \mathbf{E} — векторная величина).

Символ	Термин	Размерность
$ a $	Абсолютное значение (модуль) вектора a	—
$\langle a \rangle$	Среднее значение величины a	—
$[a b]$	Векторное произведение векторов a и b ($a \times b$)	—
$(a b)$	Скалярное произведение векторов a и b ($a \cdot b$)	—
a	Радиус внутренний	м
a	Ускорение	м·с ⁻²
A	Атомная масса (атомный вес)	а.е.м., дальтон, кислородная единица
A	Работа (силы)	Дж
A	Эмиссионная постоянная	А·м ⁻² ·К ⁻²
$A_{\text{внешн}}$	Работа внешних сил	Дж
b	Радиус внешний	м

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
\mathbf{B}	Магнитная индукция	Тл
c	Скорость света	$\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$
C	Ёмкость электрическая, электроёмкость	Ф
C	Произвольная постоянная	–
c_0	Скорость света в вакууме	$\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$
C_0	Ёмкость конденсатора, когда между его обкладками находится вакуум	Ф
d	Расстояние между пластинами плоского конденсатора	м
d_{11}	Пьезоэлектрический модуль	$\text{Кл}\cdot\text{Н}^{-1}$
\mathbf{D}	Вектор электрической индукции, электрическая индукция, вектор электрического смещения, электрическое смещение	$\text{Кл}\cdot\text{м}^{-2}$
D_n	Нормальная составляющая вектора электрической индукции \mathbf{D}	$\text{Кл}\cdot\text{м}^{-2}$
D_τ	Тангенциальная составляющая вектора электрической индукции \mathbf{D}	$\text{Кл}\cdot\text{м}^{-2}$
$D^{(ir)}$	Нерационализованное смещение $4\pi D$	$\text{Фр}\cdot\text{см}^{-2}$
e	Число e — основание натуральных логарифмов ($e \approx 2,71828$)	–
e	Элементарный заряд	Кл
\mathbf{e}	Единичный вектор	–
\bar{e}	Электрон	–
\mathbf{E}	Вектор напряжённости электрического поля	$\text{Н}\cdot\text{Кл}^{-1}, \text{В}\cdot\text{м}^{-1}$
E	Энергия	Дж
E_C	Напряжённость электростатического поля в конденсаторе	$\text{Н}\cdot\text{Кл}^{-1}, \text{В}\cdot\text{м}^{-1}$

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
E_p	Напряжённость поля E вдоль оси диполя	$\text{Н}\cdot\text{Кл}^{-1}, \text{В}\cdot\text{м}^{-1}$
E_{\perp}	Напряжённость поля E в направлении, перпендикулярном к оси диполя	$\text{Н}\cdot\text{Кл}^{-1}, \text{В}\cdot\text{м}^{-1}$
E_{τ}	Тангенциальная составляющая вектора напряжённости электростатического поля	$\text{Н}\cdot\text{Кл}^{-1}, \text{В}\cdot\text{м}^{-1}$
E_c	Напряжённость коэрцитивного поля	$\text{Н}\cdot\text{Кл}^{-1}, \text{В}\cdot\text{м}^{-1}$
E_k	Кинетическая энергия	Дж
$E_{ке}$	Кинетическая энергия электрона	Дж
$E_{п}$	Потенциальная энергия	Дж
$E_{пр}$	Критическая напряжённость поля, напряжённость пробоя, электрическая прочность	$\text{В}\cdot\text{м}^{-1}$
$\exp(x)$	Экспонента e^x	–
f	Полуфокусное расстояние	м
F	Постоянная Фарадея (число Фарадея)	$\text{Кл}\cdot\text{моль}^{-1}$
F	Сила	Н
F_0	Сила взаимодействия между зарядами в отсутствие среды	Н
F_E	Сила электрического поля	Н
$F_{Ст}$	Сила Стокса	Н
G	Активная электрическая проводимость для постоянного тока	$\text{Ом}^{-1}, \text{См}$
G	Гравитационная постоянная, постоянная тяготения Ньютона	$\text{Н}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-2}$
h	Постоянная Планка	Дж·с

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
H	Вектор напряжённости магнитного поля	$A \cdot m^{-1}$
I	Сила тока	A
I_a	Анодный ток	A
j	Плотность электрического тока	$A \cdot m^{-2}$
j_0	Плотность тока насыщения	$A \cdot m^{-2}$
k	Жёсткость пружины	$H \cdot m^{-1}$
k	Коэффициент пропорциональности ($k \equiv \frac{1}{\varepsilon}$)	–
k	Постоянная Больцмана	$Dж \cdot K^{-1}$
k	Системный (переводной) коэффициент	–
K	Коэффициент установки	–
K	Электрохимический эквивалент [вещества]	$г \cdot Кл^{-1}$, $мг \cdot Кл^{-1}$
k_0	Коэффициент рационализации в системе СИ, равный $\frac{1}{4\pi}$	–
K_{Γ}	Баллистическая постоянная гальванометра по заряду, постоянная гальванометра	$Кл \cdot м^{-1}$
l	Ось диполя	м
l	Расстояние, длина, контур	м
l_m	Баллистический отброс	м
L	Индуктивность	Гн
L	Длина	м
m	Масса	кг
M	Минерализация	$г \cdot л^{-1}$

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
M	Момент силы	Н·м
m_e	Масса [покоя] электрона	кг
n	Объёмная плотность (концентрация)	м^{-3} , %
\mathbf{n}	Единичный вектор нормали	–
n_+	Концентрация частиц с положительным зарядом	м^{-3}
n_-	Концентрация частиц с отрицательным зарядом	м^{-3}
N	Количество	–
N_A	Число Авогадро	моль ⁻¹
N_D	Количество силовых линий вектора \mathbf{D}	–
N_E	Количество силовых линий вектора \mathbf{E}	–
N_+	Количество частиц с положительным зарядом	–
N_-	Количество частиц с отрицательным зарядом	–
p	Давление	Па
\mathbf{p}	Импульс	кг·м·с ⁻¹
\mathbf{p}	Электрический дипольный момент	Кл·м, Фр·см
P	Диэлектрическая поляризация (дипольный момент единицы объёма, поляризованность)	Кл·м ⁻²
P	Мощность электрического тока	Вт
\mathbf{P}	Вектор поляризации, поляризованность единицы объёма	Кл·м ⁻²
q	Заряд электрический [точечный]	Кл
Q	Заряд, количество электричества	Кл

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
Q	Теплота, количество теплоты	Дж
q_0	Пробный электрический заряд	Кл
r	Внутреннее сопротивление (источника ЭДС)	Ом
r	Радиус	м
r	Расстояние	м
\mathbf{r}	Радиус-вектор	м
R	Радиус	м
\mathbf{R}	Радиус-вектор	м
R	Электрическое сопротивление	Ом
R_3	Сопротивление заземления	Ом
R_K	Кажущееся сопротивление	Ом
R_H	Сопротивление нагрузки	Ом
S, S_I	Крутизна	$A \cdot B^{-1}$
S	Площадь	m^2
S_n	Площадь проекции на нормаль	m^2
t	Время	с
t	Температура	$^{\circ}C$
T	Период колебаний	с
T	Температура [абсолютная]	К
T_0	Период собственных колебаний	с
T_K	Температура (точка) Кюри для сегнетоэлектриков	К, $^{\circ}C$
T_C	Критическая температура (сверхпроводимости)	К

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
u	Скорость	$\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$
U	Напряжение электрическое, разность потенциалов	В
U	Потенциал гравитационного поля	$\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}$
U_i	Потенциал ионизации	В
U_a	Анодное напряжение	В
U_H	Абсолютный нормальный потенциал	В
U_C	Сеточное напряжение	В
v	Скорость	$\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$
V	Объём	м^3
w	Объёмная энергия, плотность энергии	$\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}$
w	Влажность	%
W	[Собственная] энергия	Дж
w_e	Объёмная плотность электрической энергии	$\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}$
x	Абсолютное удлинение	м
Z	Валентность	–
Z	Зарядовое число атома (иона), число валентных электронов	–
α	Коэффициент объёмной ионизации	–
α	Поляризуемость	Å^3
α	Температурный коэффициент сопротивления	К^{-1}
α	Угол	рад.
β	Коэффициент объёмной ионизации	

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
β	Коэффициент поляризуемости молекул неполярного диэлектрика	$\Phi \cdot \text{м}^2$
β	Коэффициент рекомбинации	
γ	Коэффициент ударной ионизации молекул газа	
Γ	Напряжённость гравитационного поля	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
$\Delta\varphi$	Разность потенциалов	В
ε	Диэлектрическая проницаемость [среды] (относительная диэлектрическая проницаемость)	–
ε_0	[Абсолютная] диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная)	$\Phi \cdot \text{м}^{-1}$
ε_a	Абсолютная диэлектрическая проницаемость [данной среды]	$\Phi \cdot \text{м}^{-1}$
E	Электродвижущая сила (ЭДС)	В
E_t	Электродвижущая сила (ЭДС) при температуре t	В
η	Поляризуемость среды	%
λ	Длина свободного пробега	м
λ, λ_q	Линейная плотность электрического заряда	$\text{Кл} \cdot \text{м}^{-1}$
λ_T	Коэффициент теплопроводности, теплопроводность	$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
λ_p	Коэффициент анизотропии	–
μ, μ_q	Подвижность носителей зарядов	$\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
μ	Магнитная проницаемость [среды] (относительная магнитная проницаемость)	–
μ	Дипольный момент молекулы	$\text{Кл} \cdot \text{м}$, Фр·см

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
μ_0	Магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная)	$\text{Гн}\cdot\text{м}^{-1}$
μ_a	Абсолютная магнитная проницаемость	$\text{Гн}\cdot\text{м}^{-1}$
ν	Частота колебаний	Гц
ρ, ρ_q	Объёмная плотность электрического заряда	$\text{Кл}\cdot\text{м}^{-3}$
ρ	Плотность массовая	$\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$
ρ	Удельное электрическое сопротивление	$\text{Ом}\cdot\text{м}, \text{мкОм}\cdot\text{см}$
ρ_t	Удельное электрическое сопротивление при температуре t	$\text{Ом}\cdot\text{м}, \text{мкОм}\cdot\text{см}$
ρ_{\perp}	Удельное сопротивление поперёк напластования	$\text{Ом}\cdot\text{м}, \text{мкОм}\cdot\text{см}$
ρ_{\parallel}	Удельное сопротивление напластования	$\text{Ом}\cdot\text{м}, \text{мкОм}\cdot\text{см}$
ρ_+	Объёмная плотность положительного заряда	$\text{Кл}\cdot\text{м}^{-3}$
ρ_-	Объёмная плотность отрицательного заряда	$\text{Кл}\cdot\text{м}^{-3}$
π	Число пи ($\pi \approx 3,14159$)	–
σ	Механическое напряжение	$\text{Па}, \text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$
σ, σ_q	Поверхностная плотность электрического заряда	$\text{Кл}\cdot\text{м}^{-2}$
σ, σ_I	Удельная электропроводность (проводимость)	$\text{См}\cdot\text{м}^{-1}, \text{См}\cdot\text{см}^{-1}$
τ	Время релаксации	с
$\langle \tau \rangle$	Средняя продолжительность движения электрона между двумя столкновениями с ионами решётки	с
φ	Потенциал электрический, потенциал электрического поля в точке	В
Φ	Работа выхода	эВ, Дж

(окончание)

Символ	Термин	Размерность
Φ_B	Поток магнитной индукции, магнитный поток	Вб
Φ_D	Поток вектора электрической индукции (поток вектора электрического смещения, поток электрического смещения, поток индукции)	Кл
Φ_E	Поток вектора напряжённости E электростатического поля	В·м
χ	Магнитная восприимчивость	–
χ	Температурный коэффициент электролита	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
χ_e	Диэлектрическая восприимчивость	–
ω	Телесный угол	ср

ГЛАВА 1

Электростатика

Мы вступаем в мир чудес, более удивительных, чем те, о которых рассказывается в арабских сказках, более запутанных, чем Критский лабиринт, — мир громадный и фантастический.

*К. Фламмарион*¹

1.1. Электрические взаимодействия. Исторический очерк

Egipit Coelo fulmen scemprungue tyrannis².

Изучая биографию Франклина, всё больше и больше понимаешь, почему существует всеобщее уважение и преклонение перед этим большим человеком, которого народ Америки дал человечеству.

*П. Л. Капица*³

Ломоносов был учёным в поэзии и искусстве и поэтом-художником в науке.

*С. И. Вавилов*⁴

¹ Камиль Фламмарион (Flammarion, 1842—1925 гг.) — французский астроном.

² Лат.: "Он отнял молнию у небес и власть у тиранов" — надпись, вырезанная на бюсте Франклина работы французского скульптора Жан-Антуана Гудона (Houdon, 1741—1828 гг.).

³ Пётр Леонидович Капица (1894—1984 гг.) — советский физик.

⁴ Сергей Иванович Вавилов (1891—1951 гг.) — советский физик.

Проявления атмосферного электричества (ионизация воздуха, электрическое поле атмосферы, электрические заряды облаков и осадков, электрические токи и разряды в атмосфере и т. д.), как и явление электризации трением, были давно известны человечеству. При этом связь между этими явлениями во все не была очевидна, а попытки объяснить их с точки зрения известных на тот момент физических взаимодействий были неудачными.

Ещё древнегреческий учёный Аристотель (Ἀριστοτέλης, 384—322 гг. до н. э.) заметил стремление молнии двигаться по металлическим предметам: *"Случалось, что медь щита расплавлялась, а дерево, его покрывающее, оставалось невредимым"*. Наставник римского императора Клавдия Цезаря Нерона (Nero, 37—68 гг.) философ Луций А. Сенека (Seneca, ок. 4 г. до н. э.—65 г.) писал: *"Серебро расплавляется, а кошёлёк, в котором оно заключалось, остаётся невредимым"*. Римский чиновник Плиний Старший (Plinius Secundus, 23 или 24—79 гг.) как-то заметил, что *"золото, медь, серебро, заключённые в мешке, могут быть расплавлены молнией, а мешок не сгорит и даже восковая печать не размягчится"*.

Ещё одно природное электрическое явление не оставалось незамеченным — *огни святого Эльма*¹. В разных странах их называли по-разному: "Корпо-Санто" в Португалии, "Кома-Санто" в Великобритании, "огни святого Николая" или "огни святой Клары" в Средиземноморье. Упоминания об этих явлениях можно найти в "Комментариях Кесаря", где Гай Юлий Цезарь (Caesar, 102 или 100—44 гг. до н. э.) писал, что *"в одну из ночей железные острия копий пятого легиона казались огненными"*. А вот что писал сын известного мореплавателя Христофора Колумба (Columbus/Colombo/Colon, 1451—1506 гг.): *"Моряки перестают бояться бури, когда показываются огни святого Эльма. В 1493 году, в октябре месяце... ночью, при сильной грозе и проливном дожде огни святого Эльма показались на мачте в виде семи зажжённых свеч. При виде этого чудесного явления весь экипаж стал молиться и петь благодарственные гимны"*. Спутник другого известного мореплавателя Фернана Магеллана (Magalhães, ок. 1480—1521 гг.) Геррера (Herrera) отмечал: *"Когда, во время бури, на мачте показывались огни святого Эльма, иногда в виде одной свечи, иногда в виде двух, матросы плакали от радости"*.

Начало научному подходу к изучению электричества было положено лейб-медиком английской королевы Елизаветы I (Elizabeth I, 1533—1603 гг.) — Уильямом Гильбертом (Gilbert, 1544—1603 гг.). Итогом его многолетних ис-

¹ Одна из форм *коронного разряда*. Своё название огни святого Эльма получили в Средние века по названию церкви святого Эльма, на башнях которой они часто возникали.

следований стал труд, опубликованный в 1600 г. в Лондоне под названием "О магните, магнитных телах и большом магните — Земле. Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов". Он описал опыты с янтарём, отполированным трением или натиранием о шерстяную ткань, и констатировал, что не только янтарь, но и алмаз, сапфир, опал, аметист, берилл проявляли то же самое свойство — **электризацию**¹, т. е. способность притягивать лёгкие тела: сухую бумагу, опилки, сухие листья и т. п. При этом Гильберт не сумел установить факт отталкивания одинаково наэлектризованных тел.

Гильберт исследовал множество самых различных тел и даже построил для этой цели специальный электрический указатель, который он описывает таким образом: "*Сделай себе из любого металла стрелку длиной в три или четыре дюйма², достаточно подвижную на своей игле, наподобие магнитного указателя*". С помощью этого прототипа современных электроскопов Гильберт установил, что способностью притягивать обладают многие тела, "*не только созданные природой, но и искусственно приготовленные*". Однако он нашёл также, что многие тела "*не притягивают и не возбуждаются никакими натираниями*". К числу их относится ряд драгоценных камней и металлы. Тела, обнаруживающие способность притяжения, Гильберт назвал электрическими, тела, не обладающие такой способностью, — неэлектрическими. Гильберт впервые употребил слова: "электрика", "электрический", "электричество". Так, по Гильберту "*электрические тела — те, которые притягивают таким же образом, как янтарь*". В качестве примера электрических тел Гильберт называл гагат³ (разновидность каменного угля), серу, ирис (кристалл кварца), стекло, винцентину и бристольский алмаз (разновидности кварца), кристалл (кварц), мышьяк (минерал), аммонияк (камедь). Однако, описав множество интересных наблюдений, Гильберт не мог объяснить их.

Гильберт указал, как производится электризация тел трением: "*Их натирают телами, которые не портят их поверхности и наводят блеск, например жёлтым шёлком, грубым немарким сукном и сухой ладонью. Трут также янтарь о янтарь, об алмаз, о стекло и многое другое. Так обрабатываются электрические тела*".

Величайшей заслугой Гильберта было то, что ошибочно (как выяснится позднее) разделив электрические и магнитные явления, он фактически положил основание изучению этих явлений. Впрочем, в 1551 г. (т. е. за пятьдесят лет до Гильберта) итальянский философ, врач и математик Джероламо

¹ От греч. elektron — янтарь.

² 1 дюйм = 25,4 мм.

³ От греч. gagátēs — чёрный янтарь.

(Иеронимус) Кардано (Cardano, 1501—1576 гг.) уже указал на различие электрических и магнитных явлений.

Величайший итальянский учёный Галилео Галилей (Galilei, 1564—1642 гг.) высоко оценил Гильберта как экспериментатора и основателя учения об электричестве и магнетизме: *"Я воздаю величайшую хвалу, — писал Галилей, — и завидую этому автору, так как ему пришло на ум столь поразительное представление о вещи, бывшей в руках у бесконечного числа других людей возвышенного ума, но никем не подмеченной... И я не сомневаюсь, что с течением времени эта новая наука будет совершенствоваться путём новых наблюдений"*.

Следующим заметным этапом стали исследования шестидесятилетнего бургомистра немецкого города Магдебурга Отто фон Гёрике (Guericke, 1602—1686 гг.). Гёрике создал специальную **"электрическую машину"** — большой вращающийся шар, отлитый из серы (рис. 1). Натирая этот вращающийся шар руками или кожаными подушками, ему удалось получить на нём большие заряды. Гёрике провёл ряд экспериментов и первым установил, что заряженные тела могут не только притягиваться, но и отталкиваться. Гёрике установил, что электрическая сила способна распространяться по *"льняной нитке на один локоть"*¹. Он также отметил, что слышал при разряде шаров слабый треск и иногда наблюдал слабое свечение (*газовый разряд*).

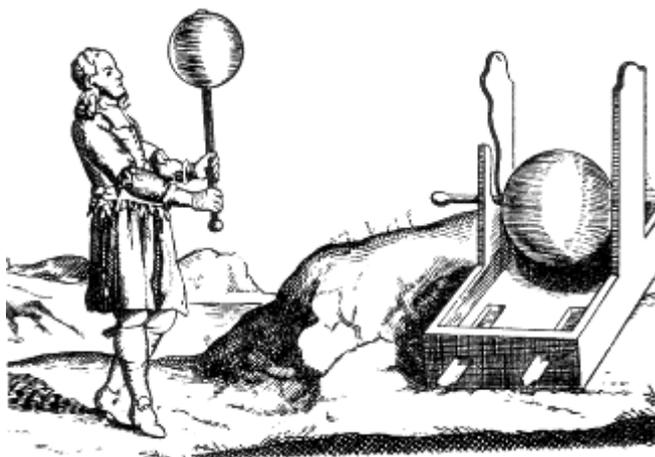


Рис. 1. Электрическая машина Гёрике (рисунок из сочинения Гёрике, 1672 г.) [31, 41]

¹ Примерно 455—475 мм.

Электрическими опытами занимался и английский учёный Исаак Ньютон (Newton, 1643—1727 г.), который ещё в 1675 г. наблюдал электрическую "пляску" кусочков бумаги, помещённых под стеклом, положенным на металлическое кольцо. При натирании стекла бумажки притягивались к нему, затем отскакивали, вновь притягивались, и т. д.

Эксперименты по электричеству проводили и другие члены Лондонского королевского общества¹. Английский (ирландский) физик Роберт Бойль (Boyle, 1627—1691 г.), повторив опыты Герике с шаром, установил, что наэлектризованное тело не только притягивает ненаэлектризованное, но и, в свою очередь, притягивается им. Он показал, что электрические взаимодействия наблюдаются не только в воздухе, но и в вакууме. Стефэн Грей (Grey, 1670—1736 г.) в 1729 г. открыл явление электропроводимости тел и показал, что для сохранения электричества тело должно быть изолировано.

На опубликованные в 1731—1732 г. опыты Грея обратил внимание французский физик Шарль Ф. Дюфё (Fau, 1698—1739 г.), создавший первую теорию электрических явлений. Сначала Дюфё установил, что *"наэлектризованные тела притягивают ненаэлектризованные и сейчас же их отталкивают, как только они наэлектризуются вследствие соседства или соприкосновения с наэлектризованными телами"*. В дальнейшем он открыл *"другой принцип, более общий и более замечательный, чем предыдущие"*. *"Этот принцип, — отмечал Дюфё, — состоит в том, что существует электричество двух родов, в высокой степени отличных один от другого: один род я называю "стеклянным" электричеством, другой — "смоляным"...* "Стекло" он назвал электричество, возникавшее при натирании стекла и горного хрусталя. "Смоляное" появлялось при натирании смолы или янтаря. Особенность этих двух родов электричества состояла в том, что однородные электричества, например, натёртые стекло или хрусталь отталкивались, а разнородные, например, "стеклянное" и "смоляное" — притягивались.

Наблюдения Дюфё дают основания считать его автором качественного **закона взаимодействия электрических зарядов:**



Одноимённые заряды отталкиваются, разноимённые — притягиваются.

¹ Лондонское королевское общество по развитию знаний о природе (The Royal Society of London), ведущее научное общество Великобритании; создано в 1660 г. и утверждено Королевской хартией в 1662 г.

Этот закон был опубликован Дюфе в мемуарах Парижской академии наук за 1733 г.

В 1745 г. голландским физиком Питером ван Мушенбруком (Musschenbroeck, 1692—1761 гг.) в г. Лейдене была независимо от немецкого исследователя Э. Г. Клейста¹ (Kleist, 1700—1748 гг.) создана "лейденская банка" (стеклянная бутылка, заполненная наполовину металлическими опилками, вставленная в металлический цилиндрический сосуд) — т. е. устройство, способное накапливать и удерживать заряды (рис. 2).

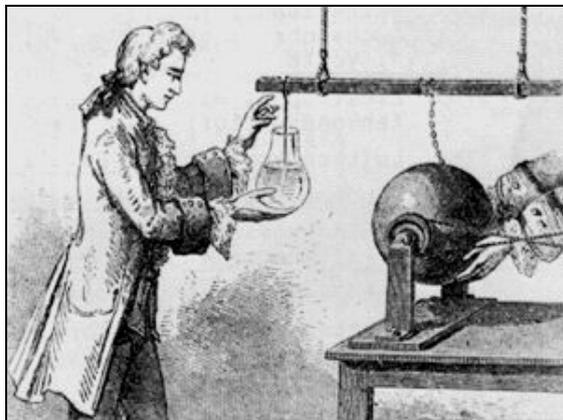


Рис. 2. Опыт Мушенбрука с лейденской банкой — электризация воды от электрической машины (стеклянный шар этой машины электризовался трением его о ладони рук) [41]

Уже Мушенбрук, описывая лейденскую банку, обратил внимание на физиологическое действие электрического разряда. Он писал: *"Хочу сообщить вам новый, но ужасный опыт, который не советую Вам повторить. Я занимался изучением электрической силы. Для этого я подвесил на шёлковых нитях железный стержень, получивший электричество от стеклянного шара, который быстро вращался вокруг оси и натирался руками. На другом конце висела медная проволока, конец которой был погружён в стеклянный круглый сосуд, заполненный наполовину водой, который я держал в правой руке; левой рукой я пытался извлекать из электрического стержня искру. Вдруг моя правая рука была поражена ударом с такой силой, что всё тело содрогнулось, как от удара молнии... Я думал, что всё кончено"* (рис. 3).

¹ Клейст в 1745 г. доложил Берлинской академии наук о своих опытах с "медицинской банкой".

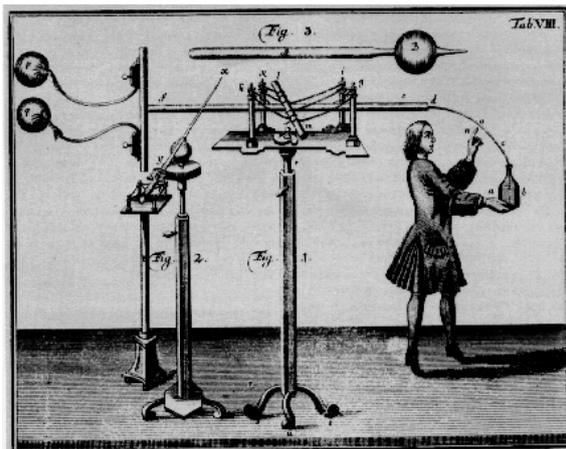


Рис. 3. Опыты Мушенбрука с лейденской банкой. Рисунок XVIII в.

После Мушенбрука физиологическим действием электрического разряда заинтересовались многие. Однако сильные мира сего не желали рисковать собственным здоровьем. По приказу короля Людовика XV (Louis XV, 1710—1774 гг.) в Версале, королевском дворце близ Парижа, 180 мушкетёров взялись за руки. Вот как описывал этот эксперимент придворный "электрик" короля аббат Жан-Антуан Нолле (Nollet, 1700—1770 гг.): *"Первый держал в свободной руке банку, а последний извлекал искру; удар почувствовался всеми в один момент. Было очень курьёзно видеть разнообразие жестов и слышать мгновенный вскрик, исторгаемый неожиданностью у большей части получающих удар"*.

Известный американский политический деятель Бенджамин Фрэнклин (Franklin, 1706—1790 гг.) соединил вместе две 20-литровые лейденские банки и, разряжая их, убивал индюшек и другую домашнюю птицу. Однажды он случайно разрядил банки через собственное тело и на несколько часов потерял сознание.

В 1750 г. Франклин разработал собственную теорию, согласно которой электричество представляет собой *"особую тонкую жидкость, пронизывающую все тела"*. По этой теории в каждом незаряженном теле всегда содержится определённое количество такой жидкости. Если по какой-либо причине в теле появляется её излишек, то тело заряжается положительно, а когда её недостаёт — отрицательно. В 1752 г. Франклин уже экспериментально доказал, что *молния* — это сильный электрический разряд. Учёный выполнил знаменитый опыт с воздушным змеем, который был запущен в

воздух при приближении грозы. На крестовине змея была укреплена заострённая проволока, к концу верёвки привязаны ключ и шёлковая лента, которую он удерживал рукой. Как только грозовая туча оказалась над змеем, заострённая проволока стала извлекать из неё электрический заряд, и змей вместе с бечевою электризовался. После того, как дождь смачивал змея вместе с бечёвкой, сделав их тем самым способными проводить электрический заряд, можно было наблюдать, как электрический заряд будет "стекать" при приближении пальца.

Когда стала ясна электрическая природа молнии, Франклин в 1760 г. установил громоотвод¹ на доме купца Веста в Филадельфии. Громоотвод, по словам Франклина, "*...либо предотвращает удар молнии из облака, либо при ударе отводит его в землю без ущерба для здания*". Правда, ещё древнеримский правитель Нума Помпилий (Pompilius, правил в 715—673/672 гг. до н. э.) знал о том, что молния "*предпочитает*" всевозможные острия, понимал "*молниепроводность*" железа и умел делать громоотводы типа современных, а во времена правления короля франков Карла Великого (Carolus Magnus, 742—814 гг.) крестьяне для защиты от молний устанавливали на полях металлические и деревянные шесты. В мае 1752 г. французские учёные Т. Ф. Далибáр (Dalibard, 1703—1799 гг.) и М. Делóр (Delor) для улавливания молний использовали металлические шесты — у Далибара шест имел высоту 12 м, а у Делора — 30 м. Оба исследователя отметили, что "*из шестов выходили искры примерно 4 см*". В 1754 г. чешский священник Прокоп Дивиш (Diviš, 1698—1765 гг.), проживавший в Прендице (Богемия), установил на своём доме основательно заземлённый десятиметровый шест.

В 1752—1753 гг. российские учёные Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765 гг.) и Георг Вильгельм Рихман (1711—1753 гг.), независимо от Франклина, также экспериментально доказали общность атмосферного электричества и электризации при трении.

Уже в январе 1745 г. Рихман начал собственные опыты по электричеству. В процессе этой работы он "*встретился со многими новыми явлениями..., открыл новый удобный способ исследовать тела, обладающие первичным, и тела, обладающие производным электричеством*". Под первичным электричеством Рихман понимал электричество, получаемое трением, под производным — электричество в проводниках, получаемое от контакта с заряженными телами.

¹ В русском языке слово "громоотвод" популярнее более правильного с научной точки зрения названия "**молниесотвод**" — ведь отводится не звук электрического разряда (гром), а собственно разряд (молния).

Позже для своих исследований Рихман создал первый в мире электрометр: "Я придумал и другой способ сравнивать электрические силы. К железной проволоке CB , отводящей электричество, я подвесил льняную нитку DE , затем на расстоянии 492 лондонских линий¹ я укрепил шёлковую голубую нитку, параллельную горизонту, а в g поместил тяжёлое тело. Шёлковую нитку Eg я разделил на десятые доли лондонского фута², обозначив точки деления льняными нитками. Когда проволоке сообщалось электричество, нитка DE приближалась к тяжёлому телу g и принимала наклонное положение, например $D4$, $D5$, $D6$ и т.д. Когда электричество прекращалось, нитка вновь принимала вертикальное положение DB . Да позволено будет назвать указателем электричества нить DE , свисающую с наделенной электричеством проволоки и приближающуюся к тяжёлому телу" (рис. 4).

Другой вариант "указателя электричества" Рихмана представлял собой отвесно установленную железную линейку, к верхнему концу которой прикреплена льняная или шёлковая нить. Внизу — деревянная дуга (квадрант) со шкалой, разбитой на градусы. Когда линейку заряжали от электрической машины, нитка тоже заряжалась и отходила от линейки. Чем больше был электрический заряд, тем дальше отклонялась нитка.

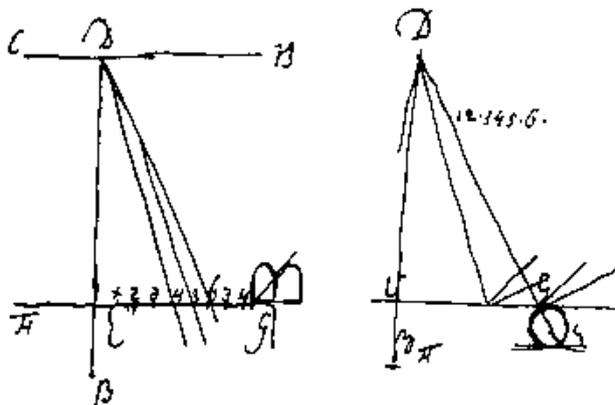


Рис. 4. Первый проект электрического указателя. Рисунки Рихмана [39]

Спустя шесть лет после начала опытов эксперименты Рихмана были описаны в "Новых Комментариях" Петербургской академии наук за 1751 г. Это была

¹ 1 линия = 2,54 мм.

² 1 фут = 304,8 мм.

первая публикация по электричеству в России. Статья Рихмана "Новые опыты с электричеством, порождаемым в телах" содержала описание его экспериментальной установки и опытов, произведённых на этой установке. Установка состояла из электрической машины Гравезанда. От электризуемого шара машины электричество отводилось железной проволокой к железной подставке, помещённой на смоле, заполнявшей конический сосуд. Подставка была связана с электрическим указателем (рис. 5).

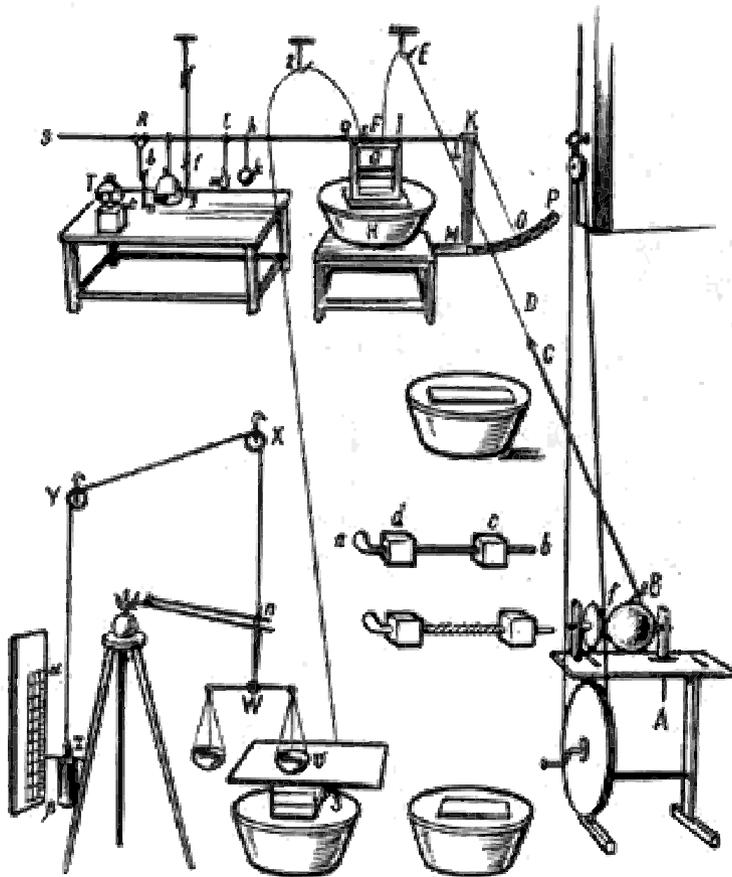


Рис. 5. Расположение приборов в электрических опытах Рихмана [39]

К тому времени Франклин уже придумал громоотвод. Ломоносов писал по поводу работ Франклина: *"Никто бы не чаял, чтобы из Америки надлежало ожидать новых наставлений об электрической силе, а однако, учинены там наиважнейшие изобретения. В Филадельфии, в Северной Америке, господин*

Вениамин Франклин столь далеко отважился, чтобы вытягивать из атмосферы тот страшный огонь, который часто целые земли погубляет".

Рихман и Ломоносов решили повторить опыты Франклина, дополнив их измерениями с помощью электрометра. Ломоносову удалось независимо от французского физика Л. Г. Лемонье (Lemonnier) обнаружить с помощью "электрического указателя" (рис. 6) электрическое поле в атмосфере при отсутствии молнии или грома.

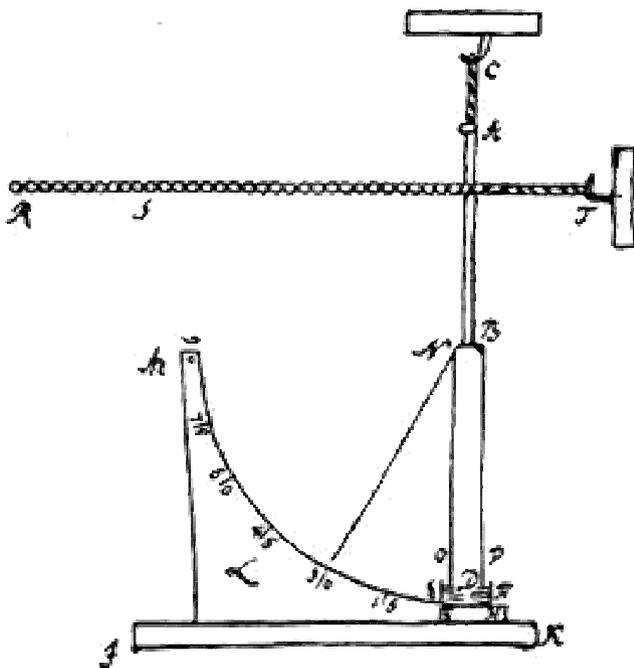


Рис. 6. Электрический указатель, применявшийся Рихманом при исследовании грозы. Рисунок Рихмана [39]

Рихман писал: "Очевидно, что в нынешнее время и физикам представляется возможность проявить своего рода отвагу и смелость в рискованном деле. Вот почему, поскольку моя обязанность в меру сил заниматься физическими исследованиями, ничто меня не отвращало от наблюдений подобного рода. Я пользовался всяким случаем, чтобы не только наблюдать, но и до некоторой степени определять явления природного электричества". Рихману удалось заметить в грозу, даже обошедшую стороной, что "шёлковая нить от линейки отскочила". 26 июля (6 августа) 1753 г. во время очередного эксперимента по исследованию атмосферного электричества в своём доме на Ва-

сильевском острове Рихман погиб от шаровой молнии¹ при абсолютно безоблачном небе.

Российский физик Франц У. Т. Эпинус (Aepinus, 1724—1802 гг.), после смерти Рихмана занявший пост заведующего физическим кабинетом Российской академии наук, в 1759 г. выступил с трактатом "Опыт теории электричества и магнетизма", в котором, опираясь на идеи Франклина и Ньютона, разработал собственную теорию электрических и магнитных явлений, подчеркнув их сходство. Впервые объяснил явления *электрической индукции*, *поляризации*, предсказал колебательный характер разряда лейденской банки. Эпинус постулировал, что сила взаимодействия пропорциональна электрическим зарядам и, исходя из всеобщей гармонии природы, уменьшается, как и ньютоновское взаимодействие гравитационных масс, пропорционально квадрату расстояния, — т. е. фактически за четверть века предвосхитил закон Кулона (см. разд. 1.4). Однако Эпинус неправильно полагал, что электричество сосредоточено во всём объёме тела. При этом Эпинус создал первый воздушный *конденсатор*, раньше итальянского физика и физиолога Алессандро Вольты (Volta, 1745—1827 гг.) выяснил роль в конденсаторе стекла не как накопителя электричества, а как хранителя его (Вольта признавал это), изобрёл простейший прибор для накопления электричества — электрофор (Вольта прямо указывал, что многим в своём изобретении электрофора он обязан русскому академику Эпинусу), открыл *пирозлектричество* (см. разд. 5.10), образующееся не при трении, а при нагревании турмалина.

Контрольные вопросы

- ? Какие взаимодействия называют электрическими?
- ? Опишите идею "указателя электричества" Рихмана.

1.2. Электрические заряды, электростатика

Понятие электрического заряда является фундаментальным. Его используют для обозначения способности тел к участию в электрических взаимодействиях.

¹ По свидетельству гравёра И. А. Соколова, который зарисовывал опыты, Рихман был поражён в голову молнией, которая "имела вид шара".

ях. Эти взаимодействия достаточно сложны и зависят от свойств участвующих в них тел, их взаимного расположения и движения. В простейшем частном случае покоящихся тел (и составляющих их частей) говорят об **электростатических взаимодействиях**, описание которых, по сути, может рассматриваться как косвенное определение заряда.

Некоторая сложность в определении электростатических взаимодействий состоит в том, что они возникают на уровне элементарных частиц, описание поведения которых невозможно на языке классической физики. Однако, в случае нахождения взаимодействующих частиц в пустом пространстве на большом (по сравнению с характерными размерами атомов) расстоянии друг от друга, их поведение достаточно хорошо описывается классической механикой.

Основные механические понятия (координаты, скорость, сила, масса, импульс и т. д.) мы определили ранее в томе "Механика"¹ данного курса, поэтому они не требуют дополнительного обсуждения.

Электростатика — раздел физики, в котором изучается взаимодействие неподвижных *точечных* электрических зарядов (электростатическое взаимодействие).

Частицы, между которыми не возникает электростатических взаимодействий, называют **нейтральными**, им приписывается **нулевой электрический заряд**.

Итак, мы можем констатировать, что **электрический заряд** — физическая величина, характеризующая способность тел и частиц к электрическим взаимодействиям.

Опыт показывает, что между двумя различными заряженными элементарными частицами могут возникать как силы отталкивания, так и силы притяжения. При этом всегда выполняется следующее правило: если две заряженные частицы одинаково взаимодействуют с третьей (обе притягиваются или отталкиваются), то между собой они всегда будут отталкиваться; в противном случае между рассматриваемыми частицами всегда возникает притяжение.

Это свойство электростатических взаимодействий позволяет разделить все заряженные частицы на две группы так, что любые две частицы из одной группы обязательно отталкиваются, а из разных групп — притягиваются.

В теории Франклина в 1750 г. впервые было введено понятие положительного и отрицательного электричества (заряда) и их обозначение: "+" и "-", что

¹ См. Бармасов А. В., Холмогоров В. Е. Курс общей физики для природопользователей. Механика / Под ред. А. С. Чирцова. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008.

оказалось удобным, так как позволило описать все возможные случаи электростатического взаимодействия частиц — притяжение и отталкивание — при помощи единой формулы (см. разд. 1.4). Стоит напомнить, что электрон в то время ещё не был открыт.



Различают два вида электрических зарядов, условно называемых положительными и отрицательными (заряд наэлектризованной стеклянной палочки назвали положительным, а смоляной (в частности, янтарной) — отрицательным). Одноимённо заряженные тела (частицы) отталкиваются, а разноимённо заряженные — притягиваются.

Существует минимальный элементарный электрический заряд e , которому кратны все электрические заряды частиц и тел.

Любой элементарной частице может быть приписано одно из трёх значений электрического заряда: $-e$, 0 , $+e$.

Электрический заряд макроскопического тела складывается из элементарных зарядов составляющих его частиц и поэтому кратен элементарному заряду e (1):

$$q = (+e)N_+ + (-e)N_- = (N_+ - N_-)e, \quad (1)$$

где N_+ и N_- — количества содержащихся в теле элементарных частиц с положительным и отрицательным зарядом соответственно.



Электричество — совокупность явлений, в которых обнаруживается существование, движение и взаимодействие электрических зарядов (заряженных частиц).

Контрольные вопросы

- ? Что такое электрический заряд?
- ? В чём сходство и отличие электрического заряда и гравитационной массы?
- ? Как взаимодействуют одноимённые и разноимённые электрические заряды?
- ? Какой заряд называют элементарным?
- ? Когда тело является электрически нейтральным, а когда заряженным?

1.3. Закон сохранения зарядов

Хороший эксперимент имеет больше ценности, чем глубокомыслие такого гения, как Ньютон.

*Г. Дэви*¹

Во все времена ни у одного народа не было физика, который бы, подобно Иоффе, вырастил такое огромное число крупных учёных из своих учеников.

*Н. Н. Семёнов*²

Точечный заряд — заряд, сосредоточенный на теле, размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми он взаимодействует, т. е. на материальной точке. При этом нужно помнить, что электрические заряды распределены в объёме и никаких конечных зарядов в материальной точке быть не может. Поэтому понятие точечного заряда является физической абстракцией³.

В классической теории электричества считают, что точечные электрические заряды q могут иметь любую величину.

Систему, через границы которой не могут пройти заряды (заряженные частицы), называют **электрически изолированной (закрытой, замкнутой)**. Незаряженные частицы могут входить и выходить через границу такой системы.

При взаимных превращениях элементарных частиц они исчезают и рождаются в таком соотношении, что алгебраическая сумма их зарядов остаётся неизменной:

$$\sum_i q_i = \text{const} . \quad (2)$$

¹ Гемфри Дэви (Davу, 1778—1829 гг.) — английский физик и химик.

² Николай Николаевич Семёнов (1896—1986 гг.) — советский учёный, один из основоположников химической физики.

³ Иногда точечным зарядом называют наэлектризованное тело, размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми оно взаимодействует. Данное определение недостаточно корректно, так как далеко не всегда даже маленькое (по сравнению с расстояниями до других тел) тело можно рассматривать как материальную точку.



Полный электрический заряд замкнутой (изолированной, закрытой) физической системы, равный алгебраической сумме зарядов слагающих систему элементарных частиц, строго сохраняется во всех взаимодействиях и превращениях этой системы (**закон сохранения электрического заряда**).

Закон сохранения заряда, установленный из обобщения опытных данных, был экспериментально подтверждён в 1843 г. английским физиком Майклом Фарадеем (Faraday, 1792—1867 гг.).

В 1909—1916 гг. американский физик Роберт Э. Милликен (Millikan, 1868—1953 гг.) показал, что в природе электрические заряды тел состоят из дискретных зарядов. Для этого Милликен взял стеклянный ящик, верх и низ которого были сделаны из металла. Эти параллельные металлические пластины были противоположно заряжены. Далее Милликен впрыскивал в ящик масло через отверстие в верхней пластине. При распылении капельки масла заряжались и двигались под действием силы тяжести и приложенного электрического поля. Освещением рентгеновскими лучами можно было ионизировать воздух между пластинами и изменять заряд капли. Учёт вязкости воздуха позволил Милликену вычислить величину минимального электрического заряда. Среди десяти красивейших экспериментов за всю историю физики **опыт Милликена** занял третье место¹.

Аналогичные эксперименты провёл в 1912 г. российский физик Абрам Фёдорович Ибффе (1880—1960 гг.). В его опытах вместо капелек масла применялись цинковые пылинки, а также капельки ртути.

Величину минимального электрического заряда обозначают через e и называют **зарядом электрона** (или **элементарным электрическим зарядом**). Факт квантования заряда является универсальным законом природы.



Электрический заряд любой частицы или системы частиц является целым кратным элементарному электрическому заряду e , равному по величине заряду электрона (исключения — дробно заряженные кварки и т. п.).

¹ По результатам опроса американских физиков, проведённого в начале XXI в. сотрудником философского факультета Университета штата Нью-Йорк Робертом Кризом (Robert Crease) и историком Brookhaven National Laboratory Стони Брук (Stony Brook).

Закон сохранения заряда означает абсолютную стабильность легчайшей заряженной частицы — электрона. Анализ возможных явлений атмосферного электричества, которые могли бы возникнуть в результате распадов электронов в атмосфере, даёт для нижней границы времени жизни электрона $>10^{21}$ лет.

Подтверждением закона сохранения заряда служит также строгое равенство (по абсолютной величине) электрических зарядов электрона и протона.

Изучение движения атомов (молекул) и микроскопических тел в электрических полях подтверждает электронейтральность вещества и, соответственно, равенство зарядов электрона и протона (и электронейтральность нейтрона) с точностью $\pm 10^{-21}$.

Английский философ Бертран Рэссел (Russel, 1872—1970 гг.) предостерегал от упрощённого подхода к понятию элементарного заряда: *"Когда я говорю, что электрон обладает определённым количеством электрического заряда, то я подразумеваю под этим только то, что электрон ведёт себя определённым образом. Заряд — это не красная краска или некое вещество, которое можно нанести на электрон и снова смыть с него. Он просто выражает определённый физический закон"*.

Контрольные вопросы

- ? Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
- ? В каких случаях выполняется закон сохранения заряда?
- ? Можно ли электрический заряд делить бесконечно?

1.4. Взаимодействие электрических зарядов; закон Кулона

Не говори всегда что знаешь, но знай всегда что говоришь.

Клавдий¹

Изучая законы закручивания нитей и проволок под действием внешней механической силы, французский инженер Шарль О. Кулон (Coulomb, 1736—

¹ Клавдий (Claudius, 10 г. до н. э. —54 г.) — римский император.

1805 г.) выяснил, что упругая сила, возникающая при закручивании, пропорциональна углу закручивания и зависит от длины нити (проволоки), её диаметра и материала, из которого она изготовлена. Используя обнаруженные зависимости, Кулон в 1784 г. сконструировал и изготовил для изучения взаимодействия зарядов установку, получившую название "**крутильные весы**"¹ (рис. 7).

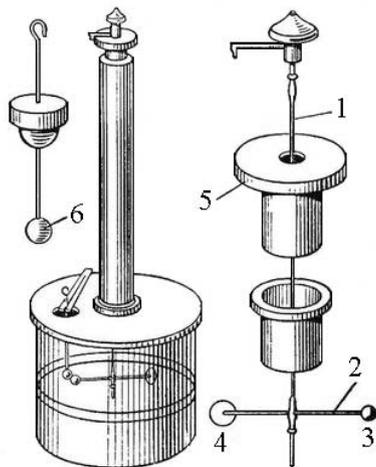


Рис. 7. Крутильные весы Кулона:

1 — упругая металлическая нить с подвешенным на ней горизонтальным изолирующим рычагом 2; 3 и 4 — проводящие шарики, укрепленные на концах рычага; 5 — шкала; 6 — заряженный шарик. Стекланный цилиндр защищал весы от движения воздуха

Чувствительность установки повышалась за счёт отражения лучика света от зеркала, закреплённого на нити (рис. 8).

С помощью этой установки Кулон в 1785 г. пришёл к открытию количественного закона о взаимодействии электрических зарядов, дав следующую формулировку своего закона: "*Отталкивательное, так же как и притягательное действие двух наэлектризованных шаров, а следовательно, и двух электрических молекул, прямо пропорционально плотности электрического*

¹ Другим автором крутильных весов считается Генри Кавендиш, измеривший в 1797—1798 гг. в лаборатории с помощью изобретённых им крутильных весов гравитационные силы притяжения между двумя шарами — см. Бармасов А. В., Холмогоров В. Е. Курс общей физики для природопользователей. Механика / Под ред. А. С. Чирцова. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008.

флюида обеих электрических молекул и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними".

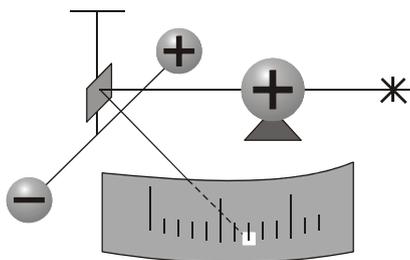


Рис. 8. Схема опыта Кулона (1785 г.)

❖ Закон Кулона:

Сила взаимодействия неподвижных точечных зарядов прямо пропорциональна произведению их величин, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена в изотропном пространстве вдоль прямой, соединяющей эти заряды.

Существенно отметить, что закон Кулона справедлив только для взаимодействия **статических (неподвижных) зарядов** бесконечно малых размеров (*точечных зарядов*). В этом случае понятие "расстояние между зарядами" имеет определённый смысл, а взаимодействие зарядов не зависит от формы заряженных тел.

Из опытов Кулона следовало, что абсолютное значение силы F взаимодействия между двумя точечными и неподвижными зарядами пропорциональна каждому из зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$|F| \sim \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (3)$$

В настоящее время определены две области, в которых, в принципе, возможно нарушение закона Кулона. Первая область — это область малых расстояний порядка 10^{-13} см, где пока не получены экспериментальные данные и нет уверенности в правомерности применения классической теории электричества. Вторая область — это область больших, географических расстояний, где также не получены экспериментальные данные о выполнении закона Кулона.

Кулон осуществил свой опыт в 1785 г. Российский учёный Рихман в своей работе, посмертно опубликованной в 1758 г., утверждал: "электрическая

материя, неким движением возбуждаемая вокруг тела, по необходимости должна опоясывать его на некотором расстоянии; на меньшем расстоянии от поверхности тела действие её бывает сильнее; следовательно, при увеличении расстояния сила её убывает по некоторому, пока ещё неизвестному закону". Таким образом, Рихман ещё в начале 1750-х гг. (почти за 40 лет до Кулона) открыл существование *электрического поля* вокруг заряженного тела, величина которого убывает с увеличением расстояния от тела.

Заметим, что ещё в 1759 г. другой российский учёный Эпинус постулировал, что сила электрического взаимодействия пропорциональна электрическим зарядам и уменьшается пропорционально квадрату расстояния, но экспериментально это не подтвердил. Экспериментально с достаточной точностью будущий закон Кулона впервые был доказан ещё в 1771—1773 гг. выдающимся английским физиком Генри Кавендишем (Cavendish, 1731—1810 гг.) из значительно более точных, чем у Кулона, но косвенных измерений. Однако Кавендиш своевременно не опубликовал свои результаты, и они оставались неизвестными более 100 лет. Первый директор Кавендишской лаборатории¹ Джеймс К. Максвелл (Maxwell, 1831—1879 гг.) обнаружил в архиве этой лаборатории подготовленную к печати рукопись Кавендиша и опубликовал её в 1879 г.

В опытах Кулона электрические заряды находились в воздухе. Дальнейшие опыты показали, что наличие вещества вокруг зарядов влияет на величину силы их взаимодействия.

Если при прочих равных условиях (величинах зарядов и их взаимном расстоянии) пространство заполнить однородной непроводящей средой, то сила взаимодействия между зарядами уменьшится. Влияние той или иной среды на величину электрического взаимодействия между зарядами можно оценить, если сравнить силы взаимодействия между зарядами в отсутствие среды (F_0) и при её наличии (F).

Назовём отношение сил $\frac{F_0}{F}$ **диэлектрической проницаемостью среды** и обозначим эту величину ε :

$$\varepsilon \equiv \frac{F_0}{F}. \quad (4)$$

¹ **Кавендишская лаборатория** — физическая лаборатория при Кембриджском университете (Великобритания). Основана в 1871 г.

Диэлектрическая проницаемость ϵ — безразмерная величина. Таким образом, при наличии непроводящей среды, в которую помещены заряды, закон Кулона принимает вид:

$$F = \frac{F_0}{\epsilon} \sim \frac{1}{\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (5)$$

Для пустоты (вакуума) $\epsilon = 1$, для воздуха при 0°C и атмосферном давлении $\epsilon = 1,000594$ (табл. 1—3).

Таблица 1. Диэлектрические проницаемости ϵ некоторых веществ при 760 мм рт. ст. [38, 56, 72]

Вещество	Диэлектрическая проницаемость ϵ
Вода (20°C)	80,08
Водород H_2 (нормальные условия)	1,00026
Водяной пар (110°C)	1,0126
Воздух (0°C)	1,000594
Масло трансформаторное (20°C)	2,24
Полиэтилен (20°C)	2,3
Спирт этиловый (15°C)	26,8
CaF_2	8,43
CaTiO_3 (поликрист.)	130
NaCl (20°C)	5,62
SnO_2 (поликрист.)	24
TiO_2	86—170 (в зависимости от ориентации кристалла)

Таблица 2. Диэлектрические проницаемости ϵ чистых жидкостей¹ [38]

Вещество	Температура							
	0 °С	10 °С	20 °С	25 °С	30 °С	40 °С	50 °С	80 °С
Ацетон	23,3	22,5	21,4	20,9	20,5	19,5	18,7	
Бензол		2,30	2,29	2,27	2,26	2,25	2,22	2,322
Вода	87,83	83,86	80,08	78,25	76,47	73,02	69,73	
Эфир этиловый	4,80	4,58	4,38	4,27	4,15			

Таблица 3. Диэлектрические проницаемости ϵ некоторых газов² при 18 °С и нормальном давлении [38]

Вещество	Диэлектрическая проницаемость ϵ
Азот	1,00061
Водород	1,00026
Воздух	1,00059
Гелий	1,00007
Кислород	1,00055
Пары воды	1,00780
Углекислый газ	1,00097

Контрольные вопросы

- ? Что определяет закон Кулона?
- ? Как формулируют и записывают закон Кулона для взаимодействия зарядов в вакууме?

¹ Примеси в небольших количествах мало влияют на величину диэлектрической проницаемости.

² Диэлектрическая проницаемость газов уменьшается с повышением температуры и возрастает с увеличением давления.

- ? Какая величина характеризует влияние среды на силу взаимодействия между зарядами?
- ? Объясните физический смысл диэлектрической проницаемости.

1.5. Единицы измерения заряда

Итак, единственный способ, при помощи которого можно измерять *электрические заряды* тел, заключается в наблюдении и измерении их взаимодействия. Это утверждение лежит в основе *закона Кулона* (5):

$$|\mathbf{F}| = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (6)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий, в частности, от используемой системы единиц.

Единицы измерения силы и расстояния уже введены в механике¹. Следовательно, остаётся ввести единицы измерения зарядов.

Количество электричества или *электрический заряд* — величина, определяющая интенсивность электрического взаимодействия заряженных частиц.

Универсальность элементарного заряда наводит на мысль о построении "**естественной физической системы единиц**", в которой элементарный заряд (заряд протона) и коэффициент k положены равными единице. Такой подход реализован, например, в **атомной системе единиц**, где равными единице также считаются масса электрона и постоянная Планка. Однако в такой системе механические величины измеряются в совершенно непривычных единицах (например, расстояние — в размерах невозбуждённых атомов водорода), что делает её малоприменимой.

Исторически в электричестве и магнетизме использовались различные системы единиц²: абсолютная электростатическая СГСЭ, электромагнит-

¹ См. Бармасов А. В., Холмогоров В. Е. Курс общей физики для природопользователей. Механика / Под ред. А. С. Чирцова. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008.

² Более подробно о различных системах единиц см. в Бармасов А. В., Холмогоров В. Е. Курс общей физики для природопользователей. Механика / Под ред. А. С. Чирцова. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008.

ная СГСМ, гауссова система¹ СГСГ/СГС, практическая МКСА, международная СИ.

Удобнее всего в курсе электричества и магнетизма использовать одну из модификаций системы единиц СГС — **абсолютную гауссову систему единиц**. Хотя и она не полностью свободна от недостатков. Её использование является разумным компромиссом между установившимися традициями в использовании "привычных" механических единиц и естественным желанием иметь систему единиц, максимально отражающую фундаментальные физические идеи в электричестве и магнетизме.

В гауссовой системе единиц расстояния измеряются в сантиметрах, время — в секундах, масса — в граммах. Сила при этом измеряется в производных единицах — динах ($1 \text{ дин} = 1 \text{ г}\cdot\text{см}\cdot\text{с}^{-2}$), основанных на выборе коэффициента пропорциональности во втором законе Ньютона равным единице. Аналогично равным безразмерной единице положен и коэффициент пропорциональности в соотношении (6).

Поскольку единицы измерения всех величин, кроме зарядов, в законе взаимодействия (6) определены, то *закон Кулона* можно использовать для определения единицы заряда. При таком способе определения элементарный заряд оказывается в $4,8\cdot 10^9$ раз меньше единичного.

Единица заряда в системе СГС и гауссовой — **франклин** (Фр, Fr) — такое количество электричества, которое действует на равное ему количество электричества, находящееся в вакууме на расстоянии 1 см, с силой, равной 1 дин (оба заряда *точечные* и *неподвижные*). Такой заряд назвали **абсолютным электрическим зарядом**.

Единицы электрических величин в гауссовой системе единиц равны единицам абсолютной электростатической системы СГСЭ, а единицы магнитных величин — единицам электромагнитной системы СГСМ. Эти системы построены по одному типу, поэтому гауссову систему единиц часто называют **симметричной системой СГС**. Эта симметрия делает гауссову систему единиц удобной для задач, в которых подчёркивается взаимная адекватность магнитных и электрических величин, описывающих электромагнитное поле.

¹ Гауссова система единиц названа в честь немецкого учёного Карла Фридриха Га́усса (Gauß, 1777—1855 гг.), впервые вместе с немецким физиком Вильгельмом Эдуардом Вебером (Weber, 1804—1891 гг.) в 1832 г. предложившего абсолютную систему единиц с основными единицами: миллиметр, миллиграмм и секунда, и применившего эту систему для измерений магнитных величин.

В системе единиц СИ для измерения электрических величин вводится не производная, а независимая единица. В качестве основной электрической единицы выбрана практическая единица силы тока — *ампер* (А), названная так постановлением I Международного конгресса электриков в Париже (15.09—5.10.1881 г.) в честь французского физика Андре М. Ампера (Amperè, 1775—1836 гг.).

В результате в системе СИ за единицу электричества принят **кулон**¹ (Кл, С) — количество электричества, протекающее за 1 с через поперечное сечение проводника при токе в цепи, равном 1 А.

☞ Пример. Величина заряда грозового облака равна 10—20 Кл (в отдельных случаях достигает 300 Кл). Заряд всей Земли — $5,7 \cdot 10^5$ Кл. ☞

Ампер-секунда — единица количества электричества; то же, что кулон (табл. 4).

Ампер-час — внесистемная единица количества электричества, равная 3 600 Кл. Обозначается а·ч. В ампер-часах обычно выражают заряд *аккумуляторов*.

Таблица 4. Соотношения между единицами заряда

Единица	Кл (А·с)	Франклин	СГСМ
1 Кл (А·с)	1	$2,9998 \cdot 10^9$	0,1
1 Фр (СГСЭ)	$3,33564 \cdot 10^{-10}$	1	$3,33564 \cdot 10^{-11}$
1 СГСМ	10	$2,9998 \cdot 10^{10}$	1

Для измерения *токов* и *напряжений* применяется **гальванометр**. Первые гальванометры были созданы в 1820-х гг.

Для измерений количества электричества применяется **баллистический гальванометр** — гальванометр с искусственно увеличенным моментом инерции подвижного индикатора (период собственных колебаний $T_0 > 15$ с). Если длительность электрического импульса в цепи много меньше T_0 , то первое наибольшее отклонение индикатора l_m (**баллистический отброс**) после протекания импульса пропорционально количеству электричества Q , протекающего через рамку баллистического гальванометра:

$$Q = K_{\Gamma} l_m, \quad (7)$$

¹ 1 кулон эквивалентен $6,25 \cdot 10^{18}$ электронам.

где K_{Γ} — **баллистическая постоянная по заряду** или просто **постоянная гальванометра**; l_m — баллистический отброс.

Баллистическая чувствительность по заряду (чувствительность к протекающему через баллистический гальванометр заряду) и обратная ей величина (баллистическая постоянная K_{Γ}) зависят от сопротивления внешней электрической цепи, на которую замкнут баллистический гальванометр во время измерений. Поэтому баллистический гальванометр градуируют при том же внешнем сопротивлении, при котором будут выполняться измерения.

При введении независимой единицы заряда закон Кулона должен содержать коэффициент пропорциональности, имеющий определённую величину и размерность:

$$|\mathbf{F}| = k_0 \frac{1}{\epsilon_0} \frac{1}{\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (8)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная.

Электрическая постоянная ϵ_0 — физическая постоянная, входящая в уравнения законов электрического поля (в том числе в *закон Кулона*) при записи этих уравнений в системе СИ.

Физический смысл электрической постоянной ϵ_0 следует из её раннего названия — **абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума**.

Значение диэлектрической проницаемости ϵ зависит от типа вещества, температуры, давления и других параметров. В отличие от диэлектрической проницаемости ϵ электрическая постоянная ϵ_0 (диэлектрическая проницаемость вакуума) зависит только от выбора системы единиц.

В гауссовой системе единиц полагают $\epsilon_0 = 1$ и считают величиной безразмерной.

❖ **Закон Кулона в среде в гауссовой системе:**

$$|\mathbf{F}| = \frac{1}{\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (9)$$

В системе СИ для так называемой рационализации записи формул во все соотношения, описывающие сферически симметричные взаимодействия, вво-

дится дополнительный множитель (коэффициент) рационализации

$$\left(k_0 = \frac{1}{4\pi}\right).$$

Рационализованная форма записи уравнений электромагнетизма была впервые предложена английским физиком Оливером Хэвисайдом (Heaviside, 1850—1925 гг.). При рационализованной форме в знаменатели закона Кулона и закона Био—Савара—Лапласа ставится коэффициент 4π . В результате этого в ряде уравнений, относительно часто встречающихся на практике, этот коэффициент исчезает, и уравнения приобретают более симметричный вид. В первую очередь это относится к уравнениям Максвелла. Такая "рационализация" упростила инженерные расчёты, но скрыла физический смысл формул.

Таким образом, множитель $\frac{1}{4\pi}$ вводится и в закон Кулона в среде в системе СИ:

$$|F| = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{\epsilon_a} \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (10)$$

где произведение $\epsilon_0 \cdot \epsilon \equiv \epsilon_a$ — **абсолютная диэлектрическая проницаемость данной среды**.

Введение абсолютной диэлектрической проницаемости ϵ_a позволяет ввести "универсальную" форму записи законов электростатики, не уточняя систему единиц (СИ или гауссова) и среду (вакуум или диэлектрик).

Величины ϵ_0 и ϵ_a в системе СИ являются размерными:

$$[\epsilon_a] = [\epsilon_0] = \frac{[q]^2}{[F] \cdot [r]^2} = \text{Кл}^2 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}.$$



К основным недостаткам системы СИ в электростатике следует отнести введение в фундаментальный закон взаимодействия (6) весьма "громоздкого" коэффициента пропорциональности k и, что более важно, отсутствие соответствующей реальному положению дел симметрии между математическими формулами, описывающими законы электричества и магнетизма.

Найдём значение системного (переводного) коэффициента k в формуле закона Кулона. Будем считать, что два заряда в 1 Кл каждый расположены и закреплены на расстоянии 1 м друг от друга. Подсчитаем силу, с которой эти заряды взаимодействуют между собой.

В системе СГС ($k = 1$):

$$F_{12} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} = 1 \cdot \frac{2,9998 \cdot 10^9 \cdot 2,9998 \cdot 10^9}{100 \cdot 100} = 8,988 \cdot 10^{14} \text{ (дин)} \approx 9 \cdot 10^9 \text{ (Н)}. \quad (11)$$

Следовательно, два заряда в 1 Кл каждый, находясь на расстоянии в 1 м, взаимодействуют с силой, эквивалентной почти миллиону тонн-сил¹!

$$F_{12} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} = 1 \cdot \frac{1 \cdot 1}{1 \cdot 1}. \quad (12)$$

Приравнявая (11) и (12), получаем: $k = 8,988 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Кл}^{-2}$. Вместо этого значения k при расчётах принято использовать округлённое значение $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Кл}^{-2}$.

Таблица 5. Аналогии между механическими и электрическими взаимодействиями

Механика	Электростатика
$ \mathbf{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ — закон всемирного тяготения Ньютона	$ \mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ — закон взаимодействия электрических зарядов Кулона

Контрольные вопросы

- ? Каков элементарный заряд в системах СИ и СГСЭ?
- ? Напишите закон Кулона для взаимодействия зарядов с учётом среды в системе СИ.
- ? Напишите закон Кулона в нерационализованной и рационализованной формах.

¹ 1 килограмм-сила (кгс) = 9,80665 Н.

- ? Чему равен коэффициент пропорциональности в законе Кулона в системе СИ?
- ? Определите размерность (в системе СИ) для ϵ_0 и ϵ_a .
- ? Что такое электрическая постоянная и чему она равна в системе СИ?
- ? Установите единицу электрического заряда в системе СИ, сформулируйте её определение.

Интернет-ресурсы

- <http://www.allmeasures.com/table.asp?electric=on&Submit=Conversion+Table>

ГЛАВА 2

Электрическое поле. Напряжённость электростатического поля

Мы живём на нашей планете среди вопросительных знаков, которые щедро и повсюду поставила перед нами природа!

Б. Эйвельманс¹

2.1. Электрическое поле

Неподвижный точечный электрический заряд q , расположенный в какой-либо точке пространства, неразрывно связан с создаваемым им в окружающем пространстве полем. Это поле заполняет всё пространство и, в частности, проявляется в виде силы F , с которой оно воздействует на помещаемый в различные точки поля другой неподвижный точечный заряд q_0 .



Силы, обнаруживаемые при внесении в пространство электрических зарядов, указывают на существование силового поля, в данном случае — поля электростатических сил.

¹ Бернар Эйвельманс (Heuvelmans, 1916—2001 гг.) — бельгийский зоолог и писатель.

Электрическое поле — векторное поле, определяющее силовое воздействие на заряженные частицы, не зависящее от скорости движения частиц¹. Электрическое поле является одной из компонент единого *электромагнитного поля*.

Напомним (см. разд. 1.2): *электрический заряд* — величина, определяющая интенсивность электрического взаимодействия заряженных частиц. Теперь мы можем по-другому сформулировать определение электрического заряда: электрический заряд — источник электрического поля, связанный с материальным носителем.

Вспомним, что в *электростатике* мы изучаем неподвижные (т. е. статичные) точечные электрические заряды. **Электростатическое поле** — векторное поле, созданное неподвижными электрическими зарядами.

Не существует электростатических полей, не связанных с зарядами, как не существует неокружённых полей электрических зарядов.

Электростатическое поле, созданное зарядом q , существует независимо от наличия или отсутствия других зарядов. Однако оно может быть обнаружено лишь с помощью сил, испытываемых любым другим зарядом q_0 , помещённым в это поле. Этим обстоятельством и пользуются для количественной характеристики электрического поля. Такой положительный единичный заряд q_0 называется **пробным зарядом**.

Контрольные вопросы

- ? Что такое электрическое поле?
- ? Назовите основные свойства электрического поля.
- ? Какое поле называется электростатическим?

2.2. Вектор напряжённости электрического поля

Электрическое поле представляет собой разновидность **силового поля**: на заряженные частицы, помещённые в каждой точке такого поля, действуют

¹ Представление об электрическом поле было введено Фарадеем в 1830-х гг.

силы, прямо пропорциональные определённому физическому свойству этих частиц — заряду.

Для характеристики величины и направления силового поля в конкретной точке поля вводят векторную величину, называемую **напряжённостью** поля.

Выражение для силы F_0 , действующей на *пробный заряд* q_0 , может быть представлено как произведение величины этого заряда на множитель, не зависящий от его характеристик (13):

$$F_0 = q_0 E(r_0). \quad (13)$$

Векторный множитель E называют **вектором напряжённости электростатического (электрического) поля в данной точке пространства**. Вектор напряжённости электрического поля E в заданной точке пространства r_0 равен силе, действующей на положительный единичный заряд, помещённый в данную точку пространства.

Напряжённость электростатического поля E — векторная характеристика электрического поля, пропорциональная силе, действующей на покоящийся в данной системе отсчёта единичный электрический заряд. При этом предполагается, что внесение заряда (заряженного пробного тела) во внешнее поле не изменяет такового.

Часто вместо строгого термина "вектор напряжённости электростатического поля в данной точке пространства" используют термин **вектор напряжённости**, электрическое поле или просто напряжённость:

$$E \equiv \frac{F}{q_0}, \quad (14)$$

Единицей напряжённости электростатического поля в системе СИ является *вольт* на метр ($1 \text{ СГСЭ} = 3 \cdot 10^4 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$) (см. разд. 4.3) (табл. 6).

Таблица 6. Соотношения между единицами напряжённости электрического поля

Единица	$\text{В} \cdot \text{м}^{-1}$	$\text{В} \cdot \text{см}^{-1}$	Гауссова (СГСЭ)	СГСМ
$1 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$	1	10^{-2}	$3,34 \cdot 10^{-5}$	10^6
$1 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$	10^2	1	$3,34 \cdot 10^{-3}$	10^8
1 СГС (СГСЭ)	$2,99792458 \cdot 10^4$	$2,99792458 \cdot 10^2$	1	$3 \cdot 10^{10}$
1 СГСМ	10^{-6}	10^{-8}	$3,34 \cdot 10^{-11}$	1

Таблица 7. Аналогия между механическими и электрическими физическими величинами

Механика	Электростатика
$\mathbf{G} \equiv \frac{\mathbf{F}}{m}$ — напряжённость гравитационного поля, СИ — $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$	$\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{F}}{q}$ — напряжённость электрического поля, СИ — $\text{В}\cdot\text{м}^{-1}$, гауссова — $\text{Фр}\cdot\text{см}^{-2}$

Контрольные вопросы

- ? Что называют напряжённостью электрического поля? Какая формула выражает суть этого понятия?
- ? Чему равна напряжённость поля, созданного точечным зарядом?
- ? Какое направление имеет вектор напряжённости электрического поля?

2.3. Линии напряжённости электростатического поля и их свойства

Перемещая *пробный заряд* в электростатическом поле, можно установить структуру всего поля. Удобным оказался графический метод описания электростатического поля по аналогии с другими силовыми полями — указывая направление и величину вектора *напряжённости*.

В однородном изотропном пространстве вектор напряжённости \mathbf{E} электростатического поля неподвижного точечного заряда q в любой точке направлен от заряда q , если он положительный ($q > 0$), или к заряду q , если он отрицательный ($q < 0$).

Принято представлять направление вектора напряжённости электростатических полей в виде стрёлок. Например, в однородном изотропном пространстве для точечных зарядов $q > 0$ ("**исток**") и $q < 0$ ("**сток**") (рис. 9).

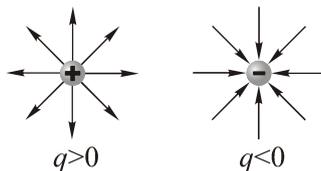
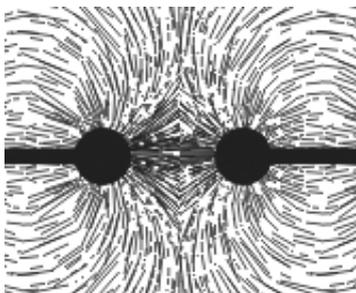
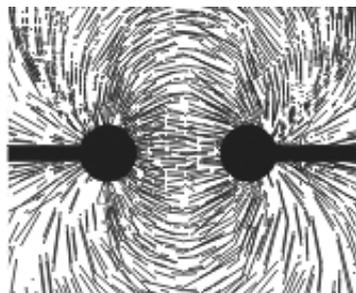


Рис. 9. Представление направления вектора напряжённости электростатических полей в виде стрёлок

Графически электростатическое поле характеризуют с помощью **линий напряжённости** или **силовых линий**¹ — кривых, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора силы, с которой электростатическое поле действует на заряд, т. е. с направлением вектора напряжённости электростатического поля в данной точке, а густота² линий в любой области пропорциональна величине напряжённости поля в этой области (рис. 10—12).



a



б

Рис. 10. Визуализация электростатического поля (*a* — полярность одинаковая; *б* — полярность разная)

Чтобы с помощью линий напряжённости охарактеризовать не только направление, но и величину вектора \mathbf{E} , условно принимают, что число линий, проходящих через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно

¹ Физический смысл имеет только семейство, совокупность линий напряжённости, но не отдельная линия. Понятие о семействе линий введено Фарадеем.

² **Густотой силовых линий** называют количество линий, проходящих через перпендикулярную к линиям площадку единичной площади.

этим линиям, должно равняться численной величине напряжённости электрического поля в данной области поля (рис. 12):

$$E = \frac{dN}{dS}. \quad (15)$$

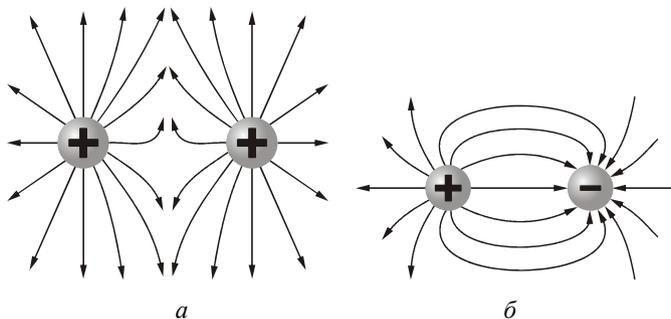


Рис. 11. Силовые линии электростатического поля двух одинаковых по величине неподвижных точечных зарядов (*а* — полярность одинаковая; *б* — полярность разная)

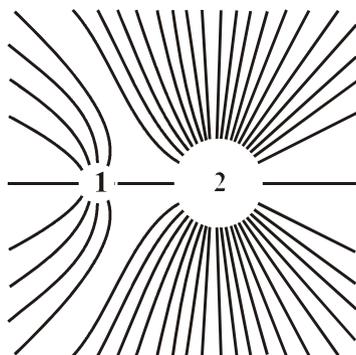


Рис. 12. Силовые линии электростатического поля двух одноимённых неподвижных зарядов (заряд 1 меньше заряда 2)



Величину напряжённости электростатического поля характеризуют густотой линий напряжённости: в тех областях, где величина E больше, линии напряжённости проходят гуще, и наоборот.

Максвелл писал: "...Не следует смотреть на эти линии как на чисто математические абстракции. Это направления, в которых среда испытывает

напряжение, подобное натяжению верёвки, или, лучше сказать, подобное натяжению собственных наших мускулов".

Линии напряжённости характеризуют поле весьма неполно. Электрическое поле есть непрерывный материальный объект, линии же напряжённости могут быть проведены с любой, но всё же конечной густотой. Тем не менее, семейство силовых линий электрического поля характеризует распределение напряжённости электрического поля в пространстве.

Контрольные вопросы

- ? Что называют линиями напряжённости электрического поля?
- ? Приведите примеры графического изображения электрических полей.

2.4. Принцип суперпозиции электростатических полей; электрический диполь

Экспериментально установлено, что электростатические взаимодействия подчиняются **принципу суперпозиции**: сила, действующая на точечный неподвижный *элементарный заряд* со стороны других неподвижных элементарных зарядов может быть рассчитана как сумма сил, возникающих при всех парных взаимодействиях.

Если электростатическое поле создаётся не одним, а несколькими неподвижными точечными зарядами, то это поле будет действовать на пробный заряд q_0 , помещённый в некоторой точке поля, с результирующей силой F_0 (рис. 13):

$$F_0 = F_1 + F_2 = q_0 E_1 + q_0 E_2 = q_0 (E_1 + E_2). \quad (16)$$



Силы, возникающие в результате электрического взаимодействия, складываются по тем же законам, как и силы в механике, т. е. вектор F_0 равен геометрической сумме сил F_i , создаваемых электростатическими полями каждого неподвижного точечного заряда и определяемых по *закону Кулона* (см. разд. 1.4).

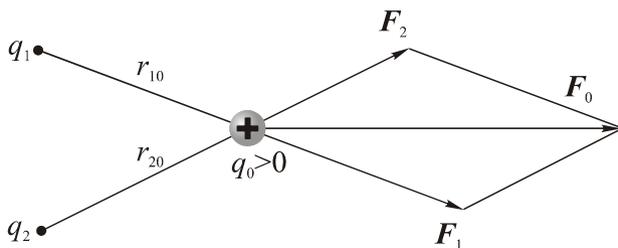


Рис. 13. Результирующая сила F_0

Вектор напряжённости электростатического поля в точке расположения заряда q_0 будет равен:

$$\frac{F_0}{q_0} = E_1 + E_2 = E_0. \quad (17)$$

Это соотношение является полевой формулировкой принципа суперпозиции (наложения) электростатических полей двух точечных зарядов — каждое из полей действует так, как если бы других полей не было.

При наличии в рассматриваемой системе нескольких неподвижных точечных зарядов принцип суперпозиции их электростатических полей в данной точке пространства записывают в виде векторной суммы напряжённостей электростатических полей отдельных зарядов:

$$E = \sum_i E_i. \quad (18)$$



Вектор напряжённости электростатического поля системы точечных неподвижных зарядов — геометрическая сумма напряжённостей электростатических полей, создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности.

Принцип суперпозиции электростатических полей отдельных зарядов отражает тот факт, что при наложении полей они взаимно не искажают друг друга, а проявляют свою индивидуальность в данной точке пространства. Он выражает одно из самых замечательных свойств электростатических полей и позволяет вычислять напряжённость электростатического поля системы зарядов, представив её в виде совокупности точечных неподвижных зарядов.

Введённая из соображений удобства расчётов, напряжённость электростатического поля имеет глубокий физический смысл. В физике понятие поля

используется для обозначения механизма передачи взаимодействия между частицами, отделёнными друг от друга промежутками часто пустого пространства. Подразумевается, что каждый заряд является источником электрического поля, "заполняющего" окружающее его "пустое" пространство. Действующая же на заряд сила возникает не в результате непосредственного взаимодействия зарядов (как это допускалось в рамках концепции дальнего действия¹), а как результат воздействия на него поля, создаваемого всеми остальными зарядами (кроме него самого) в точке нахождения рассматриваемого заряда. Описанный механизм возникновения взаимодействий получил название **концепции ближнего действия**².

Вектор напряжённости (19) используется в качестве количественной характеристики микроскопического электростатического поля:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}_0) = \sum_{k=1} \mathbf{E}_k,$$

$$\mathbf{E}_k = \frac{1}{\epsilon_a} \frac{q_k (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_k)}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_k|^3}.$$
(19)

Определяемое соотношением (19) электростатическое поле называется **микроскопическим** (рис. 14). Знание микроскопического поля позволяет решать задачи электростатики с максимальной для классической теории точностью.

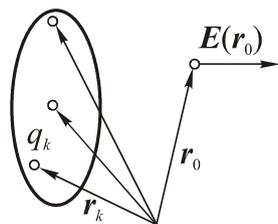


Рис. 14. Микроскопическое поле, создаваемое распределением элементарных зарядов

Однако в подавляющем большинстве случаев реальные расчёты такого поля оказываются слишком трудоёмкими. Для решения большинства практиче-

¹ В соответствии с ранней **концепцией дальнего действия** взаимодействие между телами может осуществляться непосредственно через пустое пространство, которое не принимает участия в передаче взаимодействия, передача взаимодействия происходит мгновенно.

² Согласно концепции ближнего действия взаимодействие между телами осуществляется посредством полей, непрерывно распределяющихся в пространстве.

ских задач классической физики оказывается возможным заменить микроскопическое поле "сглаженным" макроскопическим.

Переход к **макроскопическому полю** происходит в результате приближённой замены истинного дискретного распределения элементарных зарядов сглаженным распределением, которое часто можно считать кусочно-непрерывным.

В **макроскопической электростатике** электрический заряд тела может считаться точечным, только если его поле рассматривается на расстояниях, существенно больших, чем характерные размеры заряженного тела.

В противном случае (рис. 15) электрический заряд считают непрерывно распределённым в некоторой области пространства и для этого случая вводят **объёмную плотность электрического заряда** ρ_q в точке (x, y, z) :

$$\rho_q \equiv \rho(x, y, z) = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta q}{\delta V} \approx \frac{dq}{dV}, \quad (20)$$

где δq — величина заряда, находящегося в объёме δV в окрестности точки (x, y, z) в момент времени t (табл. 8).

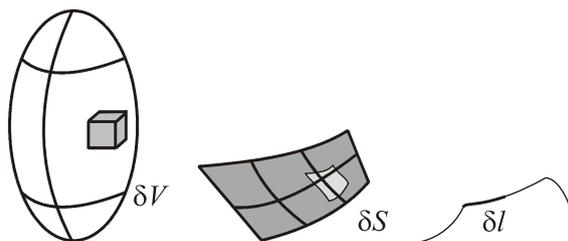


Рис. 15. Физически бесконечно малые области распределений объёмного, поверхностного и линейного заряда

Таблица 8. Соотношения между единицами объёмной плотности заряда

Единица	Кл·м ⁻³	Фр·см ⁻³	СГСМ
1 Кл·м ⁻³	1	3·10 ³	10 ⁻⁷
1 Фр·см ⁻³	3,33564·10 ⁻⁴	1	3,33564·10 ⁻¹¹
1 СГСМ	10 ⁷	3·10 ¹⁰	1

Если электрический заряд находится в слое, толщиной которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием, на котором рассматривается поле, то определяют **поверхностную плотность электрического заряда** σ_q :

$$\sigma_q \equiv \sigma(x, y) = \lim_{\delta S \rightarrow 0} \frac{\delta q}{\delta S} \approx \frac{dq}{dS}, \quad (21)$$

где δq — заряд элемента поверхности δS (рис. 15) (табл. 9).

Таблица 9. Соотношения между единицами поверхностной плотности заряда

Единица	Кл·м ⁻²	Гауссова (СГСЭ)	СГСМ
1 Кл·м ⁻²	1	3·10 ⁵	10 ⁻⁵
1 СГС (СГСЭ)	3,33564·10 ⁻⁶	1	3,33564·10 ⁻¹¹
1 СГСМ	10 ⁵	3·10 ¹⁰	1

☞ Средняя поверхностная плотность заряда Земли равна $1,15 \cdot 10^{-9}$ Кл·м⁻². ☐

Линейная плотность электрического заряда λ_q :

$$\lambda_q \equiv \lambda(x) = \lim_{\delta L \rightarrow 0} \frac{\delta q}{\delta L} \approx \frac{dq}{dL}, \quad (22)$$

где δq — заряд элемента линии δL (рис. 15).

Даже если заряд считается *точечным*, часто из соображений математического удобства считают его непрерывно распределённым в микрообласти пространства.

Входящие в определения плотностей отношения не являются точными производными в строгом математическом смысле, поскольку при истинном стремлении к нулю размеров рассматриваемой области неизбежно начнёт сказываться дискретность распределения зарядов. Фактически под элементарными размерами понимаются размеры физически бесконечно малых областей, которые, с одной стороны, существенно меньше характерных размеров рассматриваемой задачи, с другой — достаточны для того, чтобы дискретность распределения зарядов была бы несущественной. В дальнейшем, разумеется, с учётом сказанного, введённые плотности будут рассматриваться как обыкновенные производные, допускающие "обычные" математические операции с ними. Переход к непрерывным распределениям

позволяет заменить суммирование в выражении (19) для микроскопического поля на интегрирование (23):

$$E = \int \frac{dq(\mathbf{r})}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|^3} \cdot (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}). \quad (23)$$

Рассчитываемое по формуле (23) макроскопическое поле оказывается близким к истинному микроскопическому полю в точках наблюдения \mathbf{r}_0 , удалённых от источников поля. При несоблюдении этого условия сглаженное макроскопическое поле (рис. 16) может существенно отличаться от микроскопического, быстро возрастающего вблизи каждого элементарного заряда. В этом случае вычисления макроскопического поля дают информацию об усреднённых по макроскопическим объёмам значениях истинного поля.

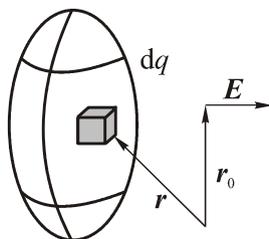


Рис. 16. Сглаженное макроскопическое поле, создаваемое непрерывным распределением заряда

Рассмотрим принцип суперпозиции на примере простейшей электрической системы — электрического диполя.

Электрическим диполем¹ называют систему, образованную двумя равными точечными зарядами противоположных знаков, жёстко связанными между собой и отстоящими друг от друга на расстоянии l , значительно меньшем, чем расстояние $|\mathbf{R}|$ до точки М, в которой измеряется электростатическое поле (рис. 17).

Отрезок прямой, проходящей через заряды, называют **осью диполя** l . Ось диполя — векторная величина, направленная от отрицательного заряда к положительному (рис. 18)².

¹ От ди... и греч. pólos — полюс. Другое название — **двойной электрический полюс**.

² Строго говоря, ось диполя — не вектор, а своего рода псевдовектор, так как её направление задаётся искусственно.

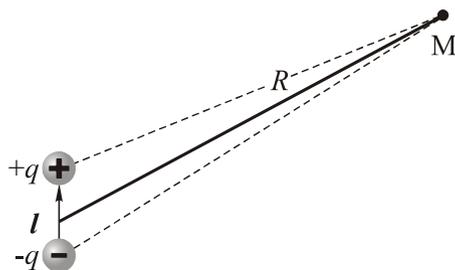


Рис. 17. Электрический диполь: заряды $-q$ и $+q$ на расстоянии l друг от друга.

Дипольный момент диполя $\mathbf{p} = q\mathbf{l}$ полностью определяет электрическое поле диполя на расстояниях $R \gg l$

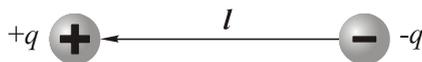


Рис. 18. Ось диполя

Электрический дипольный момент¹ \mathbf{p} — вектор, равный произведению заряда q электрического диполя на его ось \mathbf{l} и направленный вдоль оси от отрицательного заряда к положительному:

$$\mathbf{p} \equiv q\mathbf{l}. \quad (24)$$

Единица измерения электрического дипольного момента в СИ — кулон-метр (Кл·м) (табл. 10).

Таблица 10. Соотношения между единицами электрического дипольного момента

Единица	Кл·м
1 Фр·см (гауссова система)	$3,33564 \cdot 10^{-12}$
1 атомная единица диполя	$8,47836 \cdot 10^{-30}$
1 дебай	$3,33564 \cdot 10^{-30}$

Определим напряжённость электростатического поля диполя в точке М на прямой, совпадающей по направлению с осью диполя ($|q_1| = |q_2| = q; l \ll r_1,$

$r_2; r_1 = r + \frac{l}{2}; r_2 = r - \frac{l}{2}$) (рис. 19).

¹ Другое название — **момент диполя**.

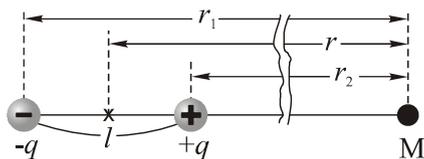


Рис. 19. К расчёту напряжённости электростатического поля диполя (для удобства масштаб изменён — в действительности $r_2 \gg l$)

$$\mathbf{E}_M = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2, \quad (25)$$

$$\begin{aligned} E_M &= -k \frac{q_1}{r_1^2} + k \frac{q_2}{r_2^2} = kq \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2} \right) = kq \frac{(r_1^2 - r_2^2)}{r_1^2 r_2^2} = \\ &= kq \frac{(r_1 - r_2)(r_1 + r_2)}{r_1^2 r_2^2} = kq \frac{l2r}{r_1^2 r_2^2} \cong k \frac{2ql}{r^3}. \end{aligned} \quad (26)$$



Вдали от диполя его электрическое поле E убывает с расстоянием как $1/r^3$, т. е. быстрее, чем поле точечного заряда ($\sim 1/r^2$).

В векторной форме:

$$\mathbf{E} = k \frac{2\mathbf{p}}{r^3}. \quad (27)$$



Дипольный момент определяет электростатическое поле диполя на большом расстоянии R от диполя ($R \gg l$).

Определим величину вектора напряжённости электростатического поля диполя в точке М (рис. 20), лежащей на прямой, перпендикулярной к оси диполя и восстановленной из её середины ($|q_1| = |q_2| = q$; $r_1 = r_2 = r$, $l \ll r$; $E = \cos \alpha$):

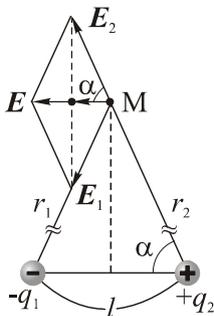


Рис. 20. К расчёту напряжённости электростатического поля диполя (для удобства масштаб изменён — в действительности расстояние от диполя до точки М $\gg l$)

$$\mathbf{E}_M = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2, \quad (28)$$

$$\begin{aligned} E_M &= E_1 \cos \alpha + E_2 \cos \alpha = k \frac{q}{r_1^2} \cos \alpha + k \frac{q}{r_2^2} \cos \alpha = \\ &= k \frac{2q}{r^2} \cos \alpha = k \frac{2q}{r^2} \frac{l/2}{r} = k \frac{ql}{r^3} = k \frac{p}{r^3}. \end{aligned} \quad (29)$$

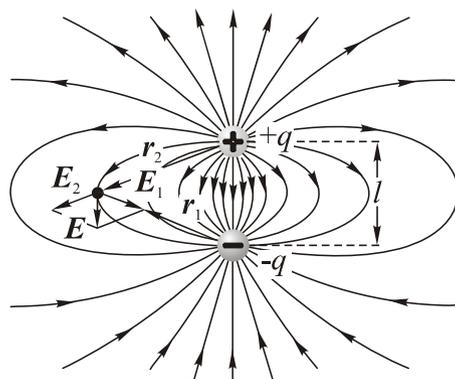


Рис. 21. Электростатическое поле электрического диполя



Электростатическое поле электрического диполя в изотропном пространстве обладает осевой симметрией, поэтому картина силовых линий этого поля в любой плоскости, проходящей через ось диполя, одна и та же (рис. 21).

Компоненты напряжённости поля \mathbf{E} вдоль оси диполя (\mathbf{E}_p) и в направлении, перпендикулярном к \mathbf{p} (\mathbf{E}_\perp), пропорциональны дипольному моменту и в системе единиц СГС (или гауссовой) равняются:

$$E_p = \frac{p}{R^3} (3 \cos^2 \alpha - 1), \quad (30)$$

$$E_\perp = \frac{3p}{R^3} \cos \alpha \sin \alpha, \quad (31)$$

где α — угол между \mathbf{p} и радиус-вектором \mathbf{R} точки пространства, в которой измеряется поле диполя.

Полная напряжённость (рис. 22):

$$E = \sqrt{E_p^2 + E_{\perp}^2}. \quad (32)$$

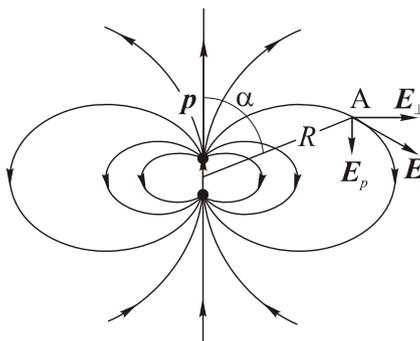


Рис. 22. Электростатическое поле электрического диполя



На оси диполя при $\alpha = 0$ напряжённость поля вдвое больше, чем при $\alpha = 90^\circ$; при обоих этих углах она имеет только компоненту E_p , причём при $\alpha = 0$ её направление параллельно p , а при $\alpha = 90^\circ$ — антипараллельно. □

Рассмотрим воздействие внешнего электростатического поля на электрический диполь (рис. 23).

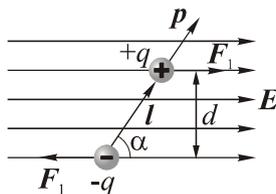


Рис. 23. Диполь в однородном электрическом поле

На электрический диполь во внешнем однородном электростатическом поле E действует вращающий момент M пары равных по модулю кулоновских сил F_1 и F_2 :

$$|M| = Fd = Fl \sin \alpha = qE \sin \alpha, \quad (33)$$

$$ql = p, \quad (34)$$

$$\mathbf{M} = [p \mathbf{E}]. \quad (35)$$



Момент \mathbf{M} вращает диполь до выполнения условия $p \parallel E$ (рис. 24).

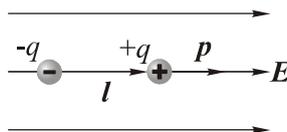


Рис. 24. Ориентация диполя в однородном электрическом поле

Потенциальную энергию диполя в однородном электростатическом поле с точностью до произвольной постоянной можно вычислить, найдя работу поворота диполя в этом поле:

$$E_{\text{п}} = -A = \int M d\alpha = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\alpha} pE \sin \alpha d\alpha = -pE \cos \alpha = -(\mathbf{p} \mathbf{E}). \quad (36)$$

На электрический диполь в неоднородном электростатическом поле (рис. 25) действует момент не равных по модулю кулоновских сил F_1 и F_2 , вращающий диполь до выполнения условия $p \parallel E$, а также равнодействующая двух сил:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_2 - \mathbf{F}_1 = p \frac{d\mathbf{E}}{dx} = p \cdot \text{grad} \mathbf{E}, \quad (37)$$

втягивающая диполь в область более сильного поля (рис. 26).

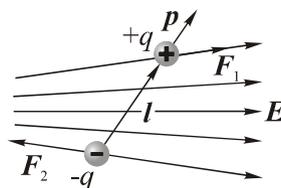


Рис. 25. Диполь в неоднородном электрическом поле

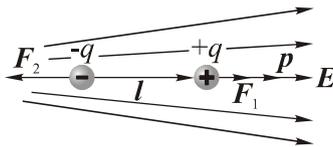


Рис. 26. Ориентация диполя в неоднородном электрическом поле



В неоднородном электростатическом поле на диполь действует сила, стремящаяся переместить диполь в область поля с большей напряжённостью.

Контрольные вопросы

- ? Сформулируйте принцип суперпозиции электрических полей.
- ? Сделав рисунок, объясните сущность принципа суперпозиции электрических полей.
- ? Что такое ось диполя?
- ? Чему равна напряжённость поля точечного заряда, диполя?
- ? Чему равен электрический дипольный момент?

ГЛАВА 3

Теорема Гаусса

3.1. Вектор электрической индукции (электрическое смещение)

В случае, когда в электрически изолированной системе известно расположение неподвижных точечных зарядов, их электростатическое поле в данной точке пространства можно определить, воспользовавшись *принципом суперпозиции электростатических полей* (см. разд. 2.4), т. е. произвести геометрическое сложение векторов напряжённостей полей каждого точечного заряда. Такое суммирование для большого (бесконечного) числа неподвижных точечных зарядов требует довольно сложных построений и вычислений.

При переходе через границу разных сред *напряжённость электрического поля E* вследствие её зависимости от ϵ (см. разд. 2.4) изменяется скачком.

Ещё сложнее будет выглядеть картина линий поля в случае, когда связанные заряды распределены непрерывно.

Следовательно, скачкообразное изменение вектора напряжённости электрического поля и числа линий напряжённости на границах разных сред создаёт ряд неудобств при расчёте электрических полей.

Поэтому при решении задач электростатики оказывается полезной иная по сравнению с использованной нами ранее (но, разумеется, эквивалентная по сути) математическая форма записи *закона Кулона* (см. разд. 1.4). Прежде чем переходить к её рассмотрению, необходимо кратко познакомиться с некоторыми новыми математическими идеями, которые полезны не только в электростатике, но и в других разделах физики, использующих описание объектов, непрерывно изменяющихся в пространстве.

В случае, когда в каждой точке пространства определён некоторый вектор, принято говорить о **векторном поле**. К понятию векторного поля приводит целый ряд физических явлений и процессов (например, векторы скоростей частиц движущейся жидкости в каждый момент времени образуют векторное поле).

Введём понятие **вектора электрического смещения**¹ (**вектора электрической индукции**) D . Подчеркнём, что пока мы сделаем это достаточно формально — физический смысл вектора электрической индукции станет очевиден позднее, когда мы будем изучать электростатическое поле в диэлектриках. Пусть для вакуума вектор D равен произведению *вектора напряжённости электрического поля на абсолютную диэлектрическую проницаемость вакуума*:

$$D \equiv \varepsilon_0 E. \quad (38)$$

Если электростатическое поле создаётся одним точечным зарядом, то зависимость величины электрической индукции от расстояния r от заряда равна:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{r^2} \text{ (СИ),} \quad (39)$$

$$D = \frac{q}{r^2} \text{ (гауссова система),}$$

а направление вектора D совпадает с направлением вектора E .

В системе СИ размерности D и E не совпадают. Это обстоятельство является ещё одним существенным недостатком системы единиц СИ, обусловленным введением отличной от единицы и размерной величины ε_0 . Размерность вектора D в системе СИ будет:

$$[D] \equiv [\varepsilon_0] \cdot [E] = \text{Кл} \cdot \text{Кл} \cdot \text{Дж}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{Дж} \cdot \text{м}^{-1} = \text{Кл} \cdot \text{м}^{-2}.$$

В гауссовой системе единиц *абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума* ε_0 есть величина безразмерная и равна 1, следовательно, векторы D и E тождественно равны друг другу² (табл. 11).

¹ Термин имеет историческое происхождение (введён Максвеллом), в современной физической литературе обычно применяется название "вектор электрической индукции".

² Использование единиц СГСЭ или гауссовой системы для электрического смещения обычно подразумевает, что речь идёт о нерационализованном смещении, обозначаемом как $D^{(ir)} = 4\pi D$.

Таблица 11. Соотношения между единицами электрической индукции

Единица	Кл·м ⁻²	Фр·см ⁻²	СГСМ
1 Кл·м ⁻²	1	$3,77 \cdot 10^6$	$1,26 \cdot 10^{-4}$
1 Фр·см ⁻²	$2,65 \cdot 10^{-7}$	1	$3,33564 \cdot 10^{-11}$
1 СГСМ	$7,96 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^{10}$	1

Заметим, что для общего случая (вне зависимости от среды и системы):

$$\mathbf{D} \equiv \epsilon_a \mathbf{E}.$$

Для графического изображения распределения электрической индукции в пространстве пользуются **линиями электрической индукции (линиями электрического смещения)**. Электростатическое поле наглядно представляют густотой силовых линий вектора \mathbf{D} :

$$|\mathbf{D}| = \frac{dN_D}{dS}, \quad (40)$$

$$dN_D = D dS.$$

Направление линий электрической индукции в каждой точке пространства совпадает с направлением вектора электрической индукции, а их густота равна величине электрической индукции.

Вектор электрической индукции, создаваемый в данной точке поля системой электрических зарядов, равен геометрической сумме векторов электрической индукции, создаваемых в той же точке каждым из зарядов в отдельности.

Простейший случай — **однородное поле**, в котором $\mathbf{D} = \text{const}$, т. е. вектор электрической индукции повсюду одинаков и по величине, и по направлению. В этом случае все линии электрической индукции прямые и идут параллельно на одинаковом расстоянии друг от друга.

Контрольные вопросы

- ? Определите размерность в системе СИ для вектора электрической индукции \mathbf{D} .
- ? Какое электрическое поле называется однородным?

3.2. Поток вектора индукции

Отселе я вижу потоков рождение.

*А. С. Пушкин*¹

Введём понятие потока вектора электрической индукции (потока индукции) через поверхность.

Вообще **поток вектора через поверхность** — характеристика векторного поля, равная сумме произведений площадей элементарных участков, на которые разбита поверхность, на нормальные составляющие вектора к этим участкам.

Используя интегральное исчисление это в общем виде можно сформулировать так: $\Phi_A = \int_S A dS$, где A — вектор, чей поток через поверхность S мы

определяем. Или в скалярном виде: $\Phi_A = \int A \cos \alpha dS = \int A_n dS$. Если векторное поле однородно, то $\Phi_A = AS \cos \alpha$. Получим этот результат для потока вектора электрической индукции. Для этого рассмотрим в электростатическом поле плоскую поверхность (площадку произвольной формы) S , перпендикулярную линиям вектора электрической индукции \mathbf{D} . Будем считать, что поле однородно.

Поток Φ_D вектора электрической индукции (поток вектора электрического смещения, поток электрического смещения, поток индукции) через площадку произвольной формы, перпендикулярную линиям вектора \mathbf{D} , площадью S есть скаляр, равный произведению $|\mathbf{D}|$ на S (табл. 12):

$$\Phi_D = DS. \quad (41)$$

Рассмотрим теперь плоскую поверхность площадью S , расположенную под некоторым углом α к линиям вектора \mathbf{D} , и выберем направление нормали \mathbf{n} к ней (рис. 27). Будем считать, что поле однородно.

В этом случае, через поверхность площадью S и её проекцию S_n проходит одинаковое число линий электрической индукции, равное:

$$\Phi_D = DS_n = DS \cos \alpha = D \cos \alpha \cdot S = D_n S, \quad (42)$$

¹ Александр Сергеевич Пушкин (1799—1837 гг.) — русский писатель и поэт.

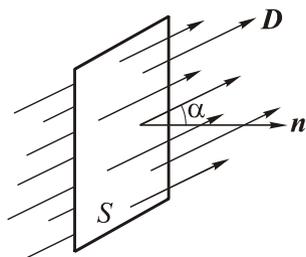


Рис. 27. К потоку вектора индукции D электростатического поля через поверхность S

где $D_n = D \cos \alpha$ — проекция вектора электрической индукции на направление нормали n к площадке (угол α между направлением вектора электрической индукции и нормалью к площадке может изменяться от 0° до 180°).

В случае неоднородного поля выберем столь малую элементарную поверхность, что её можно считать плоской, а поле, пересекающее эту поверхность, можно считать однородным (рис. 28). А затем просуммируем эти "микропотоки", т. е. фактически проинтегрируем по поверхности (рис. 29).

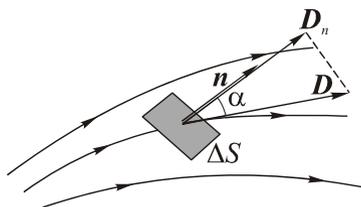


Рис. 28. Поток вектора электрической индукции D электростатического поля через элементарную поверхность ΔS

Поток вектора электрической индукции есть скалярная величина, которая в зависимости от величины угла α может быть как положительной, так и отрицательной.

Если направление линий электрической индукции составляет острый угол с направлением нормали ($\cos \alpha > 0$), то поток будет положительным. Если этот угол тупой ($\cos \alpha < 0$), то поток будет отрицательным.

В качестве произвольной поверхности можно рассмотреть и замкнутую сферическую поверхность S_0 (рис. 30).

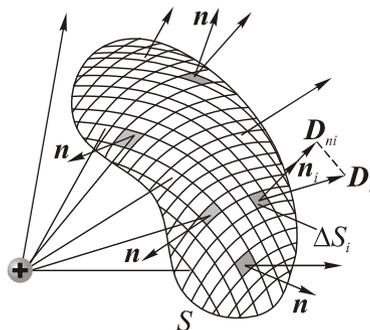


Рис. 29. Поток вектора электрической индукции D электростатического поля через произвольную поверхность S

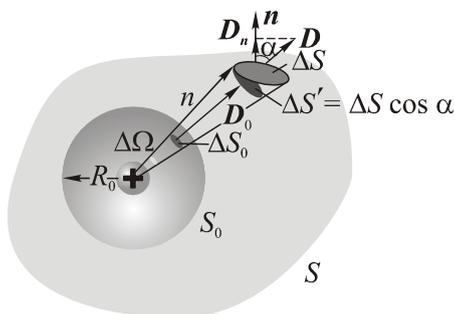


Рис. 30. Поток вектора электрической индукции D электростатического поля через замкнутую поверхность

Так как густота линий электрической индукции $\frac{d\Phi_D}{dS}$ равна D , то поток вектора электрической индукции Φ_D через данную поверхность S_0 равен полному числу линий электрической индукции, проходящих через эту поверхность:

$$\Phi_D = \int D_n dS = N_D. \quad (43)$$

Полный поток электрической индукции через поверхность площадью S в любом неоднородном электростатическом поле равен:

$$\Phi_D = \int D \cos \alpha dS = \int D_n dS. \quad (44)$$



Для произвольной поверхности S поток вектора электрической индукции Φ_D , создаваемый системой электрических зарядов, равен алгебраической сумме потоков электрической индукции, создаваемых каждым зарядом в отдельности.

Аналогичные рассуждения применимы и для потока вектора напряжённости электростатического поля.

Полное число N_E силовых линий, характеризующих напряжённость электростатического поля и проходящих через поверхность S , называют **поток** Φ_E **вектора напряжённости E электростатического поля**

$$\Phi_E \equiv N_E = E \cos \alpha \Delta S = E_n \Delta S. \quad (45)$$

Для произвольной поверхности:

$$\Phi_E = \int_S E_n dS. \quad (46)$$

Контрольные вопросы

? Определите размерность в системе СИ для потока вектора электрической индукции Φ_D .

3.3. Теорема Гаусса

Для расчёта электростатических полей часто оказывается полезной теорема Остроградского—Гаусса. Она была сформулирована русским математиком и механиком Михаилом Васильевичем Остроградским (1801—1861/62 гг.) в 1828 г. (опубликована в 1831 г.) и английским математиком Джорджем Грином (Green, 1793—1841 гг.) (опубликована в 1845 г.) в виде некоторой общей математической теоремы, и Гауссом в 1830 г. для чисто электростатических полей.

В гауссовой системе вектора напряжённости E и электрической индукции D совпадают, совпадают и их потоки. Определим, чему равен поток Φ_E вектора напряжённости электростатического поля точечного заряда $+q$ через замкнутую поверхность площадью S , ограничивающую этот заряд (рис. 31).

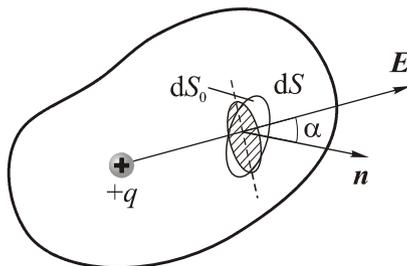


Рис. 31. К теореме Гаусса

Пусть нормаль \mathbf{n} к элементу поверхности dS составляет с направлением вектора \mathbf{E} угол α (рис. 31). Тогда элементарный поток вектора \mathbf{E} через площадку dS будет равняться:

$$d\Phi_E = E_n dS = E \cos \alpha dS = E dS_0, \quad (47)$$

где dS_0 — проекция dS на плоскость, перпендикулярную \mathbf{E} .

В соответствии с *законом Кулона*:

$$E = k \frac{q}{r^2}, \quad (48)$$

где k — коэффициент пропорциональности ($k \equiv \frac{1}{\epsilon}$). Тогда:

$$d\Phi_E = kq \frac{dS_0}{r^2} = kq d\omega, \quad (49)$$

где $d\omega$ — телесный угол, под которым из места расположения заряда q видна площадка dS (телесные углы измеряются в стерadians¹).

Полный поток Φ_E вектора напряжённости электростатического поля точечного заряда q через замкнутую поверхность S , внутри которой он находится, равняется:

$$\Phi_E = kq \int_0^{4\pi} d\omega = kq 4\pi. \quad (50)$$

¹ **Стерadian** равняется телесному углу с вершиной в центре сферы радиусом r , вырезающему на поверхности сферы, описанной вокруг вершины угла, площадку, площадь которой равна квадрату радиуса сферы.



Поток вектора напряжённости электростатического поля Φ_E точечно-го заряда через замкнутую поверхность, ограничивающую этот заряд, прямо пропорционален величине этого заряда.

Напряжённость электростатического поля электрической системы из i ($i=1,2,3,\dots,N$) неподвижных точечных зарядов в соответствии с *принципом суперпозиции электростатических полей* (см. разд. 1.2) равняется:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \sum_i^N \mathbf{E}_i, \\ E_n &= \sum_i^N E_{ni}. \end{aligned} \quad (51)$$

В этом случае поток Φ_E вектора напряжённости \mathbf{E} через поверхность S , ограничивающую эту систему зарядов, будет равняться:

$$\begin{aligned} \Phi_E &= \oint_S E_n dS = \sum_i \oint_S E_{ni} dS = \sum_i \oint_S E_i dS_0 = \\ &= \sum_i \oint_S k \frac{q_i}{r_i^2} dS_0 = k \sum_i q_i \int_0^{4\pi} d\omega = k 4\pi \sum_i q_i, \end{aligned} \quad (52)$$

где \oint_S — интеграл по замкнутой поверхности S .



Поток вектора напряжённости электростатического поля Φ_E системы зарядов через произвольную поверхность, ограничивающую эту систему, прямо пропорционален величине зарядов, расположенных в объёме системы.

Обратим внимание на то, что при выводе теоремы Остроградского—Гаусса для электростатического поля мы исходили из *закона Кулона*, следовательно она является следствием этого закона.

Возможен иной подход к этой теореме с помощью качественного рассмотрения потока вектора электрической индукции \mathbf{D} .

Рассмотрим положительный точечный заряд q и вычислим поток электрической индукции Φ_D через замкнутую сферическую поверхность S , окружающую этот заряд, с центром в точке нахождения заряда (рис. 32).

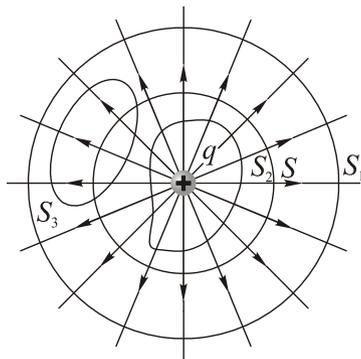


Рис. 32. К теореме Гаусса

За положительное направление нормали выберем направление внешней нормали. В этом случае электрическая индукция \mathbf{D} во всех точках сферы одинакова и, кроме того, везде $\cos \alpha = 1$. Поэтому в системе СИ:

$$\Phi_D = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{R^2} 4\pi R^2 = q. \quad (53)$$

Этот результат справедлив не только для сферической поверхности, но и для любой замкнутой поверхности, и для любого произвольного расположения заряда внутри этой поверхности.



Поток вектора электрической индукции через сферическую поверхность не зависит от радиуса сферы и одинаков для сферы площадью S и любой концентрической с ней сферы площадью S_1 (рис. 32).

Линии электрической индукции в пространстве между сферами S и S_1 , где не имеется зарядов, непрерывны.

Полное число линий, проходящих через произвольную поверхность S_2 , охватывающую заряд, т. е. поток электрической индукции Φ_D , имеет такое же значение, как и для сфер S_1 и S , т. е.:

$$\Phi_D = \oint D_n dS = q. \quad (54)$$

Напротив, если замкнутая поверхность не охватывает заряд (S_3 на рис. 32), то поток электрической индукции Φ_D через такую поверхность равен нулю,

так как число линий электрической индукции, входящих через поверхность, равно числу выходящих из неё.



Поток вектора электрической индукции через замкнутую поверхность не зависит от расположения заряда внутри поверхности. Это значит, что полученный результат справедлив не только для одного заряда, но и для какого угодно числа произвольно расположенных зарядов, если только подразумевать под q алгебраическую сумму всех зарядов, находящихся в объёме, ограниченном замкнутой поверхностью.

❖ **Теорема Гаусса:**

Поток Φ_D вектора электрической индукции через любую замкнутую поверхность пропорционален полному свободному заряду, заключённому внутри объёма, охватываемого замкнутой поверхностью.

В системе СИ:

$$\Phi_D = \oint_S D_n dS = \sum_i q_i . \quad (55)$$

В гауссовой системе математическая запись теоремы Гаусса принимает вид:

$$\Phi_D = \oint_S D_n dS = 4\pi \sum_i q_i . \quad (56)$$

Из (54) видно, что *поток вектора электрической индукции* Φ_D имеет размерность *электрического заряда*, и в системе единиц СИ измеряется в кулонах (Кл) (табл. 12).

Таблица 12. Соотношения между единицами потока электрической индукции

Единица	Кл	Гауссова (СГСЭ)	СГСМ
1 Кл	1	$3,77 \cdot 10^{10}$	1,26
1 СГС (СГСЭ)	$2,65 \cdot 10^{-11}$	1	$3,34 \cdot 10^{-11}$
1 СГСМ	0,796	$3 \cdot 10^{10}$	1

Таблица 13. Аналогии между механическими и электрическими физическими величинами

Механика	Электростатика
$\Phi_{\Gamma} = \int_S \mathbf{\Gamma} dS$ — поток вектора напряжённости поля тяготения через поверхность конечных размеров	$\Phi_D = \int_S \mathbf{D} dS$ — поток вектора электрической индукции, СИ — Кл, гауссова — Фр·см ⁻²
$\oint_S \mathbf{\Gamma} dS = -4\pi G \sum_i m_i$ — теорема Остроградского—Гаусса для гравитационного поля	$\oint_S \mathbf{D} dS = k4\pi \sum_i q_i$ — теорема Остроградского—Гаусса для электростатического поля

Контрольные вопросы

? Сформулируйте и докажите теорему Гаусса.

3.4. Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости. Скачок нормальной составляющей вектора E на заряженной поверхности

Хороший пример — наилучшая проповедь.

Английская пословица

Пусть имеется безграничная плоскость, равномерно заряженная с *поверхностной плотностью заряда* σ . Поскольку в этом случае силовые линии направлены перпендикулярно плоскости, то в качестве замкнутой поверхности в *теореме Гаусса* можно выбрать цилиндрическую поверхность, перпендикулярную к заряженной плоскости и ограниченную двумя плоскими основаниями, перпендикулярными к силовым линиям и расположенными по обеим сторонам заряженной плоскости (рис. 33).

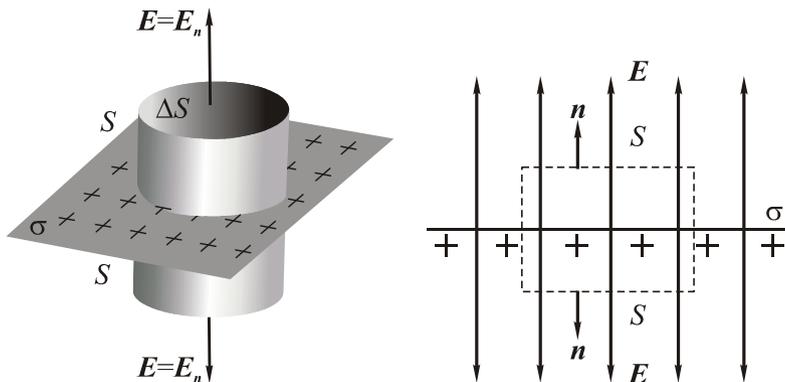


Рис. 33. Электрическое поле равномерно заряженной плоскости

Так как образующие цилиндра параллельны силовым линиям индукции ($\cos \alpha = 0$), то поток вектора электрической индукции через боковую поверхность цилиндра равен нулю, и поэтому полный поток через поверхность цилиндра равен сумме потоков через основания цилиндра:

$$\Phi_D = 2DS. \quad (57)$$

Полный заряд, заключённый внутри цилиндра, равен σS . Поэтому, применяя теорему Гаусса:

$$2DS = \sigma S, \quad (58)$$

откуда электрическая индукция D :

$$D = \frac{1}{2} \sigma. \quad (59)$$

Напряжённость E поля равномерно заряженной плоскости в вакууме:

$$E = \frac{1}{2\epsilon_0} \sigma. \quad (60)$$



Напряжённость электростатического поля равномерно заряженной бесконечной плоскости прямо пропорциональна поверхностной плотности заряда и не зависит от расстояния до точки, в которой измеряют поле.

Рассмотрим теперь произвольную заряженную поверхность площадью S . Выделим на поверхности элементарную площадку dS . Выберем направление нормали \mathbf{n} к этой поверхности. Пусть поверхностная плотность заряда на выделенном участке поверхности равняется σ . Выделенная элементарная площадка dS мала и её можно считать плоской и равномерно заряженной, т. е. мы пришли к только что решённому примеру. Заряд выделенной элементарной площадки равняется:

$$q = \sigma dS . \quad (61)$$

Поток вектора напряжённости электростатического поля через поверхность построенного на основании dS цилиндра с образующими, параллельными нормали \mathbf{n} , по *теореме Гаусса* равняется:

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = k_0 4\pi q . \quad (62)$$

Обозначим через E_1 и E_2 векторы напряжённости электростатического поля через нижнее и верхнее основания цилиндра соответственно. Проекция этих векторов на нормаль \mathbf{n} численно равняются:

$$\begin{aligned} E_1 &= -E_{n1} , \\ E_2 &= +E_{n2} . \end{aligned} \quad (63)$$

Поток вектора \mathbf{E} через нижнее основание dS равен:

$$d\Phi_{E1} = -E_{n1} dS , \quad (64)$$

а через верхнее:

$$d\Phi_{E2} = +E_{n2} dS . \quad (65)$$

Обозначим поток вектора \mathbf{E} через боковую поверхность цилиндра как $d\Phi'$. Тогда полный поток Φ_E через поверхность построенного цилиндра будет равняться:

$$\Phi_E = [E_{n2} + (-E_{n1})] dS + d\Phi' . \quad (66)$$

При уменьшении высоты цилиндра до 0 поток $d\Phi'$ через боковую поверхность бесконечно тонкого цилиндра уменьшается до 0. Тогда полный поток вектора напряжённости электростатического поля через поверхность бесконечно тонкого цилиндра с основанием dS будет равен:

$$\Phi_E = (E_{n2} - E_{n1}) dS = k_0 4\pi \sigma dS . \quad (67)$$

Следовательно:

$$E_{n2} - E_{n1} = k_0 4\pi\sigma. \quad (68)$$



Нормальные составляющие вектора напряжённости \mathbf{E} в двух смежных точках электростатического поля, разделённых заряженной поверхностью с плотностью заряда σ , отличаются друг от друга на $k_0 4\pi\sigma$.

Нормальная составляющая вектора напряжённости \mathbf{E} испытывает скачок на величину $k_0 4\pi\sigma$ при прохождении через любую заряженную поверхность вне зависимости от формы этой поверхности и не зависит от наличия или отсутствия других зарядов вне этой поверхности.

Контрольные вопросы

- ? Напишите формулу для расчёта напряжённости поля бесконечной заряженной плоскости.

3.5. Поле между двумя параллельными бесконечными равномерно заряженными плоскостями

Определим с помощью теоремы Гаусса электростатическое поле между двумя разноимённо равномерно заряженными параллельными бесконечными плоскостями. Вообще систему из двух разноимённо заряженных тел называют **электрическим конденсатором**, а простейший конденсатор, состоящий из двух плоских параллельных пластин одинаковой площади (**обкладок**), называют **плоским конденсатором**. Более подробно электрические свойства конденсатора мы изучим позднее.

При появлении на какой-либо пластине конденсатора (рис. 34) заряда с *поверхностной плотностью* $+\sigma$ на второй пластине всегда возникает заряд с плотностью $-\sigma$.

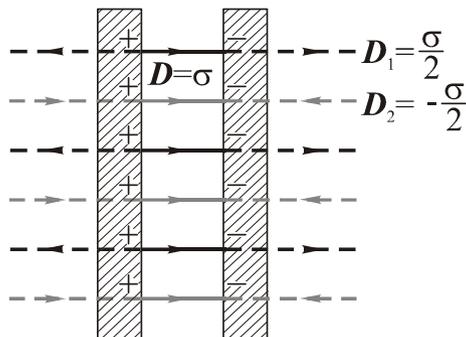


Рис. 34. Электрическое поле внутри плоского конденсатора есть сумма полей, создаваемых заряженными плоскостями его обкладок

Заряженная плоскость каждой пластины создаёт по обе стороны от себя поле с электрической индукцией, равной $\pm \frac{1}{2}\sigma$. Между пластинами электростатические поля направлены одинаково и, складываясь, дают электрическую индукцию $D = \sigma$. При этом напряжённость электростатического поля между двумя параллельными бесконечными равномерно заряженными плоскостями в системе СИ: $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$.



Напряжённость электростатического поля между двумя бесконечными параллельными плоскостями, равномерно заряженными разноимёнными зарядами, равняется удвоенной напряжённости электростатического поля, создаваемого одной заряженной плоскостью, однородна и не зависит от расстояния между плоскостями.

Контрольные вопросы

- ? Напишите формулу для расчёта напряжённости поля плоского конденсатора.

3.6. Поле шарового конденсатора

Рассмотрим электростатическое поле между двумя разноимённо заряженными сферическими концентрическими поверхностями (рис. 35). Систему таких сфер можно называть шаровым конденсатором.

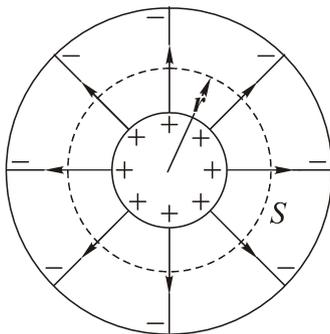


Рис. 35. Электрическое поле шарового конденсатора

Если сообщить внутренней сфере заряд $+q$ и заземлить внешнюю сферу, то на внешней сфере возникает индуцированный заряд $-q$. Под действием взаимного притяжения эти заряды расположатся только на поверхности внутренней сферы и на внутренней поверхности внешней сферы.

В качестве замкнутой поверхности удобно выбрать сферу радиуса r , расположенную между внешней и внутренней заряженными поверхностями и имеющую общий центр с обеими поверхностями. Тогда из *теоремы Гаусса*:

$$\Phi_D = D4\pi r^2 = q, \quad (69)$$

откуда:

$$E = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q}{r^2}. \quad (70)$$



Напряжённость электростатического поля между заряженными поверхностями зависит от расстояния r рассматриваемой точки поля от центра внутренней сферы, но не зависит от размеров внешней поверхности (радиус внешней сферы может быть сколь угодно большим).

3.7. Поле равномерно заряженной сферы

Сферу радиуса R зарядим так, чтобы весь её заряд q равномерно распределился на поверхности.

На каждой единице площади поверхности сферы будет тогда находиться заряд:

$$\sigma = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{q}{R^2}, \quad (71)$$

где σ — поверхностная плотность электрического заряда.

Так как заряд расположен совершенно симметрично, то и создаваемое им электрическое поле также должно обладать сферической симметрией.

Следовательно, линии вектора \mathbf{D} должны быть направлены по нормальям, проведённым к поверхности сферы, а численное значение \mathbf{D} может зависеть только от расстояния r до центра сферы.

$$\begin{aligned} E_{\text{внутри сферы}} &= D_{\text{внутри сферы}} = 0, \\ E_{\text{вне сферы}} &= \frac{1}{4\pi} \frac{1}{\epsilon_0} \frac{q}{r^2}. \end{aligned} \quad (72)$$



Электрическая индукция (а следовательно, и напряжённость) электростатического поля во всех точках, расположенных внутри равномерно заряженной сферы равняется нулю.

Напряжённость электростатического поля, создаваемого равномерно заряженной сферой в окружающем её пространстве (на расстоянии r , много большем радиуса сферы R), эквивалентна напряжённости электростатического поля, создаваемого таким же зарядом, расположенным в центре сферы.

Контрольные вопросы

? Напишите формулу для расчёта напряжённости заряженной сферы.

3.8. Поле равномерно заряженного цилиндра

Построим цилиндрическую поверхность площадью S , проходящую через точку A и имеющую радиус r ($r > R$) и длину l (рис. 36).

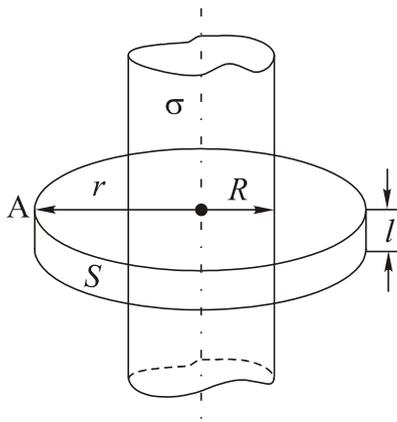


Рис. 36. Электрическое поле равномерно заряженного цилиндра

Так как поток через основания цилиндра равен 0 ($\cos \alpha = 0$), а боковая поверхность перпендикулярна к силовым линиям ($\cos \alpha = 1$), по *теореме Гаусса* поток вектора Φ_E напряжённости электростатического поля от равномерно заряженной цилиндрической поверхности через дополнительно построенную виртуальную цилиндрическую поверхность S равняется:

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = E_A 2\pi r l = k_0 4\pi q, \quad (73)$$

где:

$$q = \sigma 2\pi R l. \quad (74)$$

Следовательно, напряжённость поля в точке, отстоящей на расстоянии r от оси цилиндра, равна:

$$E_A = k_0 \frac{4\pi q}{2\pi r l} = k_0 \frac{2q}{r l} = k_0 \frac{4\pi \sigma R l}{r l} = k_0 \frac{4\pi R \sigma}{r}. \quad (75)$$



Напряжённость электростатического поля равномерно заряженной бесконечной цилиндрической поверхности прямо пропорциональна поверхностной плотности заряда и обратно пропорциональна расстоянию от оси цилиндрической поверхности до точки, в которой измеряют поле.

3.9. Поле шарового слоя

Пусть шаровой слой с $\epsilon > 1$ заряжен объёмной плотностью заряда ρ (рис. 37). Требуется определить электростатическое поле в точках 1, 2 и 3.

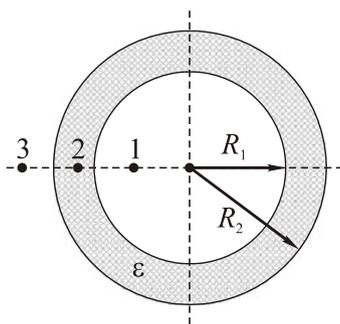


Рис. 37. К полю шарового слоя

Через точку наблюдения проведём замкнутую поверхность, повторяющую симметрию заряженного тела.

Изобразим векторы \mathbf{E} и \mathbf{n} в любой точке этой поверхности (рис. 38).

Рассчитаем поток вектора \mathbf{E} и заряд q в объёме, ограниченном поверхностью.

Полученные выражения подставим в *теорему Гаусса* и выведем формулы, по которым рассчитывается напряжённость для каждого из трёх случаев (рис. 39):

$$0 < r_1 < R_1: \quad \sum q = 0 \Rightarrow E_1 = 0, \quad (76)$$

$$R_1 < r_2 < R_2: \quad E_2 \cdot 4\pi r_2^2 = \frac{4\pi\rho}{3\epsilon_a} (r_2^3 - R_1^3) \Rightarrow E_2 = \frac{\rho}{3\epsilon_a} \left(r_2 - \frac{R_1^3}{r_2^2} \right), \quad (77)$$

$$R_2 < r_3 < \infty: \quad E_3 \cdot 4\pi r_3^2 = \frac{4\pi\rho}{3\epsilon_a} (R_2^3 - R_1^3) \Rightarrow E_3 = \frac{\rho}{3\epsilon_a} \left(\frac{R_2^3 - R_1^3}{r_3^2} \right). \quad (78)$$

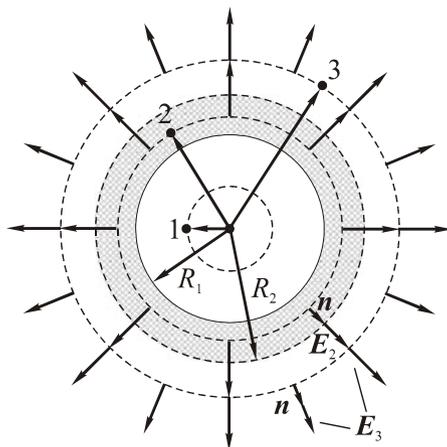


Рис. 38. К полю шарового слоя

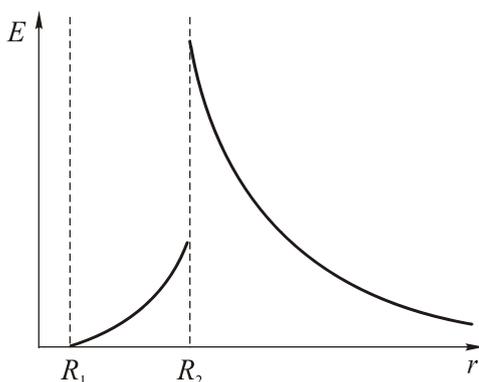


Рис. 39. Зависимость напряжённости электростатического поля равномерно заряженного шарового слоя от расстояния

3.10. Дифференциальная форма записи уравнений электростатики, уравнение Пуассона

Теорема Гаусса позволяет сравнительно просто рассчитывать электрические поля при симметричных распределениях зарядов.

В более общем случае целесообразно, применяя теорему Гаусса к любому макроскопически малому объёму, перейти от интегральных соотношений к эквивалентным им дифференциальным. Эти дифференциальные уравнения в частных производных рассматриваются и решаются в теоретической электродинамике.

Пусть электрический заряд непрерывно распределён по некоторому объёму. В этом случае *теорему Гаусса* можно применить к физически бесконечно малому объёму δV , имеющему форму прямоугольного параллелепипеда. Обозначим грани параллелепипеда через 1, 2, 3, 4, 5 и 6 (рис. 40).

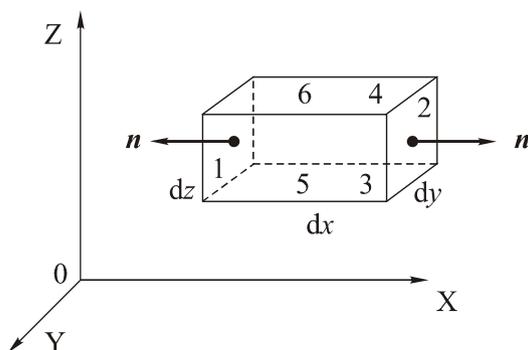


Рис. 40. Физически бесконечно малый объём δV , имеющий форму прямоугольного параллелепипеда

На грани 1 внешняя нормаль \mathbf{n} направлена в отрицательную сторону оси OX . Поэтому поток вектора \mathbf{E} через эту грань будет равняться:

$$\Phi_E = -E_X(x) dydz. \quad (79)$$

На противоположной грани 2, наоборот, направление нормали \mathbf{n} совпадает с положительным направлением оси OX и поток вектора \mathbf{E} через эту грань равняется:

$$\Phi_E = +E_X(x+dx) dydz. \quad (80)$$

Сумма обоих потоков равняется:

$$\left[E_X(x+dx) - E_X(x) \right] dydz = \frac{\partial E_X}{\partial x} dx dydz = \frac{\partial E_X}{\partial x} \delta V, \quad (81)$$

где $\delta V = dx dydz$.

Аналогичным образом вычислим потоки вектора \mathbf{E} через пары граней 3—4 и 5—6.

Полный поток $d\Phi_E$ через всю поверхность параллелепипеда равняется:

$$d\Phi_E = \left(\frac{\partial E_X}{\partial x} + \frac{\partial E_Y}{\partial y} + \frac{\partial E_Z}{\partial z} \right) \delta V. \quad (82)$$

В соответствии с *теоремой Гаусса* поток вектора \mathbf{E} через замкнутую поверхность S равняется:

$$d\Phi_E = \oint_S E_n dS = \rho(\mathbf{r}) \delta V, \quad (83)$$

$$\frac{d\Phi_E}{dV} = \frac{\oint_S E_n dS}{dV} = \rho. \quad (84)$$

Предел отношения поверхностного интеграла $\oint_S E_n dS$ к объёму δV при $\delta V \rightarrow 0$ характеризует вектор \mathbf{E} в окрестностях точки:

$$\lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\oint_S E_n dS}{dV} = \left(\frac{\partial E_X}{\partial x} + \frac{\partial E_Y}{\partial y} + \frac{\partial E_Z}{\partial z} \right) = \rho. \quad (85)$$



Подстановка в формулу (83) явных выражений для объёма и площадей граней параллелепипеда (86) приводит к выражению (87), содержащему слагаемые, превращающиеся в частные производные при стремлении к нулю размеров выделенного объёма.

$$\oint_{\Gamma_2} (\mathbf{E}, d\mathbf{S}) = \sum_{\xi=X,Y,Z} \left(E_\xi(r_\xi + \delta r_\xi) - E_\xi(r_\xi) \right) \delta S_\xi. \quad (86)$$

$$\sum_{\xi} \frac{E_\xi(r_\xi + \delta r_\xi) - E_\xi(r_\xi)}{\delta r_\xi} = \rho(\mathbf{r}). \quad (87)$$

$$\sum_{\xi} \frac{\partial E_\xi}{\partial r_\xi} = \rho(\mathbf{r}), \quad (88)$$

$$\frac{\partial E_X}{\partial x} + \frac{\partial E_Y}{\partial y} + \frac{\partial E_Z}{\partial z} = \rho.$$

Полученное таким образом соотношение (88) является дифференциальным аналогом теоремы Гаусса (**уравнение Пуассона**¹).

Для его компактной записи в математике вводится специальная операция, называемая дивергенцией или расхождением вектора ($\operatorname{div}\mathbf{F}$).

Дивергенция² (**расхождение**) — одна из основных операций векторного анализа, сопоставляющая векторному полю $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ скалярное поле $\operatorname{div}\mathbf{F}$. Если точка \mathbf{r} задана своими декартовыми координатами, $\mathbf{r} = \{x, y, z\}$, и вектор \mathbf{F} — своими компонентами, $\mathbf{F} = \{F_X, F_Y, F_Z\}$, то:

$$\operatorname{div}\mathbf{F} \equiv \frac{\partial F_X}{\partial x} + \frac{\partial F_Y}{\partial y} + \frac{\partial F_Z}{\partial z}. \quad (89)$$

В этом случае уравнение Пуассона для вектора напряжённости электростатического поля в СИ записывают в виде:

$$\operatorname{div}\mathbf{E} = \rho. \quad (90)$$

Теорема Гаусса в дифференциальной форме имеет физический смысл лишь в том случае, когда заряд в электрической системе распределён с конечной *объёмной плотностью* ρ .



Дивергенция вектора напряжённости электростатического поля является локальной характеристикой поля, так как связывает различные физические характеристики системы зарядов ($\operatorname{div}\mathbf{E}$ и ρ) в одной и той же точке пространства.

Дивергенция вектора \mathbf{E} является скалярной функцией координат и может изменяться от точки к точке в электростатическом поле.

Зная дивергенцию вектора \mathbf{E} в каждой точке пространства, можно вычислить поток этого вектора через любую замкнутую поверхность конечных размеров. Произведение $\operatorname{div}\mathbf{E}dV$ указывает на интенсивность источника электростатического поля, заключённого в объёме dV . Объёмный интеграл от таких произведений даёт представление об интенсивности электростати-

¹ Впервые изучено французским математиком, механиком и физиком Симеоном Дени Пуассоном (Poisson, 1781—1840 гг.).

² От ср.-век. лат. *divergo* — отклоняюсь, отхожу.

ческого поля, заключённого в объёме V , по которому выполняется интегрирование, т. е. и о потоке вектора напряжённости электростатического поля через поверхность, ограничивающую этот объём:

$$\oint_S E_n dS = \int_V \operatorname{div} \mathbf{E} dV. \quad (91)$$

Уравнение (91), связывающее поверхностную и объёмную характеристики электростатического поля системы неподвижных зарядов, называют **формулой Гаусса—Остроградского**.

В системе уравнений Максвелла теорема Гаусса для вектора электрической индукции называется **четвёртым уравнением Максвелла**¹:

$$\oint_S D_n dS = \int_V \rho dV = q \text{ (СИ)}. \quad (92)$$

Введём **оператор набла** (∇). В прямоугольных декартовых координатах линейный оператор набла ∇ определяется формулой:

$$\nabla \equiv \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{e}_X + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{e}_Y + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{e}_Z. \quad (93)$$

Его применение к скалярным и векторным функциям точки формально соответствует некоммутативной операции умножения на вектор с декартовыми координатами $\frac{\partial}{\partial x}$, $\frac{\partial}{\partial y}$, $\frac{\partial}{\partial z}$:

$$\nabla \Phi(x, y, z) \equiv \operatorname{grad} \Phi(x, y, z) = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \mathbf{e}_X + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \mathbf{e}_Y + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \mathbf{e}_Z, \quad (94)$$

$$(\nabla \cdot \mathbf{F}(x, y, z)) \equiv \nabla \cdot \mathbf{F}(x, y, z) \equiv \operatorname{div} \mathbf{F}(x, y, z) = \frac{\partial F_X}{\partial x} + \frac{\partial F_Y}{\partial y} + \frac{\partial F_Z}{\partial z}. \quad (95)$$

Таким образом, дивергенция вектора напряжённости есть скалярное произведение *дифференциального оператора набла* на вектор \mathbf{E} (96):

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \rho(\mathbf{r}) \Leftrightarrow (\nabla \cdot \mathbf{E}) = \rho(\mathbf{r}). \quad (96)$$

¹ В традиционной нумерации, идущей от немецкого физика Генриха Рудольфа Герца (Hertz, 1857—1894 гг.) и английского физика Оливера Хевисайда (Heaviside, 1850—1925 гг.).

Дифференциальные соотношения для электростатического поля можно рассматривать как следствие интегральных уравнений электростатики. Возможен и обратный переход. Так, например, из формулы (88) непосредственно следует выражение (86) для потока через поверхность бесконечно малого гауссова объёма. Если конечный объём разбить на такие элементарные ячейки, применить к каждой из них это соотношение и учесть, что противоположные потоки через их общие стенки взаимно уничтожаются, в результате суммирования получится интегральная теорема Гаусса¹.

¹ В курсе математики это утверждение доказывается значительно строже.

ГЛАВА 4

Потенциал электростатического поля

4.1. Потенциал электростатического поля; работа сил электростатического поля при перемещении заряда

На точечный электрический заряд q' , находящийся в электрическом поле E , действует сила $F = kq'E$. При перемещении заряда в поле эта сила совершает работу.

Элементарная работа δA , совершаемая силами *электростатического поля* при перемещении заряда q_2 в поле другого заряда q_1 на отрезок dr (рис. 41), равняется:

$$\delta A = F_{12} dr = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} dr . \quad (97)$$

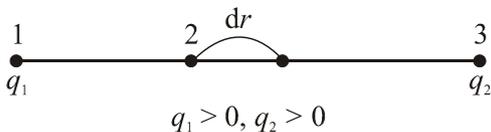


Рис. 41. К перемещению заряда
силами электростатического поля

Следовательно, полная работа по перемещению заряда q_2 в поле заряда q_1 на участке 2—3 будет равняться:

$$A_{23} = \int_2^3 \delta A = kq_1q_2 \int_2^3 \frac{1}{r^2} dr = -kq_1q_2 \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_2} \right) = kq_1q_2 \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} \right). \quad (98)$$



Работа сил электростатического поля по перемещению точечного заряда, находящегося в поле другого неподвижного заряда, не зависит от формы пути, а определяется начальным и конечным положением заряда. Силовое поле, обладающее этой особенностью, называют **потенциальным**.

В потенциальном поле работа сил поля по перемещению заряда по замкнутому пути:

$$A = \oint_l \delta A = kq_1q_2 \oint_l \frac{1}{r^2} dr = 0. \quad (99)$$



Равенство нулю работы сил по перемещению тела (заряда) на произвольном замкнутом пути является необходимым и достаточным условием, определяющим потенциальный характер поля сил.

В электростатическом поле:

$$A = \int_l F_l dl = \int_l qE_l dl. \quad (100)$$

Следовательно, на замкнутом пути:

$$A = \oint_l F_l dl = \oint_l qE_l dl = 0, \quad (101)$$

поскольку:

$$\oint_l E_l dl = 0, \quad (102)$$

где l — контур; E_l — проекция \mathbf{E} на l .

В математике интеграл вида $\oint_l \mathbf{P} d\mathbf{r}$ (где \oint_l — интеграл по замкнутому контуру l) называют **циркуляцией векторного поля $\mathbf{P}(\mathbf{r})$** вдоль замкнутой кривой l . В координатной форме циркуляция равна $\int_l (P_X dx + P_Y dy + P_Z dz)$.

Поэтому линейный интеграл вектора \mathbf{E} вдоль произвольной замкнутой кривой l называют **циркуляцией вектора \mathbf{E}** .

Работа, совершаемая силами силового поля при перемещении заряда вдоль кривой l , равна циркуляции поля вдоль l .



Циркуляция вектора \mathbf{E} электростатического поля по любому замкнутому пути равняется нулю.

Введём операцию, называемую **ротор¹ (вихрь)**, сопоставляющую векторному полю $\mathbf{P}(\mathbf{r})$ другое векторное поле **rot \mathbf{P}** (используется также обозначение **[$\nabla\mathbf{P}$]**, **curl \mathbf{P}** ²).

Если точка \mathbf{r} задана своими декартовыми координатами, $\mathbf{r} = \{x, y, z\}$, и вектор \mathbf{P} — своими компонентами, $\mathbf{P} = \{P_X, P_Y, P_Z\}$, то:

$$\begin{aligned} \text{rot}\mathbf{P}(x, y, z) &= \\ &= \left(\frac{\partial P_Z}{\partial y} - \frac{\partial P_Y}{\partial z} \right) \mathbf{e}_X + \left(\frac{\partial P_X}{\partial z} - \frac{\partial P_Z}{\partial x} \right) \mathbf{e}_Y + \left(\frac{\partial P_Y}{\partial x} - \frac{\partial P_X}{\partial y} \right) \mathbf{e}_Z = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_X & \mathbf{e}_Y & \mathbf{e}_Z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ P_X & P_Y & P_Z \end{vmatrix} = \quad (103) \\ &= [\nabla\mathbf{P}(x, y, z)] \equiv \nabla \times \mathbf{P}(x, y, z). \end{aligned}$$

Если **rot $\mathbf{P} = 0$** , то векторное поле \mathbf{P} называется **безвихревым** или **потенциальным**.

Циркуляция вектора \mathbf{E} характеризует свойства поля вектора \mathbf{E} , усреднённые по макроскопической поверхности S , охваченной контуром l . Чтобы получить характеристику свойств поля \mathbf{E} в точке, необходимо уменьшать размеры контура, стягивая его в окрестность выбранной точки. При этом бу-

¹ От лат. *roto* — вращаю или английского и французского *rotation* — вращение.

² От англ. *curl* — вихрь.

дет уменьшаться и циркуляция из-за уменьшения длины контура l , и площадь S , охватываемая контуром. Отношение циркуляции к площади S будет стремиться к пределу, который и используется в качестве локальной характеристики электростатического поля в точке:

$$\lim_{S \rightarrow 0} \frac{\oint \mathbf{E} d\mathbf{l}}{S} = \mathbf{rot} \mathbf{E}, \quad (104)$$

где \mathbf{rot} — ротор.

Так как в электростатическом поле циркуляция вектора \mathbf{E} равняется нулю в любой точке поля, то локальной его характеристикой является соотношение:

$$\mathbf{rot} \mathbf{E} = 0. \quad (105)$$

Это уравнение является достаточным условием для того, чтобы электростатическое поле вектора \mathbf{E} можно было назвать потенциальным.

Как известно, центральные поля являются потенциальными, т. е. работа по перемещению тел между двумя заданными точками в таких полях не зависит от выбора траектории перемещения, а определяется только начальным и конечным положениями.

Величина работы по перемещению заряда в электростатическом поле зависит лишь от его начального и конечного положений и не зависит от пути движения (рис. 42).

Это позволяет наряду с *вектором напряжённости* (см. разд. 2.2) *электростатического поля* ввести для него скалярную характеристику — **электрический потенциал**, или **потенциал электрического поля в точке**, или просто **потенциал точки** φ :

$$\varphi \equiv \frac{A}{q'}, \quad (106)$$

зависящий от положения пробного заряда, но уже не зависящий от численной величины заряда. Потенциал φ электростатического поля характеризует свойства поля в данной его точке.



Потенциал электрического поля численно равен работе, совершаемой электростатическим полем при перемещении положительного единичного пробного заряда по любому пути из данной точки в ту точку пространства, где его значение принято равным нулю (**начальная точка**).

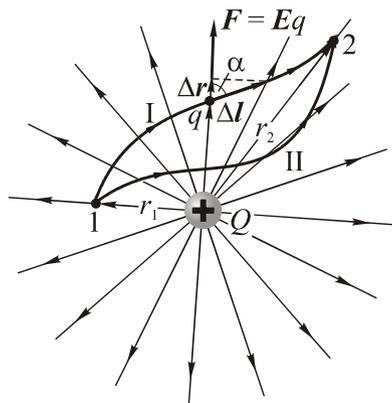


Рис. 42. Независимость величины работы по перемещению заряда в электростатическом поле от траектории движения заряда

Такое определение, очевидно, не является однозначным. При изменении положения начальной точки значение потенциала изменяется на константу, равную работе по перемещению единичного заряда из исходной нулевой точки в новую. Такая неоднозначность не сказывается на результатах расчёта поля.

Указанная неоднозначность может быть устранена, если договориться выбирать в качестве начальной бесконечно удалённую точку. Формальным препятствием к такому выбору может оказаться расходимость интеграла для потенциала (106) на бесконечном пределе. Однако можно показать, что поле любого ограниченного в пространстве распределения зарядов (все реально встречающиеся в природе распределения обладают этим свойством) на больших расстояниях убывает не медленнее, чем обратный квадрат расстояния, что заведомо обеспечивает сходимость интеграла (106).



Потенциальная энергия заряда q' в точке электростатического поля численно равна работе, которую надо затратить, чтобы удалить q' из данной точки поля в бесконечность.

Известно, что работа консервативных сил в потенциальном поле по перемещению материального тела совершается за счёт убыли потенциальной энергии этого тела:

$$\delta A = -dE_{\text{п}} = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}). \quad (107)$$

Введём следующую функцию расстояния r между зарядами:

$$W \equiv \frac{kqq'}{r} + C, \quad (108)$$

где C — произвольная постоянная. Тогда работа электростатических сил по перемещению заряда на макроскопическом пути равняется:

$$A_{1,2} = W_1 - W_2. \quad (109)$$

Сопоставляя это соотношение с аналогичными соотношениями в механике, видно, что функция W должна рассматриваться как потенциальная энергия взаимодействия неподвижных точечных зарядов q и q' , находящихся на расстоянии r друг от друга.



Потенциальная энергия точечного заряда q' , находящегося в электростатическом поле точечного неподвижного заряда q , зависит от величин взаимодействующих зарядов и от расстояния между ними.

Здесь, как и в механике, потенциальная энергия определяется не однозначно, а с точностью до произвольной постоянной C . Это связано с тем, что физический смысл имеет лишь разность потенциальных энергий в двух точках пространства, выражающая работу, производимую при переходе из одной точки в другую. При нахождении же этой разности произвольная постоянная исключается.

Расчёт потенциала в некоторой точке, создаваемый конечным распределением элементарных зарядов, легко осуществим в силу *принципа суперпозиции* (см. разд. 2.4). Потенциал произвольного распределения зарядов может быть рассчитан как сумма потенциалов, создаваемых каждым из элементарных зарядов.

Для вычисления "элементарного потенциала" достаточно рассчитать работу по перемещению точечного заряда из заданной начальной точки на бесконечность. Произвольную траекторию удобно разбить на бесконечно малые отрезки при помощи концентрических сфер с центром в точке нахождения заряда. На каждом из таких отрезков элементарная работа оказывается такой же, как и в случае перемещения заряда между сферами вдоль их общего радиуса.

В результате искомая работа оказывается равной работе по перемещению точечного заряда из исходной точки на бесконечность вдоль прямой, соединяющей эту точку с зарядом — источником поля.

Таблица 14. Аналогии между механическими и электрическими физическими величинами

Механика	Электростатика
$U \equiv \frac{E_{\text{п}}}{m}$ — потенциал гравитационного поля	$\varphi \equiv \frac{A}{q}$ — потенциал электростатического поля в точке

Контрольные вопросы

- ? Что понимают под работой электрического поля?
- ? Какие поля называют потенциальными?
- ? Докажите, что электростатическое поле является потенциальным.
- ? Как связано изменение потенциальной энергии с работой?
- ? Чему равна потенциальная энергия заряженной частицы в однородном электрическом поле?
- ? От чего зависит работа по перемещению заряда из одной точки поля в другую?
- ? Чему равна работа по перемещению заряда по замкнутому контуру?
- ? Напишите формулу работы по перемещению заряда в электрическом поле.
- ? Что называется потенциалом электростатического поля? Какая формула выражает смысл этого понятия?

4.2. Разность потенциалов, абсолютный электромметр

Пусть в электростатическом поле из точки 1 в точку 2 перемещается положительный заряд $+q$. Работа, совершаемая силами поля при таком перемещении, не зависит от формы пути. Так как величина заряда определена ($+q$), то эта работа зависит только от сил существующего поля и поэтому может служить его характеристикой. Её называют **разностью потенциалов** точек 1 и 2

в данном электростатическом поле. Разность потенциалов двух точек 1 и 2 в электростатическом поле определяется работой, совершаемой силами поля при перемещении заряда $+q$ из точки 1 в точку 2.

Если известна напряжённость электростатического поля в каждой точке, то можно вычислить и разность потенциалов любых двух точек. Пусть dl — элемент перемещения заряда, E_l — проекция вектора напряжённости поля на направление dl , тогда работа при перемещении заряда $+q$ на отрезок dl есть $qE_l dl$. Поэтому разность потенциалов точек 1 и 2 равна:

$$\Delta\varphi_{12} = \int_l qE_l dl, \quad (110)$$

где интегрирование производится вдоль любого контура l , соединяющего рассматриваемые точки, по направлению от точки 1 к точке 2.

Потенциальную энергию заряда q_2 в электростатическом поле заряда q_1 вычисляют через потенциал поля:

$$E_{pi} = q_2\varphi_i. \quad (111)$$

Разность потенциальных энергий заряда q_2 в точках 1 и 2 электростатического поля заряда q_1 равняется:

$$E_{п1} - E_{п2} = q_2(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (112)$$

Следовательно, величина работы A_{12} , выполненной силами поля по перемещению заряда q_2 из точки 1 в точку 2, равняется:

$$A_{12} = q_2(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (113)$$

Из этого соотношения следует физический смысл разности потенциалов электростатического поля:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{A_{12}}{q_2}. \quad (114)$$



Физический смысл имеет только разность потенциалов между двумя точками поля, так как работа определена только тогда, когда заданы две точки — начало и конец пути.

Разность потенциалов между двумя точками электростатического поля численно равняется работе сил поля по перемещению единичного положительного заряда между этими точками, взятой с отрицательным знаком.

Потенциал точки электростатического поля равен работе, совершаемой силами поля при удалении положительного единичного заряда из этой точки в бесконечность.

Иногда вместо термина "разность потенциалов" мы будем использовать термин "электрическое напряжение" (или просто "напряжение"), обозначая его U . Строго говоря, разность потенциалов и *напряжение* — не одно и то же, но более строгое определение для напряжения мы дадим позже, когда введём понятие *электродвижущей силы*.

Единица разности потенциалов в системе СИ — **вольт** (В, V).

Единица вольт названа в честь Вольты. Единица разности потенциалов вольт был впервые принят на I Международном конгрессе электриков в Париже как практическая единица ЭДС, равная 10^8 единицам СГС системы единиц. С 1893 г. до 1948 г. применялся международный вольт ($1 \text{ В}_{\text{межд}} = 1,00034 \text{ В}$). Точная величина международного вольта устанавливалась эталоном — группой *нормальных элементов Вестона*. С 1948 г. в связи с переходом на абсолютные практические электрические единицы вольт стал производной единицей, что сохранено и в системе единиц СИ: 1 В — электрическое *напряжение*, вызывающее в электрической цепи постоянный ток силой 1 ампер при мощности 1 ватт.

Единица СГСЭ и СГС разности потенциалов равна примерно 300 В (точнее $10^{-8} c_0$ вольт, где c_0 — скорость света в вакууме, выраженная в см·с⁻¹) (табл. 15).

Таблица 15. Соотношения между единицами электрического потенциала¹

Единица	В	эрг·Фр ⁻¹	СГСМ
1 В	1	$3,34 \cdot 10^{-3}$	10^8
1 эрг·Фр ⁻¹	299,792458	1	$3 \cdot 10^{10}$
1 СГСМ	10^{-8}	$3,34 \cdot 10^{-11}$	1

¹ В тех же единицах выражают разность электрических потенциалов, электрическое напряжение, электродвижущую силу.

Если выражать разность потенциалов в вольтах, а заряд в кулонах, то работа получится в джоулях. Отсюда ясно, что энергию можно выражать не в механических единицах, а в электрических. Для этого служит единица энергии, называемая электронвольт (эВ, eV).

Электронвольт — внесистемная единица энергии, равная энергии, которую приобретает частица с зарядом, равным заряду электрона, пробегая в вакууме напряжение 1 В.

$$1 \text{ эВ} \approx 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Дж (СИ)} = 1,60218 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} \\ (\text{СГС, СГСЭ, СГСМ, гауссова}).$$

На практике применяются кратные единицы: килоэлектронвольт (кэВ, keV), равный 10^3 эВ, мегаэлектронвольт (МэВ, MeV), равный 10^6 эВ (часто в электронвольтах выражают массу элементарных частиц, что основано на релятивистском уравнении Эйнштейна $E = mc^2$, связывающем массу частицы m с её полной энергией E , c — скорость света. Энергия, соответствующая одной атомной единице массы, равна $(931,5016 \pm 0,0026)$ МэВ).

В 1753 г. в работе "Рассуждения об указателе электричества и о пользовании им при исследовании явлений искусственного и естественного электричества" Рихман писал: "*...Восемь лет назад я приступил... к исследованию электрических явлений. Совершенный электрометр, т. е. инструмент для определения электрической силы, вне всякого сомнения, может сильно способствовать развитию электрической теории. Вот почему с самого начала я сразу же стал размышлять об удобном способе определять интенсивность электрической силы. Впрочем, мне до сих пор не посчастливилось сделать совершенный электрометр, — не знаю как другим*". "Совершенные" электрометры были созданы лишь во второй половине XIX в.

Для измерений разности электрических потенциалов и малых электрических зарядов применяется **электрометр**.

На рис. 43 показана упрощённая схема **абсолютного электрометра** (или **электромера**) (не показаны охранные кольца вокруг пластин 1 и 2, имеющие такие же потенциалы и предназначенные для того, чтобы поле было возможно более однородным).

Измеряемая разность потенциалов прикладывается между пластинами 1 и 2, причём верхняя пластина прикреплена к одному из плеч коромысла весов. Чашка, прикреплённая ко второму плечу, нагружается до тех пор, пока не установится равновесие. В результате измеряется сила взаимодействия между пластинами, а по ней определяется приложенная разность потенциалов.

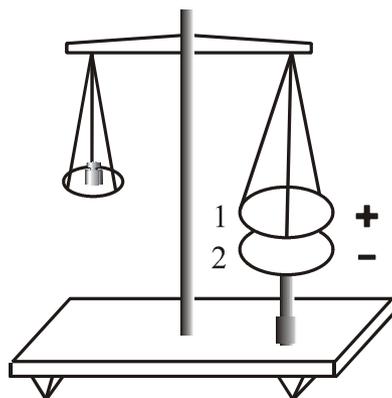


Рис. 43. Принцип действия абсолютного электromетра

Для системы точечных неподвижных зарядов, расположенных в конечной области пространства (потенциал в бесконечности равен нулю), потенциал электростатического поля в соответствии с принципом суперпозиции полей равняется сумме потенциалов, создаваемых в рассматриваемой точке каждым из зарядов. Следовательно, для потенциала, создаваемого системой точечных неподвижных зарядов, можно записать следующее соотношение:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_a} \sum_i \frac{q_i}{r_i} \text{ (СИ)}, \quad (115)$$

$$\varphi = \frac{1}{\epsilon_a} \sum_i \frac{q_i}{r_i} \text{ (гауссова система)},$$

где $r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}$ — расстояние от точечного неподвижного заряда q_i , находящегося в точке (x_i, y_i, z_i) до точки (x, y, z) , в которой вычисляется потенциал.

Для системы поверхностных зарядов полный заряд поверхности может быть представлен суммой зарядов бесконечно малых заряженных поверхностей с плотностью зарядов σ . Тогда потенциал электростатического поля такой заряженной поверхности в данной точке поля можно вычислить по формуле:

$$\varphi = k \int_S \frac{\sigma dS}{r}, \quad (116)$$

где r — расстояние между элементом поверхности dS и точкой, в которой вычисляется потенциал.

В электростатическом поле объёмного заряда роль элементарных зарядов играют заряды бесконечно малых объёмов dV с *объёмной плотностью зарядов* ρ : $dq = \rho dV$. Потенциал электростатического поля системы объёмных зарядов в данной точке поля вычисляют по формуле:

$$\varphi = k \int_V \frac{\rho dV}{r}, \quad (117)$$

где dV — элемент объёма; r — расстояние от объёма до точки поля, в которой вычисляется потенциал.

Контрольные вопросы

- ? Что называют разностью потенциалов между двумя точками поля? Какая формула выражает смысл этого понятия?
- ? Опишите устройство и принцип действия абсолютного электрометра.
- ? Каково назначение охранного кольца, которым окружена верхняя пластина конденсатора абсолютного электрометра?
- ? В каких единицах измеряется разность потенциалов в системах СГСЭ и СИ?

Интернет-ресурсы

- <http://www.allmeasures.com/table.asp?electric=on&Submit=Conversion+Table>

4.3. Связь потенциала с напряжённостью электростатического поля

Расчёт потенциала ещё не означает решения **основной задачи электростатики** — определения поля по заданному распределению зарядов. Необходимо научиться восстанавливать вектор \mathbf{E} по данному распределению потенциала в пространстве.

Если известно распределение потенциала электростатического поля, т. е. значение потенциала в каждой точке поля, то можно найти и напряжённость этого поля в каждой точке.

Рассмотрим в однородном электростатическом поле две точки 1 и 2 и предположим, что заряд $+q$ переходит из точки 1 в точку 2 вдоль прямолинейного отрезка Δr . Работу электрических сил ΔA при этом перемещении можно выразить, во-первых, через напряжённость поля:

$$\Delta A = qE_r \Delta r, \quad (118)$$

где E_r — проекция вектора напряжённости \mathbf{E} на направление Δr .

Но ту же работу можно выразить через разность потенциалов $\Delta\phi_{12}$ точек 1 и 2:

$$\Delta A = q\Delta\phi_{12}. \quad (119)$$

Введём изменение потенциала при перемещении Δr , т. е. разность потенциалов $\Delta\phi_{12}$ точки 2 (конец пути) и точки 1 (начало пути), и будем обозначать его просто $\Delta\phi$. Тогда:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{21} = -\Delta\phi_{12}. \quad (120)$$

В общем случае неоднородного поля обе точки 1 и 2 должны быть выбраны бесконечно близко, чтобы можно было считать напряжённость поля на отрезке Δr постоянной. Переходя к пределу при $\Delta r \rightarrow 0$, получаем:

$$E_r = -\frac{d\phi}{dr}. \quad (121)$$

Геометрическое место точек электростатического поля, имеющих одинаковый потенциал, называют **эквипотенциальной поверхностью**. *Линии вектора напряжённости электростатического поля* всегда перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям (рис. 44).

Так как элементарная работа сил электростатического поля по перемещению заряда q на расстояние dr равняется:

$$\delta A = F_r dr = qE_r dr \quad (122)$$

и сопровождается уменьшением его потенциальной энергии:

$$\delta A = -dE_{\text{п}} = -d(q\phi) = -q \frac{\partial\phi}{\partial r} dr, \quad (123)$$

то:

$$qE_r dr = -q \frac{\partial\phi}{\partial r} dr; \quad (124)$$

$$E_r = -\frac{\partial\phi}{\partial r}.$$

Напряжённость электростатического поля является векторной величиной:

$$\mathbf{E} = E_X e_X + E_Y e_Y + E_Z e_Z, \quad (125)$$

где $E_X = -\frac{\partial\phi}{\partial x}$, $E_Y = -\frac{\partial\phi}{\partial y}$, $E_Z = -\frac{\partial\phi}{\partial z}$.

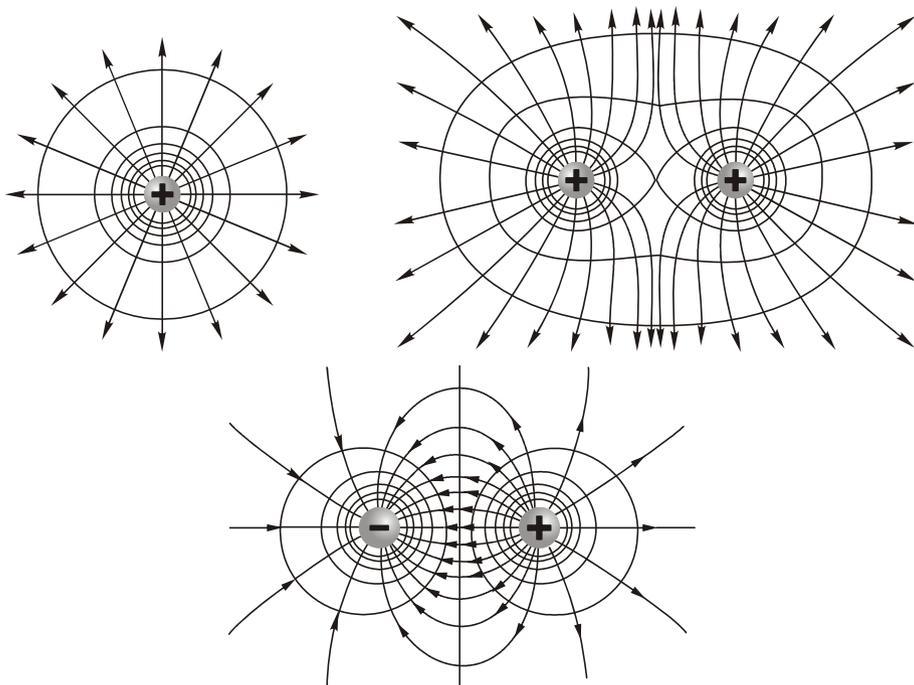


Рис. 44. Примеры эквипотенциальных поверхностей

Градиентом любой скалярной величины называют вектор, направление которого совпадает с направлением быстрого увеличения данной величины. Обозначение: **grad**.

Частные производные $\frac{\partial\phi}{\partial x}$, $\frac{\partial\phi}{\partial y}$ и $\frac{\partial\phi}{\partial z}$ представляют собой проекции градиента потенциала электростатического поля на координатные оси OX , OY и OZ . Следовательно:

$$\mathbf{E} = -\left(\frac{\partial\phi}{\partial x} e_X + \frac{\partial\phi}{\partial y} e_Y + \frac{\partial\phi}{\partial z} e_Z\right) = -\mathbf{grad}\phi. \quad (126)$$

Производная, стоящая в правой части равенства, выражает изменение потенциала в данном направлении.



Проекция вектора напряжённости на данное направление равняется изменению потенциала в этом направлении с обратным знаком.

Вектор напряжённости электростатического поля \mathbf{E} равен градиенту потенциала этого поля, взятому с отрицательным знаком.

Градиент потенциала является векторной величиной.

Используем краткую и удобную "символическую" запись подобных выражений при помощи *оператора набла*:

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi. \quad (127)$$

Из (127) следует независимость результата вычисления электростатического поля от значения аддитивной постоянной с точностью, до которой определяется потенциал. Действительно, добавление такой постоянной к потенциалу никак не скажется на значении вектора напряжённости поля, так как любая производная от постоянной тождественно равна нулю.



Зная распределение потенциала электростатического поля всегда можно определить и проекцию напряжённости поля на любое направление, а значит, и проекции E_X , E_Y , E_Z на координатные оси.

Если поле однородно (например, между обкладками *плоского конденсатора*, а $\Delta\varphi$ — *напряжение* между пластинами, d — расстояние между ними), то:

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{d}. \quad (128)$$

Это соотношение используют для определения единицы напряжённости электростатического поля.

Единица напряжённости электростатического поля в системе СИ есть напряжённость такого поля, в котором *напряжение* на 1 м длины силовой линии равно 1 В: вольт на метр ($\text{В}\cdot\text{м}^{-1}$).

Таблица 16. Аналогии между механическими и электрическими физическими величинами

Механика	Электростатика
$\mathbf{G} = -\text{grad}U$ — связь напряжённости гравитационного поля с гравитационным потенциалом	$\mathbf{E} = -\text{grad}\phi$ — связь напряжённости электростатического поля с электрическим потенциалом

Контрольные вопросы

- ? Какими параметрами характеризуется электростатическое поле?
- ? Какие поверхности называют эквипотенциальными?
- ? Какова связь между потенциалом и напряжённостью электростатического поля?
- ? Какая связь существует между параметрами электростатического поля в общем случае и в случае однородного поля?
- ? Какой из параметров электростатического поля предпочтительнее измерять экспериментально, а какой рассчитывать теоретически, и почему?
- ? Приведите единицы измерения напряжённости и потенциала в системах СИ и СГСЭ.
- ? Как влияет на электростатическое поле внесение в него металлических и диэлектрических тел?

4.4. Потенциалы электростатических полей, создаваемых простейшими заряженными телами

Ворчаньем наскучишь,
примером научишь.

Из народной мудрости

Определим потенциал в электростатическом поле, создаваемом в изотропном пространстве одним положительным точечным зарядом величиной q . Выде-

лим в этом поле некоторую точку, удалённую на расстояние r от заряда, и найдём потенциал в этой точке относительно бесконечности. Поскольку разность потенциалов не зависит от формы пути, то пусть заряд $+q$ перемещается из точки r в бесконечность по радиусу, т. е. вдоль силовой линии. Тогда из (110):

$$U = \int qE dr = q \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{1}{r^2} \int \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q}{r} \quad (\text{СИ}). \quad (129)$$

4.4.1. Шаровой конденсатор

Пусть имеется заряженный *конденсатор* в виде концентрических сфер с радиусами a (внутренняя сфера) и b (внешняя сфера). Напряжённость поля E между такими сферами определяется формулой $E = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q}{r^2}$ и изменяется в пространстве так же, как и для точечного заряда. Поэтому разность потенциалов между внутренней сферой и какой-либо точкой внутри конденсатора, удалённой на расстоянии r от центра конденсатора:

$$U = \int qE dr = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q}{r^2} \int \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q}{r} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r} \right) \quad (\text{СИ}). \quad (130)$$

Заряд q можно выразить через разность потенциалов U_0 между сферами:

$$U_0 = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q}{r} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) \Rightarrow \quad (131)$$

$$\Rightarrow U = U_0 \frac{\frac{1}{a} - \frac{1}{r}}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b}}. \quad (132)$$

4.4.2. Плоский конденсатор

Определим разность потенциалов между положительно заряженной пластиной и произвольной (расположенной около средней части *конденсатора*) точкой, удалённой от неё на расстояние x .

Напряжённость поля в *плоском конденсаторе*: $E = \frac{1}{\epsilon_0} \sigma$. Поэтому:

$$U = \int E dx = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \int dx = \frac{\sigma}{\epsilon_0} x. \quad (133)$$

Полная разность потенциалов U_0 между заряженными пластинами конденсатора равняется:

$$U_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} d \Rightarrow \quad (134)$$

$$\Rightarrow U = U_0 \frac{x}{d}, \quad (135)$$

где d — расстояние между пластинами конденсатора.

4.4.3. Цилиндрический конденсатор

Определим распределение потенциала между коаксиальными цилиндрами. Разность потенциалов между внутренним цилиндром и произвольной точкой между цилиндрами равна:

$$U = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \lambda \int \frac{dr}{r} = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \lambda \ln \frac{r}{a}, \quad (136)$$

где r — расстояние от рассматриваемой точки до оси цилиндров; a — радиус внутреннего цилиндра; $\lambda = \frac{q}{l}$ — *линейная плотность заряда* внутреннего цилиндра.

Полная разность потенциалов U_0 между цилиндрами равняется $E = \frac{1}{\epsilon_0} \sigma$:

$$U_0 = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \lambda \ln \frac{b}{a} \Rightarrow \quad (137)$$

$$\Rightarrow U = U_0 \frac{\ln \frac{r}{a}}{\ln \frac{b}{a}}, \quad (138)$$

где b — радиус внешнего цилиндра.

ГЛАВА 5

Диэлектрики

5.1. Дипольный момент молекулы

Диэлектрик¹ — вещество, в котором отсутствуют свободные заряды или в котором затруднено перемещение зарядов.

Диэлектрики бывают твёрдые, жидкие и газообразные. Говоря о твёрдых диэлектриках, часто имеют в виду аморфные вещества, т. е. вещества, не имеющие кристаллической структуры (таковы, например, многие пластмассы, стёкла, органические соединения типа воска, янтаря и др.).

Согласно классической физике в диэлектрике все электроны связаны, т. е. принадлежат отдельным атомам, и электрическое поле не отрывает, а лишь слегка смещает их. Фактически следует говорить не об отдельном электро-не, связанном с ядром, а об электронном облаке, окружающем все ядра вещества.

Дипольный момент молекулы μ характеризует электрические свойства молекулы:

$$\mu \equiv \sum_i q_i r_i, \quad (139)$$

где q_i — заряды составляющих молекулу частиц (атомов); r_i — их радиус-векторы относительно произвольно выбранного начала координат.

В этом случае заряды считают точечными, однако, электронный заряд в молекулах распределён непрерывно, поэтому, строго говоря, суммирование нужно заменить интегрированием.

¹ Англ. dielectric — от греч. *diá* — через, сквозь и англ. electric — электрический.

Дипольный момент молекулы μ можно представить иначе: суммарный положительный заряд электронеutralной в целом молекулы и её суммарный отрицательный заряд можно "стянуть" в некоторые точки (их положение определяется аналогично нахождению положения центра масс твёрдого тела), тогда дипольный момент молекулы равен произведению заряда на расстояние между зарядами.

Различают неполярные и полярные диэлектрики.

Контрольные вопросы

- ? Какие вещества называют диэлектриками?
- ? Что такое дипольный момент молекулы?

5.2. Неполярные и полярные молекулы

Максвелл писал: *"Тела, которые препятствуют протеканию сквозь них электрического тока, называются изоляторами. Но хотя сквозь них не течёт электричество, сквозь них распространяются электрические эффекты, причём уровень этих эффектов зависит от природы тела..."*.

Рассматривая распределение зарядов в атомах и молекулах, используют классические представления для описания таких систем, которые в действительности являются квантовомеханическими. Кроме того, в модельных представлениях считают, что атомы и молекулы являются статическими системами, положительно заряженные ядра в которых — это положительные точечные заряды, а электронные структуры — это облака отрицательных зарядов со сферической симметрией.

Если "центры тяжести" положительных и отрицательных зарядов совпадают, то *дипольный момент* μ такой системы равняется нулю. Такие молекулы называют **неполярными**.

📁 Примеры неполярных молекул. Водород H_2 , азот N_2 , кислород O_2 , четырёххлористый углерод CCl_4 , CH_4 , BF_3 , CO_2 . ☐

Неполярные диэлектрики — вещества, молекулы которых в отсутствие внешнего электростатического поля не имеют *электрического дипольного момента*.

Молекулы, обладающие *дипольным моментом* μ в отсутствие внешнего электростатического поля, называют **полярными**. Постоянный дипольный момент μ у них имеет порядок 10^{-29} — 10^{-30} Кл·м, что соответствует диполю, состоящему из двух противоположных зарядов в $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, расположенных на расстоянии 10^{-10} м друг от друга.

📁 Примеры полярных молекул. Окись углерода CO, бромистый водород HBr, хлористый водород HCl, этиловый эфир $(C_2H_5)_2O$ ($3,8 \cdot 10^{-30}$ Кл·м), вода H_2O ($6,2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м), NH_3 . ☐

Полярные диэлектрики — вещества, молекулы которых в отсутствие внешнего электростатического поля обладают определённым *электрическим дипольным моментом* (табл. 17).

Таблица 17. Значения дипольных моментов молекул некоторых веществ

Вещество	Дипольный момент ¹ , 10^{-30} Кл·м	Тип связи ²
Азот N_2	0	pp
Бромистый водород HBr	2,759	sp
Водород H_2	0	s
Йодистый водород HI	1,494	sp
Кислород O_2	0	pp
Окись азота NO	0,530	pp
Окись углерода CO	0,367	pp
Фтористый водород	6,091	sp
Хлор Cl_2	0	pp
Хлорид калия KCl	9,106	ионная, sp
Хлорид натрия NaCl	30,02	ионная, sp
Хлорид рубидия	10,340	ионная, sp
Хлористый водород HCl	3,699	sp

¹ Приведён постоянный электрический дипольный момент основного состояния.

² s, sp и pp являются ковалентными связями.

В отсутствие внешнего *электростатического поля* дипольные моменты полярных молекул ориентированы в пространстве беспорядочно, поэтому сумма дипольных моментов равняется нулю. Во внешнем электростатическом поле происходит ориентация диполей, поэтому вещество приобретает ориентированный (индуцированный, наведённый) электрический дипольный момент.



Создаваемое внешними источниками и поддерживаемое в веществе постоянное электрическое поле приводит к перераспределению электрических зарядов и появлению (или изменению) электрического дипольного момента в любом объёме вещества, т. е. к его *поляризации*.

Контрольные вопросы

? Какие диэлектрики называют полярными, а какие — неполярными?

5.3. Поляризация диэлектриков

Способность диэлектриков поляризоваться — одно из их фундаментальных свойств. Под **поляризацией** здесь имеется в виду процесс, связанный с созданием в диэлектрике под действием электрического поля преимущественного направления индуцированных и собственных *электрических диполей*.

Электрическая поляризация может появиться в результате упорядоченного расположения заряженных частиц противоположных знаков. Наиболее простой случай упорядоченного расположения зарядов — *электрический диполь*. В структуре некоторых диэлектриков такие электрические диполи действительно имеются, и если они ориентированы в одном направлении — кристалл будет **спонтанно поляризованным**.

Связанные заряды спонтанной поляризации при этом создают собственное электростатическое поле вне диэлектрика и могут быть скомпенсированы практически всегда имеющимися в атмосфере свободными зарядами (ионами). Спонтанно поляризованное состояние диэлектрика при этом, конечно, не утрачивается, но оно компенсируется противоположно ориентированным полем свободных зарядов; удалив эти заряды, опять можно обнаружить спонтанную поляризацию.

Известны два типа *кристаллических диэлектриков*, обладающих спонтанной поляризацией: *пироэлектрики* (см. разд. 5.10) и *сегнетоэлектрики* (см. разд. 5.8).

В пирозлектриках электрические диполи всех элементарных ячеек кристалла ориентированы в одном направлении, а в сегнетоэлектриках поляризации подвержены целые области (*домены*) со спонтанной поляризацией.

Поляризуемость атомов, ионов¹ и молекул — способность этих частиц приобретать *электрический дипольный момент* в электрическом поле.

Атомная поляризуемость молекул обусловлена смещением электронной плотности в атомах в электрическом поле.

Поляризация диэлектриков во внешнем электростатическом поле происходит в результате смещения связанных зарядов: электроны и ядра продолжают принадлежать тем же самым атомам и молекулам. Такое смещение зарядов называется **упругим**.

В результате смещения зарядов в диэлектрике возникает индуцированный электрический дипольный момент p' . В относительно слабых электростатических полях зависимость индуцированного электрического дипольного момента p' от внешнего электростатического поля E_0 линейная: $p' = \alpha E_0$, где α имеет размерность объёма, является количественной мерой поляризуемости и также называется **поляризуемостью** (табл. 18). Для некоторых молекул значение α может зависеть от направления E_0 (**анизотропная поляризуемость**). В сильных полях зависимость $p'(E_0)$ перестаёт быть линейной.

Итак, во внешнем электростатическом поле E_0 молекулы неполярного диэлектрика поляризуются, т. е. в них нарушается симметрия взаимного расположения зарядов электронных облаков и ядер (заряды смещаются в противоположные стороны), и появляется индуцированный электрический дипольный момент, модуль которого при небольших электростатических полях E_0 можно считать пропорциональным полю:

$$p' = q'l = \epsilon_0(-\beta)E_0, \quad (140)$$

где ϵ_0 — *диэлектрическая постоянная*; l — *ось диполя*; $-\beta \equiv \frac{p'}{\epsilon_0 E} = \frac{p'}{D}$ —

коэффициент поляризуемости молекул неполярного диэлектрика в электростатическом поле E_0 (табл. 18).

¹ **Ион** — заряженная частица, образовавшаяся из атома или группы атомов в результате присоединения или утраты одного или нескольких электронов. Термин, происходящий от греческого слова "путешественник", впервые по предложению английского учёного Уильяма Уивелла (Whewell, 1794—1866 гг.) ввёл Фарадей.

Таблица 18. Соотношения между поляризуемостью и коэффициентом поляризуемости

Поляризуемость α	Коэффициент поляризуемости β , Ф·м ²
1 СГСЭ (гауссова)	$1,11265 \cdot 10^{-16}$
1 Å ³ (поляризуемый объём)	$1,11265 \cdot 10^{-40}$
1 атомная единица поляризуемости	$1,64878 \cdot 10^{-41}$

Между смещёнными зарядами $+q'$ и $-q'$ индуцированного электрического диполя действует упругая сила $F = -kl$, которая уравнивается силой электростатического поля $F = q'E_0$:

$$\begin{aligned} q'E_0 &= kl \Rightarrow \\ \Rightarrow l &= \frac{q'E_0}{k}. \end{aligned} \quad (141)$$

Следовательно:

$$\begin{aligned} p' = q'l &= q' \frac{q'E_0}{k} = \frac{q'^2}{k} E_0 = \epsilon_0 (-\beta) E_0 \Rightarrow \\ \Rightarrow -\beta &= \frac{q'^2}{\epsilon_0 k}. \end{aligned} \quad (142)$$



Коэффициент поляризуемости β молекул неполярного диэлектрика определяется величиной индуцированных зарядов и внутримолекулярным взаимодействием этих зарядов.

В простейшем случае в диэлектрике поляризуются только атомы: их электроны смещаются относительно положительно заряженных ядер. Этот процесс носит название **поляризации электронного смещения**.

Если диэлектрик образован положительными и отрицательными ионами (например, кристаллы NaCl или CsCl), то помимо электронной поляризации возникает **поляризация ионного смещения**, обусловленная смещением ионов из своих положений (рис. 45).

Ионные кристаллы могут обладать электрическим моментом и в отсутствие внешнего электростатического поля. Но их электрический момент не проявляется из-за зарядов (ионов) атмосферы или же из-за электропроводности кристалла.

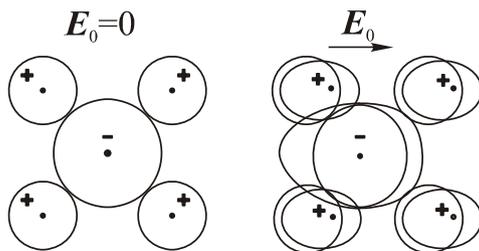


Рис. 45. Схема ионной поляризации в поле E_0

Реальные кристаллы диэлектриков не могут не иметь дефектов строения, примесей и т. п. Это создаёт возможность образования электрической поляризации за счёт некоторых процессов, которые называются **релаксационными** и связаны с определённым постепенным упорядочением примесей и дефектов под действием внешнего поля.

Для ряда диэлектриков (стекла, керамических диэлектриков и др.) **релаксационные виды поляризации** являются даже более существенными, чем поляризация смещения. Они приводят, например, к формированию *электретов* (см. разд. 5.11). Для не очень чистых кристаллов релаксационные виды поляризации также существенны, абсолютная величина таких поляризаций может значительно превышать поляризацию смещения.

Контрольные вопросы

- ? В чём заключается поляризация диэлектриков?
- ? Какие типы поляризации имеют место в диэлектриках?

5.4. Диэлектрические восприимчивость и проницаемость вещества

Векторную сумму дипольных моментов *неполярного диэлектрика*, индуцированных внешним электростатическим полем в единице объёма, называют **вектором поляризации** или **поляризованностью единицы объёма P** :

$$\mathbf{P} = \frac{\sum_i^N \mathbf{p}'_i}{V} = n \langle \mathbf{p}'_i \rangle = \frac{N \langle \mathbf{p}' \rangle}{V} = \frac{N \epsilon_0 (-\beta) \mathbf{E}_0}{V} = \epsilon_0 (-n\beta) \mathbf{E}_0 = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E}_0, \quad (143)$$

где $n = \frac{N}{V}$ — объёмная плотность (концентрация) диполей; $\chi_e = -n\beta$ — диэлектрическая восприимчивость, т. е. поляризуемость молекул в единице объёма неполярного диэлектрика.

Единицей поляризованности в системе СИ является Кл·м⁻².

Диэлектрическая восприимчивость χ_e — величина, характеризующая способность единицы объёма вещества поляризоваться, т. е. изменять свою поляризацию под действием внешнего электрического поля \mathbf{E}_0 :

$$\chi_e \equiv \frac{dP}{dE}. \quad (144)$$

В результате поляризации молекул однородного диэлектрика в его приповерхностном слое появятся нескомпенсированные поверхностные заряды с *поверхностной плотностью* σ' (рис. 46). Эти заряды называют **зарядами смещения** или **связанными зарядами**, так как они не могут свободно перемещаться в диэлектрике на большие расстояния.

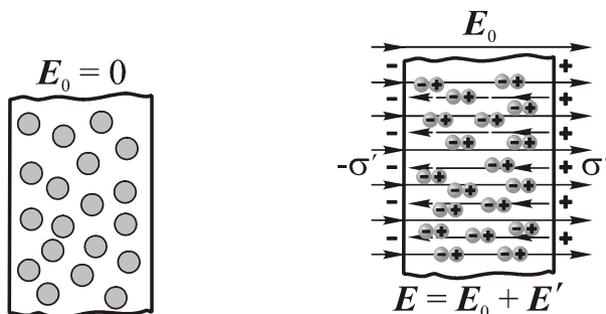


Рис. 46. Поляризация неполярных диэлектриков во внешнем электростатическом поле \mathbf{E}_0

Между вектором поляризации \mathbf{P} неполярного диэлектрика и поверхностной плотностью связанных зарядов σ' существует прямая зависимость. Найдём соотношение между \mathbf{P} и σ' . С этой целью рассмотрим тонкий изотропный

неполярный диэлектрик в виде прямоугольного параллелепипеда (рис. 47), помещённого в электростатическое поле \mathbf{E} . Выделим в этом диэлектрике цилиндрический объём $dV_{\text{ц}}$ с основаниями $dS_{\text{ц}}$ на его боковых гранях и с образующими l , направления которых параллельны направлению вектора напряжённости внешнего поля \mathbf{E} и составляют угол α с внешней нормалью \mathbf{n} к грани параллелепипеда. Величина этого объёма равняется $dV_{\text{ц}} = l \cos \alpha dS_{\text{ц}}$. В результате поляризации диэлектрика на его основаниях появятся индуцированные заряды с поверхностной плотностью σ' .

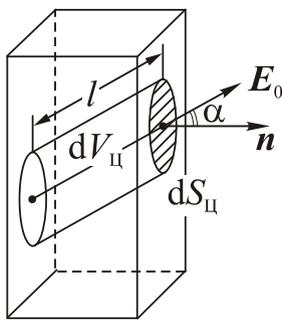


Рис. 47. Тонкий изотропный неполярный диэлектрик в виде прямоугольного параллелепипеда

Электрический дипольный момент выделенного цилиндра $\mathbf{p} = ql = \sigma' S_{\text{ц}} l$.

Для неполярного диэлектрика:

$$\mathbf{P} = \frac{\sum_i \mathbf{p}_i}{dV_{\text{ц}}} = \frac{ql}{dV_{\text{ц}}} = \frac{\sigma' S_{\text{ц}} l}{dV_{\text{ц}}} \Rightarrow \quad (145)$$

$$\Rightarrow P_n = \sigma', \quad (146)$$

где P_n — проекция вектора \mathbf{P} на внешнюю нормаль \mathbf{n} .



Величина нормальной составляющей P_n вектора поляризации неполярного изотропного диэлектрика численно равняется поверхностной плотности σ' поляризованных зарядов.

Учитывая, что векторы \mathbf{P} и \mathbf{E}_0 связаны между собой соотношением:

$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E}_0$, получаем:

$$\sigma' = \epsilon_0 \chi_e E_n. \quad (147)$$



Поверхностная плотность σ' связанных зарядов поляризованного неполярного диэлектрика прямо пропорциональна нормальной составляющей вектора напряжённости электростатического поля и диэлектрической восприимчивости диэлектрика χ_e .

5.5. Поляризация полярных диэлектриков во внешнем электростатическом поле

Поляризация полярных диэлектриков во внешнем электростатическом поле происходит в результате преимущественной ориентации электрических диполей отдельных молекул по направлению вектора \mathbf{E}_0 (рис. 48).

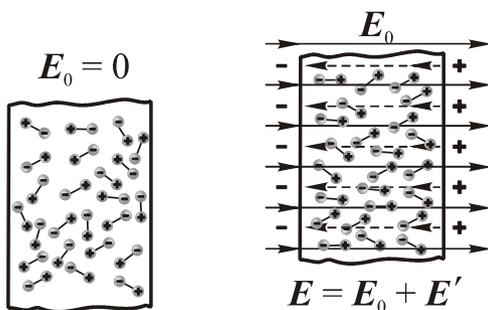


Рис. 48. Ориентационная поляризация полярных диэлектриков во внешнем электростатическом поле в результате преимущественной ориентации электрических диполей отдельных молекул по направлению вектора \mathbf{E}_0

Тепловое движение молекул в диэлектрике и их взаимное столкновение нарушает индуцированную полем \mathbf{E}_0 упорядоченность ориентации диполей.

Интенсивность теплового движения возрастает с повышением температуры T диэлектрика. Из распределения Больцмана следует формула Ланжевена—Дебая¹, выражающая зависимость диэлектрической проницаемости или диэлектрической восприимчивости полярного диэлектрика от дипольного электрического момента составляющих его молекул:

$$\chi_e = \frac{n\mu^2}{3kT\epsilon_a}, \quad (148)$$

где μ — дипольный момент молекулы.



Диэлектрическая восприимчивость χ_e полярных диэлектриков прямо пропорциональна квадрату дипольного момента μ его молекул и обратно пропорциональна его абсолютной температуре T .

В полярных диэлектриках, находящихся в электростатическом поле, их поляризация осуществляется не только за счёт преимущественной ориентации диполей, но и в результате смещения зарядов, связанных с атомами и молекулами. Поэтому диэлектрическую восприимчивость полярного диэлектрика представляют в виде:

$$\chi_e = \frac{n\mu^2}{3kT\epsilon_a} - n\beta. \quad (149)$$

Диэлектрическая восприимчивость связана с диэлектрической проницаемостью ϵ соотношением:

$$\begin{aligned} \epsilon|_{\text{СИ}} &= 1 + \chi_e, \\ \epsilon|_{\text{Гауссова}} &= 1 + 4\pi\chi_e. \end{aligned} \quad (150)$$



Диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков (в отличие от диэлектрической проницаемости неполярных диэлектриков) зависит от температуры. Поэтому по зависимости диэлектрической проницаемости диэлектрика от температуры можно судить о строении диэлектрика.

¹ Получена в 1912 г. Петером Дебаём (Debye, 1884—1966 гг.), который при её выводе пришёл к выражению, совпадающей с введённой в 1905 г. Полем Ланжеvéном (Langevin, 1872—1946 гг.) функцией.

Диэлектрическая восприимчивость обладает теми же свойствами (зависимость от различных параметров среды и внешних условий), что и диэлектрическая проницаемость.

Определим напряжённость электростатического поля внутри однородного изотропного диэлектрика, помещённого между двумя бесконечными параллельными, заряженными разноимёнными зарядами с одинаковой поверхностной плотностью $|\sigma| = |-\sigma|$. Две заряженные бесконечные параллельные плоскости создают в пространстве между плоскостями однородное электростатическое поле с напряжённостью E_0 .

Поместим в это поле однородный изотропный диэлектрик. В результате поляризации на боковых его поверхностях появятся заряды с поверхностной плотностью $|\sigma'|$. Эти заряды создадут внутри диэлектрика электростатическое поле E' , направленное навстречу полю E_0 . Результирующее поле E внутри диэлектрика равно сумме внешнего поля E_0 и индуцированного поля E' (рис. 48):

$$E = E_0 + E' \Rightarrow \quad (151)$$

$$\Rightarrow E_0 = E - E'. \quad (152)$$

Плотность поверхностных зарядов σ' поляризованного диэлектрика численно равняется нормальной составляющей P_n вектора поляризации. Следовательно, в гауссовой системе:

$$E' = k_0 4\pi\sigma' = k_0 4\pi P_n = k_0 4\pi\epsilon_a \chi_e E_0. \quad (153)$$

В системе СИ это соотношение получается более простым:

$$E' = \frac{1}{4\pi\epsilon_a} 4\pi\epsilon_a \chi_e E = \chi_e E_0. \quad (154)$$

Следовательно, внутри диэлектрика электростатическое поле E равняется:

$$E = E_0 + E' = E_0 + \chi_e E_0 = E_0 (1 + \chi_e) \Rightarrow \quad (155)$$

$$\Rightarrow E = E_0 (1 + \chi_e) = E_0 \epsilon, \quad (156)$$

где $\epsilon = 1 + \chi_e$ — диэлектрическая проницаемость вещества.

При внесении диэлектрика в пространство, содержащее свободные заряды, он под действием электростатического поля свободных зарядов поляризуется. Источником общего электростатического поля становятся не только сво-

бодные, но и связанные заряды — заряды смещения в диэлектрике. В этом случае теорема Гаусса для потока вектора напряжённости через замкнутую поверхность, ограничивающую свободные q и связанные q' заряды, примет следующий вид:

$$\oint_S E_n dS = k_0 4\pi (q + q'). \quad (157)$$

Такая запись *теоремы Гаусса* не позволяет решать задачи о величине вектора напряжённости, так как величина q' в свою очередь определяется неизвестной величиной напряжённости.

Допустим, что замкнутая поверхность S охватывает часть диэлектрика, находящегося в электростатическом поле E свободных зарядов q (рис. 49). Под действием поля E диэлектрик поляризуется: положительные заряды сместятся по направлению вектора E , а отрицательные — в противоположном направлении.

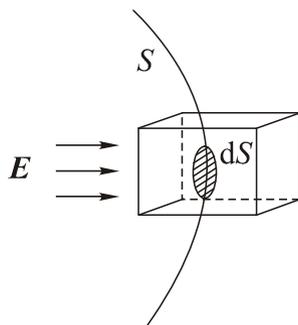


Рис. 49. Диэлектрик в электростатическом поле

Через элемент dS замкнутой поверхности при смещении зарядов пройдёт положительный заряд:

$$dq'_+ = \rho_+ l_+ dS, \quad (158)$$

где ρ_+ — *объёмная плотность* положительного заряда.

Одновременно в противоположном направлении произойдёт смещение равного по величине отрицательного заряда:

$$dq'_- = \rho_- l_- dS, \quad (159)$$

где ρ_- — *объёмная плотность* отрицательного заряда.

Суммарный заряд, прошедший при смещении через элемент поверхности dS , равняется:

$$dq' = \rho_+ l_+ dS + \rho_- l_- dS = \rho'(l_+ + l_-) dS = \rho l dS = P_n dS, \quad (160)$$

где $l = (l_+ + l_-)$ — длина диполя; $P_n = \rho l$ — величина нормальной составляющей вектора поляризации диэлектрика.

Полный заряд, прошедший через поверхность S при поляризации диэлектрика, равняется:

$$q' = \int_S dq'. \quad (161)$$

Внутри диэлектрика, ограниченного поверхностью S , заряд q' имеет отрицательный знак. Следовательно:

$$\oint_S P_n dS = -q'. \quad (162)$$

Заменим в записанной выше теореме Гаусса заряд q' на $-\oint_S P_n dS$:

$$\oint_S E_n dS = k_0 4\pi \left(q - \oint_S P_n dS \right), \quad (163)$$

$$\oint_S E_n dS + k_0 4\pi \oint_S P_n dS = k_0 4\pi q, \quad (164)$$

$$\oint_S (E_n + k_0 4\pi P_n) dS = k_0 4\pi q. \quad (165)$$

Запишем это уравнение в системе СИ:

$$\oint_S \left(E_n + \frac{1}{4\pi\epsilon_a} 4\pi P_n \right) dS = \oint_S \left(E_n + \frac{1}{\epsilon_a} P_n \right) dS = \frac{1}{4\pi\epsilon_a} 4\pi q, \quad (166)$$

$$\oint_S (\epsilon_a E_n + P_n) dS = q. \quad (167)$$

Контрольные вопросы

- ? Опишите поведение диполя во внешнем электрическом поле.
- ? Нарисовав рисунок, объясните сущность явления поляризации диэлектриков.

5.6. Электростатическое поле на границе двух диэлектриков

На границе двух диэлектриков, отличающихся значениями диэлектрических проницаемостей ($\epsilon_1 \neq \epsilon_2$), во внешнем электростатическом поле E_0 появляются индуцированные поля связанные заряды с поверхностными плотностями σ'_1 и σ'_2 (рис. 50).

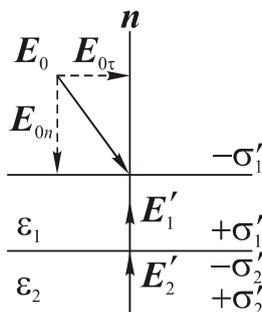


Рис. 50. К электростатическому полю на границе двух диэлектриков

Электростатические поля E'_1 и E'_2 , создаваемые этими связанными зарядами, направлены нормально к границе раздела диэлектриков. Напряжённости E'_1 и E'_2 изменяют только величины нормальных составляющих внешнего поля E , но не изменяют его тангенциальных составляющих:

$$\begin{aligned} E_{1n} &= E_{0n} - E'_1, \\ E_{2n} &= E_{0n} - E'_2, \end{aligned} \quad (168)$$

$$E_{0n} = E_{1n} + E'_1 = E_{1n} (1 + \chi_{e1}), \quad (169)$$

$$E_{0n} = E_{2n} + E'_2 = E_{2n} (1 + \chi_{e2}), \quad (170)$$

$$E_{0n} = \epsilon_1 E_{1n}, \quad (171)$$

$$E_{0n} = \epsilon_2 E_{2n}, \quad (172)$$

$$\epsilon_1 E_{1n} = \epsilon_2 E_{2n}. \quad (173)$$



Нормальные составляющие E_n вектора напряжённости электростатического поля различны (терпят разрыв) на границе раздела диэлектриков.

$$\begin{aligned} E_{1\tau} &= E_{0\tau}, \\ E_{2\tau} &= E_{0\tau} \Rightarrow \\ \Rightarrow E_{1\tau} &= E_{2\tau}. \end{aligned} \quad (174)$$



Тангенциальные составляющие E_τ вектора напряжённости электростатического поля на границе раздела диэлектриков равны (непрерывны).

Так как $E_{1n} = \frac{D_{1n}}{\epsilon_0 \epsilon_1}$ и $E_{2n} = \frac{D_{2n}}{\epsilon_0 \epsilon_2}$, то из равенства (173) получаем: $D_{1n} = D_{2n}$.



Нормальные составляющие D_n вектора электрической индукции при переходе через границу раздела диэлектриков не изменяют своей величины (непрерывны). Поэтому для описания электрического поля в неоднородных диэлектриках удобнее пользоваться электрической индукцией \mathbf{D} вместо напряжённости поля \mathbf{E} , и в этом заключается главный смысл введения вектора \mathbf{D} .

Так как $E = \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon}$, то $E_{1\tau} = \frac{D_{1\tau}}{\epsilon_0 \epsilon_1}$ и $E_{2\tau} = \frac{D_{2\tau}}{\epsilon_0 \epsilon_2}$. Из равенства (174) следует, что

$$\frac{D_{1\tau}}{\epsilon_1} = \frac{D_{2\tau}}{\epsilon_2}.$$



Тангенциальные составляющие D_τ вектора электрической индукции терпят разрыв на границе раздела диэлектриков.

Так как напряжённость внешнего электростатического поля, созданного свободными зарядами, уменьшается в диэлектрике в ϵ раз: $E = \frac{E_0}{\epsilon}$, то:

$$\begin{aligned} D &= \epsilon_0 \epsilon E = \epsilon_0 E_0 = D_0 \Rightarrow \\ \Rightarrow D &= D_0, \end{aligned} \quad (175)$$

$$\oint_S D_n dS = \int_S D_{n0} dS = \Phi_D, \quad (176)$$

$$\left(\frac{dN_D}{dS} \right)_d = \left(\frac{dN_D}{dS} \right)_0. \quad (177)$$



Поток вектора электрической индукции D через границу раздела диэлектриков не изменяется, т. е. не изменяется и число силовых линий вектора D при прохождении через границу их раздела.

Вектор электрической индукции D непрерывен в однородных и неоднородных диэлектриках и при прохождении через границы раздела диэлектриков.

❖ **Закон преломления линий смещения и силовых линий в изотропных диэлектриках:**

Входя в диэлектрик с большей ϵ , линии смещения (как и силовые линии) удаляются от нормали.

5.7. Кристаллические диэлектрики. Изотропный и анизотропный кристаллические диэлектрики

В современной технике применяется множество электрических кристаллов. Такие кристаллы преобразуют теплоту в электрическую энергию и наоборот (это *пироэлектрики* — турмалин, сахар и др.). Кристаллы *пьезоэлектриков* деформируются под действием электрического поля, а механические нагрузки вызывают в них электрическую поляризацию (наиболее известный пьезоэлектрический кристалл — кварц). Кристаллы пьезоэлектриков при определённых условиях излучают и поглощают звук и ультразвук, стабилизируют по частоте радиосигналы и т. д.

По некоторым свойствам кристаллы диэлектриков принципиально не отличаются от веществ, не имеющих кристаллического строения. Однако ряд

свойств кристаллических диэлектриков отличаются от свойств твёрдых веществ аморфного строения. Прежде всего, это различие касается анизотропии свойств.

Анизотропия — зависимость равновесных физических свойств от направления.

Диэлектрические свойства некоторых диэлектриков (например, кристаллического кварца) зависят от направления поля относительно осей кристалла. Такие диэлектрики называют **анизотропными**.

Изотропные диэлектрики — диэлектрики, в которых при одинаковом значении электростатического поля электрическая индукция \mathbf{D} и вектор поляризации \mathbf{P} одинаковы во всех направлениях (т. е. не зависят от направления поля).

Поликристаллические вещества изотропны, т. е. их свойства (например, электропроводность) одинаковы по всем направлениям. Истинные кристаллы диэлектриков анизотропны если не по всем, то, по крайней мере, по некоторым физическим свойствам. Так, кристаллы сахара и кварца имеют неодинаковую *проводимость* и неодинаковые оптические свойства по разным направлениям, а кристаллы каменной соли — различные упругие свойства и т. д.

Частным, но важным случаем анизотропии является униполярность, свойственная многим кристаллам. Наиболее наглядный пример **униполярности** — изменение *проводимости* в некоторых кристаллах по одному и тому же направлению при изменении направления электрического поля.

5.8. Сегнетоэлектрики

Все мы можем поучиться у И. В. Курчатова целеустремлённости в жизни, неиссякаемому желанию быть полезным Родине, взыскательно-сти к себе, душевному благородству и скромности.

Г. Н. Флёров¹

Существуют вещества, которые обладают спонтанной поляризацией в отсутствие внешнего электростатического поля. Такие вещества называют сегнетоэлектриками.

¹ Георгий Николаевич Флёров (1913—1990 гг.) — советский физик.

Сегнетоэлектрики — кристаллические полярные диэлектрики, которые в определённом интервале температур в отсутствие внешнего электростатического поля спонтанно поляризованы, т. е. у которых в отсутствие внешнего электрического поля существует определённая ориентация дипольных электрических моментов составляющих его частиц. На границах этого температурного интервала сегнетоэлектрики в результате фазового перехода в кристаллической структуре превращаются в обычный полярный диэлектрик.

📁 Примеры сегнетоэлектриков: дигидрофосфат калия KH_2PO_4 , метатитанат бария BaTiO_3 , KH_2AsO_4 . ☐

Первоначально нелинейные электрические свойства, аналогичные нелинейным магнитным свойствам ферромагнетиков, были обнаружены в 1921 г. чешским учёным Дж. Валашеком (Valasek, род. в 1896 г.) в кристаллах **сегнетовой соли** — двойной натриево-калиевой соли винной кислоты $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, и поэтому все подобные диэлектрики получили название сегнетоэлектриков¹.

Подробное исследование диэлектрических свойств сегнетовой соли было впервые произведено в 1930—1934 гг. советскими физиками Игорем Васильевичем Курчатовым (1903—1960 гг.) и Павлом Павловичем Кобёко (1897—1954 гг.).

Перечислим основные характерные особенности сегнетоэлектрических кристаллов:

1. Наличие спонтанной поляризации P_s в определённом диапазоне температур (рис. 51).

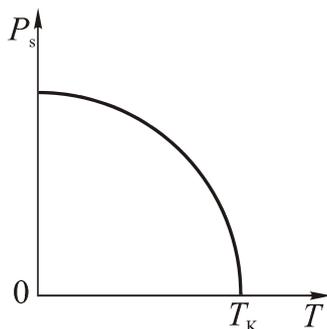


Рис. 51. Зависимость спонтанной поляризации P_s от температуры T вблизи точки Кюри T_K сегнетоэлектрика

¹ По предложению Курчатова.

2. Нелинейная зависимость поляризации P сегнетоэлектрика от напряжённости внешнего электрического поля E_0 (рис. 52).

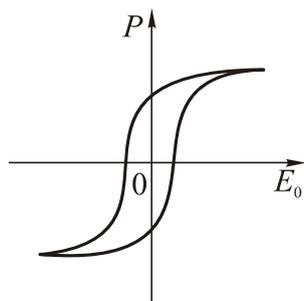


Рис. 52. Нелинейная зависимость поляризации P сегнетоэлектрика от напряжённости внешнего электрического поля E_0

3. Диэлектрическая проницаемость ε сегнетоэлектрических кристаллов зависит от температуры: $\varepsilon = f(T)$, и в некотором характерном для данного сегнетоэлектрика температурном интервале может достигать 5 000—10 000 (рис. 53).

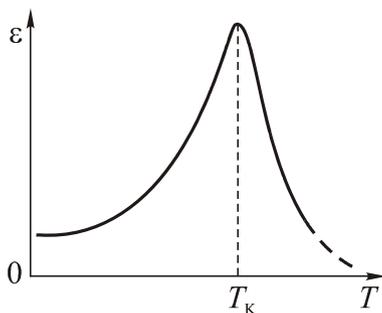


Рис. 53. Зависимость диэлектрической проницаемости ε сегнетоэлектрика от температуры T .
Пик соответствует точке Кюри T_K

4. Величина вектора электрической индукции D нелинейно зависит от величины и направления вектора напряжённости внешнего электрического поля E_0 .

А это значит, что диэлектрическая проницаемость ε сегнетоэлектриков зависит от напряжённости электрического поля E_0 (рис. 54):

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon E_0, \quad (178)$$

где $\varepsilon = f(E_0)$.

$$\varepsilon = 1 + \chi_e, \quad (179)$$

где $\chi_e = f(E_0)$.

Кроме того, $E(\chi)$ зависит от предыстории сегнетоэлектрика (в каких электрических полях он находился ранее), т. е. величина D неоднозначно зависит от E_0 .

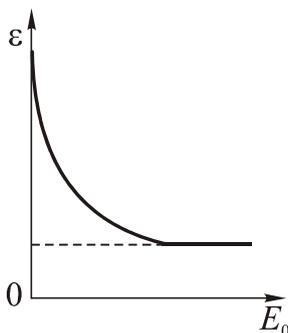


Рис. 54. Зависимость диэлектрической проницаемости ε сегнетоэлектрика от величины приложенного электрического поля E_0

5. Высокие значения пироэлектрических коэффициентов.
6. Большие величины пьезоэлектрических модулей.

Причиной сегнетоэлектрических свойств кристаллов является наличие в сегнетоэлектриках микрообластей однонаправленной самопроизвольной поляризации полярных молекул, их электрических диполей из-за особенно сильного взаимодействия между ними. Эти микрообласти самопроизвольной поляризации получили название **доменов**¹.

¹ От франц. domaine — владение.

Домены в кристаллах — области кристалла с однородными атомно-кристаллическими или магнитными структурами, закономерным образом повернутыми или (и) сдвинутыми относительно друг от друга. Домены, структуры которых лишь сдвинуты относительно друг друга, называют **антифазными**.

Домены в сегнетоэлектриках — микрообласти (порядка 0,0001—0,01 см) самопроизвольной (спонтанной) поляризации.

Из-за сильного обменного взаимодействия между электрическими диполями в доменах возникает их сонаправленная *поляризация* (см. разд. 5.3), при которой отдельные *электрические диполи* (см. разд. 5.1) ориентируются в одном и том же направлении (рис. 55).

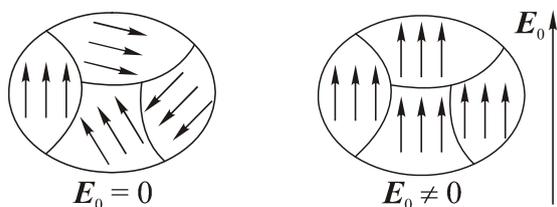


Рис. 55. Доменная структура сегнетоэлектрика.

Стрёлками обозначены направления дипольных моментов

Если бы образец сегнетоэлектрика был полностью поляризован и представлял собой один большой домен, то он создавал бы сильное внешнее поле, направленное противоположно поляризации и называемое **деполяризующим полем** (рис. 56, *a*).

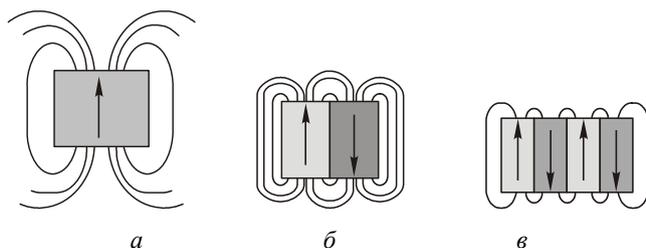


Рис. 56. Возникновение деполяризующего электрического поля и его последовательное уменьшение при разбивании кристалла на домены

Разделение сегнетоэлектрика на домены приводит к уменьшению деполяризующего поля. Если, например, образец сегнетоэлектрика состоит из двух доменов с противоположно направленной поляризацией (рис. 56, б), то требуемая энергия была бы намного меньше, чем в первом случае, однако она ещё значительно больше возможного минимума. Можно представить себе ещё более стабильную структуру, в которой имеется четыре противоположно поляризованных домена (рис. 56, в). В результате деполяризующее поле существенно уменьшается и деполяризации кристалла не происходит. Однако процесс разбиения на домены не может идти беспредельно, так как на образование доменных стенок, то есть границ между доменами, затрачивается определённая энергия. По-видимому, равенство энергии деполяризующего поля и энергии доменных стенок ставит предел дальнейшему разбиению образца на домены и определяет равновесный размер доменов.

Принимая во внимание, что величины электрических диполей полярных молекул (или элементарных кристаллических ячеек) во много раз больше, чем индуцированных, можно заключить, что самопроизвольная поляризация доменов характеризуется очень большим значением поляризованности. В обычных условиях поляризация доменов не проявляется, так как векторы поляризации отдельных доменов \mathbf{P} направлены хаотично, и результирующее значение суммарного вектора $\mathbf{P} = \sum \mathbf{P}_{\text{дом}}$ близко к нулю. Под влиянием электрических полей домены приобретают преимущественную ориентацию вдоль направления поля, что и приводит к резкому изменению χ_e , E и D .



Состояние преимущественной спонтанной поляризации доменов в сегнетоэлектриках и есть **сегнетоэлектрическое состояние**. Переход из сегнетоэлектрического состояния в деполяризованное состояние обычного полярного диэлектрика является переходом, сопровождающимся разрушением его доменной структуры. Сегнетоэлектрики — диэлектрики со спонтанно поляризованными областями.

Очевидно, что спонтанно поляризованное состояние в кристаллах может быть устойчивым в том случае, когда оно энергетически более выгодно, чем неполяризованное. При этом для спонтанно поляризованного состояния нуж-

но учитывать не только энергию его кристаллической решётки, но и энергию внешнего поля, создаваемого поляризационными зарядами.

Для сегнетоэлектриков наличие спонтанной поляризации характерно только в определённом интервале температур. В этом интервале сегнетоэлектрические кристаллы, как правило, имеют различные кристаллические (структурные) модификации, и не все они обладают спонтанной поляризацией. Изменение структуры такого кристалла, сопровождаемое возникновением (исчезновением) спонтанной поляризации, называется фазовым переходом, а температура, ему соответствующая, — **температурой фазового перехода** или точкой Кюри¹.



Температура фазового перехода из сегнетоэлектрического состояния в состояние обычного полярного диэлектрика (сопровождающегося разрушением его доменной структуры) в кристалле сегнетоэлектрика называется **точкой Кюри (температурой Кюри)** для сегнетоэлектриков и обозначается T_K .

Таблица 19. Аналогии между различными температурами фазового перехода II рода, связанного со скачкообразным изменением свойств симметрии вещества

Молекулярная физика	Электричество
<p>Точка (температура) Курнакова для упорядоченных сплавов — температура фазового перехода II рода, связанного со скачкообразным изменением свойств симметрии вещества, при которой степень дальнего порядка в расположении атомов (ионов) компонентов сплава становится равной нулю</p>	<p>Точка (температура) Кюри для сегнетоэлектриков T_K — температура фазового перехода II рода из сегнетоэлектрического состояния в состояние обычного полярного диэлектрика (сопровождающегося разрушением его доменной структуры) в кристалле сегнетоэлектрика и наоборот</p>

В некоторых сегнетоэлектриках имеются две точки Кюри — два температурных фазовых перехода из одного кристаллического состояния в другое. На-

¹ Пьер Кюри (Curie, 1859—1906 гг.) — французский физик.

пример, у сегнетовой соли имеются две точки Кюри, характеризующиеся температурами $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-18,24\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этих температурах диэлектрическая проницаемость сегнетовой соли изменяется непрерывно от значения, соответствующего сегнетоэлектрическому состоянию, до значения, соответствующего состоянию обычного полярного диэлектрика. Закон изменения диэлектрической восприимчивости χ_e вблизи температуры Кюри (закон Кюри—Вейса¹) имеет вид:

$$\chi_e = \frac{C}{T - T_K}, \quad (180)$$

где C — константа, характерная для данного сегнетоэлектрика.

Так как кристаллы, в том числе сегнетоэлектрики, обладают анизотропией свойств и, в частности, анизотропией диэлектрических свойств, то их диэлектрическая восприимчивость χ_e характеризуется не скалярной величиной, а тензором диэлектрической восприимчивости. Это означает, что сегнетоэлектрические свойства, определяемые зависимостью $\chi_e = f(E)$, могут быть различными относительно разных кристаллографических осей, а направление измерения температурной зависимости $\chi_e = f(T)$ не будет влиять на результат.

Электрическая индукция сегнетоэлектрика складывается из трёх составляющих:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} + \mathbf{P}_0, \quad (181)$$

где \mathbf{E} — среднее макроскопическое поле в сегнетоэлектрике; \mathbf{P} — средний индуцированный электрический момент единицы объёма, обусловленный поляризацией ионного смещения и смещения электронных оболочек и пропорциональный в слабых полях напряжённости электрического поля; \mathbf{P}_0 — электрический момент спонтанной поляризации; ε_0 — электрическая постоянная.

Векторы \mathbf{E} и \mathbf{P} имеют одинаковое направление, а вектор \mathbf{P}_0 в общем случае имеет другое направление.

¹ Пьер Эрнест Вейс (Weiss, 1865—1940 гг.) — французский физик.

Зависимость модуля вектора электрической индукции от напряжённости электрического поля в сегнетоэлектриках имеет вид, изображённый на рис. 57.

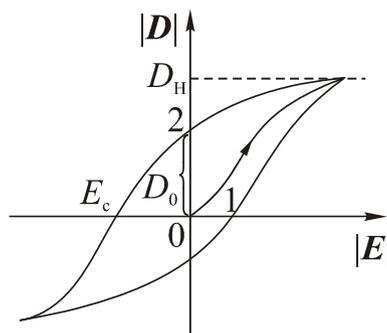


Рис. 57. Зависимость модуля вектора электрической индукции $|D|$ от напряжённости электрического поля $|E|$ в сегнетоэлектриках (петля гистерезиса)

При первоначальном увеличении электрического поля ($E > 0$) возрастание величины D описывается кривой 1 (вплоть до значения насыщения D_n). Это связано с постепенной ориентацией доменов сегнетоэлектрика по направлению поля E . Если затем уменьшить электрическое поле, то уменьшение D будет описываться кривой 2. Когда электрическое поле E становится равным нулю, значение D не равно нулю, а изображается отрезком D_0 . Это показывает, что в сегнетоэлектрике имеется остаточная макроскопическая поляризация даже в отсутствие внешнего электрического поля, что связано с неполной дезориентацией доменов, с их остаточной ориентацией вдоль первоначального поля E . Чтобы уничтожить остаточную макроскопическую поляризацию, нужно приложить поле E_c (**коэрцитивное поле**) противоположного направления по сравнению с первоначальным.

При дальнейшем периодическом изменении электрического поля изменение D описывается петлеобразной кривой (рис. 57) — **петлёй гистерезиса**¹. Рассматривая петлю гистерезиса D , можно сделать заключение о важности учёта предыстории данного сегнетоэлектрика при изучении его диэлектрических свойств.

¹ Гистерезис по-гречески означает "память".

Таблица 20. Аналогии между различными явлениями гистерезиса

Механика	Электростатика
<p>Упругий гистерезис — различие в значениях деформаций ϵ в твёрдом теле при одном и том же механическом напряжении σ в зависимости от значения предварительной деформации тела</p>	<p>Сегнетоэлектрический гистерезис — неоднозначная зависимость электрической индукции D или поляризации P от напряжённости внешнего электрического поля E в сегнетоэлектриках</p>

Нелинейная зависимость электрической поляризации, создаваемой внешним полем, от величины этого поля объясняется тем, что направление поляризации в доменах сегнетоэлектриков во внешнем поле может быть изменено на противоположное (домен переориентирован), и для разных доменов эта переориентация достигается при различных внешних полях.

При сравнении пироэлектриков и сегнетоэлектриков иногда подчёркивают возможность переориентации доменов у сегнетоэлектриков и невозможность этого у пироэлектриков. В действительности кристаллы пироэлектриков имеют только один "домен", и именно поэтому его поляризация не может быть "перевернута" внешним полем.

В сегнетоэлектриках возникшая поляризация создаёт в кристалле особенное полярное направление, а в пироэлектриках она, возникнув, только подтверждает, что это направление уже было в кристалле особенным полярным.

Спонтанная поляризация тесно связана с атомной структурой кристаллов и, в конечном счёте, определяется этой структурой и характером связей между частицами. Отсутствие элементарных электрических диполей у частиц, образующих сегнетоэлектрики, с неизбежностью требует связывать наличие в кристалле спонтанной поляризации с его определённой кристаллической структурой.

Многие сегнетоэлектрики (сегнетова соль $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и другие соли винной кислоты, дигидрофосфат калия KH_2PO_4 и изоморфные ему соединения) являются соединениями, имеющими довольно сложную кристаллическую структуру. Следует учитывать при этом, что для сегнетоэлектриков важно знать не только общие структурные данные о положении атомов в решётке, но и, что более важно, характер изменений структуры, приводящих к возникновению спонтанной поляризации, причины её возникновения. Достаточно сказать, что структура сегнетовой соли и механизм возникновения в

ней спонтанной поляризации были установлены относительно недавно с использованием дифракции рентгеновских лучей и нейтронов.

Практически важным и наиболее распространённым сегнетоэлектриком является **метатитанат бария BaTiO_3** . Его точка Кюри лежит около 133°C , а диэлектрическая проницаемость достигает в максимуме $6\,000$ — $7\,000$.

BaTiO_3 имеет несколько кристаллических модификаций. В параэлектрическом состоянии (состояние объёмного полярного диэлектрика при $T > T_K$) титанат бария обладает кубической структурой (тип перовскит). Элементарная ячейка перовскитной решётки показана на рис. 58.

В центре куба расположен атом титана Ti , в вершинах — атомы бария Ba , а в центре каждой грани — атомы кислорода O . Параметр ячейки равен приблизительно 4 \AA . При таком расположении атомов в элементарной ячейке "центры тяжести" положительных и отрицательных зарядов совпадают, и дипольный момент ячейки равен нулю. Таким образом, эта фаза кристалла является неполярной фазой.

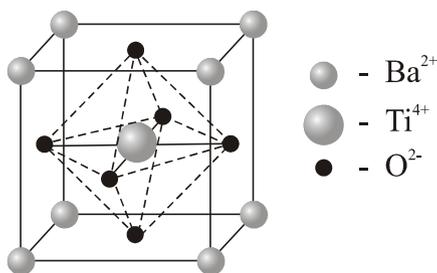


Рис. 58. Элементарная ячейка перовскитной решётки метатитаната бария BaTiO_3

При *температуре Кюри* в титанате бария происходят смещения ионов (в основном Ti) из первоначальных положений, в результате которых образуются дипольные моменты, параллельные друг другу. Таким образом, спонтанная поляризация BaTiO_3 в значительной своей части обусловлена поляризацией ионного характера. Однако возникающая в результате истинных смещений электронная поляризация так же вносит вклад в величину полной спонтанной поляризации кристалла.

При дальнейшем понижении температуры в кристалле наблюдаются ещё два фазовых перехода при $T = +5^\circ\text{C}$ и $T = -90^\circ\text{C}$. Фаза, стабильная в области температур от $+5^\circ\text{C}$ до -90°C , имеет ромбическую структуру. Эта фаза также сегнетоэлектрическая. Элементарная ячейка имеет вид ромбоэдра, получен-

ного деформацией исходной кубической ячейки вдоль диагонали грани. Это направление и является полярной осью.

Третий фазовый переход, происходящий при $-90\text{ }^\circ\text{C}$, понижает симметрию кристалла до ромбоэдрической. Ромбоэдрическое искажение состоит в деформации исходной ячейки вдоль пространственной диагонали куба, которая становится полярной осью кристалла.

Таблица 21. Параметры некоторых сегнетоэлектриков

Кристалл	Точка Кюри T_K , $^\circ\text{C}$	Точка Кюри T_K , $^\circ\text{C}$	Спонтанная поляризация P_0 , мКл·м $^{-2}$	Максимальная диэлектрическая проницаемость ϵ
Дигидрофосфат калия KH_2PO_4	-150	51	$\sim 10^5$	
Диглициннитрат	-67	6		400
Дикальцийстронций пропионат	8	1,2		3 200
Додекагидраталюминий метиламмонийсульфат	-97	6 при $-107\text{ }^\circ\text{C}$		5 000 при T на $2\text{ }^\circ\text{C}$ ниже T_K и 15 000 при T на $25\text{ }^\circ\text{C}$ ниже T_K
Литийгидразинсульфат	80	3		320
Метаниобат свинца PbNb_2O_6	570	Насыщение гистерезисной кривой не достигается		17 000
Метатитанат бария BaTiO_3	133	250	до 7 000	1 000
Ниобат лития LiNbO_3	>450	500		6 000 вплоть до $220\text{ }^\circ\text{C}$
Сегнетова соль $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-18, -24	2,5	$\sim 9\text{ }000$	

Таблица 21 (окончание)

Кристалл	Точка Кюри $T_K, ^\circ\text{C}$	Точка Кюри $T_K, ^\circ\text{C}$	Спонтанная поляризация $P_0, \text{мКл}\cdot\text{м}^{-2}$	Максимальная диэлектрическая проницаемость ϵ
Тетраметиламмонийтрихлоромеркурат	Не наблюдается	12		3 000
Тиомочевина	-104	31 при -104 °C		500—1 000 при -110 °C
Титанат висмута	643	35		2 200 и 6 200 при 8,7 кВ·см ⁻¹
Триглицидинсульфат ($\text{CH}_2\text{NH}_2\text{CO}\cdot\text{OH}$) ₃ · H_2SO_4	49	28		220

Сегнетоэлектрики имеют высокую диэлектрическую проницаемость. Из них можно создавать малогабаритные *конденсаторы* большой ёмкости. В районе температуры возникновения (исчезновения) спонтанной поляризации (в области фазового перехода) сегнетоэлектрики испытывают аномалию почти всех физических свойств: тепловых, механических, электрических, оптических и др. Природа этих аномалий ещё не до конца понята, но резкое изменение свойств сегнетоэлектриков может быть выгодно использовано в измерительной аппаратуре и радиоаппаратуре.

Антисегнетоэлектрики — кристаллические вещества, в которых спонтанная поляризация возникает в двух и более подрешётках, так что внутри каждого домена наблюдается взаимная компенсация *электрических моментов*, т. е. результирующая спонтанная поляризация оказывается равной нулю. Тем не менее, антисегнетоэлектрики отличаются от обычных диэлектриков, поскольку они имеют спонтанную поляризацию и разбиты на домены.

📁 Примеры антисегнетоэлектриков: PbZrO_3 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, NaNbO_3 , WO_3 . ☐

Контрольные вопросы

- ? Какие вещества относят к сегнетоэлектрикам?
- ? Какими свойствами обладают сегнетоэлектрики?

- ? Что такое домены?
- ? Какими параметрами характеризуется поведение диэлектриков в электрическом поле?
- ? Как изменяется диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков при их нагревании?
- ? В чём сущность гистерезиса в сегнетоэлектриках?
- ? Почему температурные зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария, снятые при нагреве и охлаждении, могут различаться?

5.9. Пьезоэлектрики

В 1880 г. французские учёные, братья Пьер и Жак Кюри (Curie), обнаружили, что при сдавливании определённым образом вырезанных пластинок некоторых кристаллов на их поверхности появляется электрический заряд. Явление это получило название пьезоэффекта¹ (пьезоэлектрический эффект).

Пьезоэффект наблюдается в кристаллах кварца, турмалина и сегнетовой соли, также в танталате и ниобате лития, в пьезокерамике.

К настоящему времени известно около 70 минералов, которые согласно их симметрии должны обладать пьезоэлектрическими свойствами.

Наличие пьезоэффекта качественно установлено в ряде минералов: бораците, вурците, клиноэдрите, кроншtedтите, кварце, лангбейните, лейкофане, мелифане, сколеците, стибитакталите, струвите, гематите, турмалине, цуните, шортите, эдингтоните, эпистильбите, эпсомите. Количественно пьезоэлектрический эффект измерен в кварце, сфалерите, турмалине, нефелине, конкрините, бораците и др.

Наиболее распространены в природе кварц и нефелин, являющиеся породообразующими минералами горных пород.

Из всех кристаллов линейных пьезоэлектриков наиболее изучен и широко употребляем кварц. Все его модификации представляют собой сочетания кремнекислородных тетраэдров.

¹ От греческого слова "пезо", означающего "давить".

Низкотемпературная (ниже 573 °С) модификация диоксида кремния SiO_2 — порообразующий и жильный минерал "кварц" — принадлежит к ромбоэдрической системе. Вблизи температуры 573 °С кварц испытывает фазовое превращение и с повышением температуры становится гексагональным. При 870—1 470 °С устойчива третья модификация SiO_2 — тридимит. Наиболее симметричной является четвёртая, кубическая модификация — кристаболит, имеющий структуру типа алмаза. Кристаболит устойчив в интервале 1 470—1 710 °С.

Изучение пьезоэффекта очень быстро показало, что это явление сводится к электрической поляризации некоторых кристаллов, вызываемой механическими напряжениями или деформациями. Такой эффект позднее был назван прямым пьезоэлектрическим эффектом.

Пьезоэлектрический эффект — зависимость поляризации кристалла от механических напряжений:

$$P = P(\sigma), \quad (182)$$

где P — поляризация; σ — сжатие (механическое напряжение).

Величина заряда, возникающего при пьезоэлектрическом эффекте, определяется соотношением:

$$q = d_{11}F_X, \quad (183)$$

где F_X — величина силы, вызвавшей деформацию; d_{11} — постоянный для данного кристалла коэффициент, называемый **пьезоэлектрическим модулем** (табл. 22).

Таблица 22. Пьезоэлектрические модули кристаллов¹ [38]

Кристалл	Пьезоэлектрический модуль d_{11} , 10^{-8} (гауссова система ²)
Кварц	6,9
Керамика титаната бария	750
Сегнетова соль	7000

¹ Некоторые кристаллы имеют различные модули в зависимости от направления деформации — в этом случае приводятся наибольшие значения.

² Для пересчёта значения модуля из гауссовой системы в систему СИ нужно умножить величину, указанную в таблице, на $3 \cdot 10^4$.

Таблица 22 (окончание)

Кристалл	Пьезоэлектрический модуль d_{11} , 10^{-8} (гауссова система ¹)
Турмалин	5,78
Фосфат аммония	148
Фосфат калия	70
Цинковая обманка	9,8

Единица измерения пьезоэлектрического модуля в системе СИ — Кл·Н⁻¹.

Из рис. 59 можно увидеть, что кристалл кварца имеет три **полярных направления** (направления, которые не совмещаются сами с собой под действием каких-нибудь элементов симметрии), проходящие через **оси симметрий второго порядка** (при повороте кристалла вокруг этой оси кристалл совмещается сам с собой).

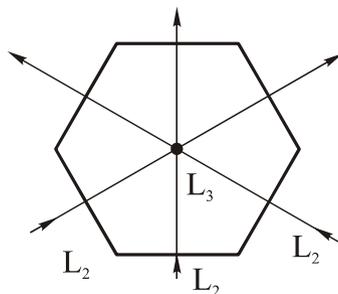


Рис. 59. Приближённый срез кристалла кварца,
 L_3 — ось третьего порядка, L_2 — ось второго порядка

При механическом сжатии или растяжении кристалла заряды в кристаллической решётке смещаются, в результате чего образуются электрические диполи, что вызывает появление поверхностных зарядов и, следовательно, поверхностной разности потенциалов.

¹ Для пересчёта значения модуля из гауссовой системы в систему СИ нужно умножить величину, указанную в таблице, на $3 \cdot 10^4$.



Пьезоэффект — возникновение поверхностной разности потенциалов при механическом деформировании сегнетоэлектрических кристаллов по полярным направлениям их решётки.

Можно выделить два типа пьезоэффекта — продольный и поперечный.

Продольный пьезоэффект — появление разности потенциалов на поверхности кристалла при его деформации по направлению биссектрисы между двумя осями второго порядка (рис. 60).

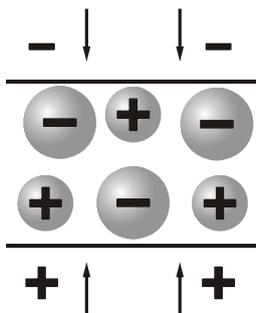


Рис. 60. Продольный пьезоэффект

Поперечный пьезоэффект — появление разности потенциалов на поверхности кристалла при его деформации по направлению вдоль одной из осей второго порядка (рис. 61).

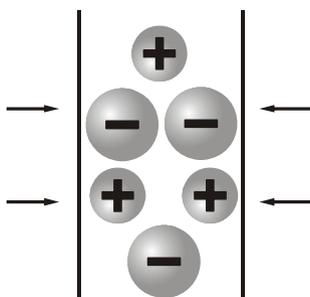


Рис. 61. Поперечный пьезоэффект



Пьезоэлектричество — возникновение разности потенциалов при поляризации диэлектрика под действием механических напряжений.

Пьезоэлектрик — вещество, обнаруживающее явление пьезоэлектричества.

Существует также и **обратный пьезоэффект** — механическая деформация сегнетоэлектрика под действием электростатического поля.

Более 20 лет пьезоэффект рассматривали только как любопытное физическое явление. Однако позднее были найдены важные практические применения этого явления. Кварцевые пьезоэлементы используются в акустоэлектронике для стабилизации частоты сигнала. Пьезоэлектрические резонаторы имеют большую область применения — в электропроигрывателях грампластинок, пьезозажигалках, мобильных телефонах, навигационных приборах, в радиолокации, в спутниковых системах позиционирования.

Пьезоэлектрические сейсмографы применяются для регистрации объёмных волн сжатия в жидкой среде (на море, в буровых скважинах).



Рис. 62. Колебательный твёрдотельный гироскоп

Пьезогироскоп — устройство с датчиком изменения гироскопического эффекта и преобразованием электрического сигнала (сигнала поляризации кристалла) при изменении действия внешней механической силы на данное уст-

ройство. Пьезогироскопы фактически не связаны с гироскопическим эффектом, но, по сути, исполняют роль гироскопа (они также являются стабилизаторами).

В **колебательном гироскопе** (рис. 62) нет вращающихся частей. Он основан на наличии силы Кориолиса и представляет собой колеблющуюся пластину (обычно треугольную призму из пьезоэлектрика). Если пластину повернуть, то за счёт силы Кориолиса она отклонится в плоскости, перпендикулярной первоначальной плоскости колебаний. Измеряя это отклонение с помощью сигналов, снимаемых с электродов на гранях, и обрабатывая полученные данные, можно получить скорость вращения вокруг одной оси. Если нужно отслеживать вращение в нескольких плоскостях, используют несколько соответственно расположенных гироскопов.

5.9.1. Пьезоэлектрические текстуры

Текстурами называют однородные среды нерешётчатого строения, образованные из частиц, закономерно ориентированных в пространстве.

☞ Примером текстур могут служить: кристаллические текстуры, состоящие из ориентированных кристаллов; волокнистые материалы (например, дерево), электреты, образованные ориентированными электрическими диполями; пьезокерамика (преимущественная ориентация спонтанной поляризации в доменах микрористаллов); постоянные магниты (упорядочение магнитных моментов монокристаллов) и пр. □

Текстуры могут быть изотропными и анизотропными. При определённой взаимной ориентации кристаллов-пьезоэлектриков и минералов, образующих горные породы, может возникнуть текстура, обладающая пьезоэлектрическими свойствами.

Пьезосвойства горных пород были впервые качественно изучены динамическим методом (с использованием ультразвукового сейсмоскопа). Количественно пьезоэлектрический эффект изучался в кварцсодержащих горных породах типа гранитов, гнейсов, кварцитов и жильного кварца статическим методом (сдавливание образцов прессом и регистрация разности потенциалов струнным электрометром). При этом измерялись в основном пьезомодули продольного пьезоэффекта. Данные о величине поперечного эффекта почти отсутствуют; не определялись также пьезомодули при действии сдвиговых напряжений.

Кроме кварцсодержащих горных пород, динамическим методом исследованы породы, содержащие турмалин и нефелин. Пьезоэлектрические свойства нефелина содержащих пород, таких как апатитовые нефелины, штолиты, уртиты, имеют тот же порядок величины, что и свойства гранитов.

Пьезоэлектрические свойства горных пород находят практическое использование в геофизике. В настоящее время разработана методика поисков жильного кварца и пегматитовых жил, скрытых под наносами. Суть этой методики сводится к следующему. При помощи груза копра или взрыва создаются упругие волны, которые, достигнув породы, обладающей пьезоэлектрическим эффектом, возбуждают электромагнитные волны; электрическая составляющая последних регистрируется с помощью специальной аппаратуры.

5.9.2. Электрострикция

В любом диэлектрике, помещённом во внешнее электростатическое поле E_0 , возникает поляризация диэлектрика, обусловленная появлением на его поверхностях индуцированных связанных зарядов. Заряды одного знака взаимодействуют друг с другом по закону кулоновских сил. Это приводит к их отталкиванию и к механической деформации поверхности диэлектрика, т. е. к явлению, которое называют **электрострикцией**. Явление электрострикции было открыто в 1894 г. немецким физикохимиком Вальтером Ф. Г. Нернстом (Nernst, 1864—1941 гг.).

Электрострикция может иметь место в центросимметричных кристаллах и в изотропной среде.

Электрострикция не изменяет направления деформации при изменении направления действующего внешнего электростатического поля. Эта особенность электрострикции позволяет её отличать от обратного пьезоэлектрического эффекта. Кроме того, электрострикция зависит от квадрата напряжённости внешнего поля:

$$\frac{\Delta d}{d} \sim E^2. \quad (184)$$



Электрострикция — деформация диэлектрика, пропорциональная квадрату приложенного электрического поля (или поляризации) и обусловленная кулоновским взаимодействием индуцированных на поверхности диэлектрика одноимённых зарядов.

При наличии обратного пьезоэлектрического эффекта электрострикция выступает в качестве малой нелинейной добавки к нему. В отличие от пьезоэлектрического эффекта, у электрострикции нет обратного эффекта, но есть термодинамически сопряжённый эффект — изменение *диэлектрической проницаемости* под действием механического напряжения.

5.10. Пироэлектрики

Пироэлектрики — кристаллические *диэлектрики*, на поверхности которых при изменении температуры возникают *электрические заряды*. Появление электрических зарядов связано с изменением спонтанной *поляризации*. Все пироэлектрики являются *пьезоэлектриками*.

В начале XVIII в. в Европу были завезены кристаллы турмалина ("цейлонский магнит"), обладающие свойством при нагревании оказывать силовое воздействие на частицы пепла. Эпинус в 1756 г. установил причину — образование на концах нагретого кристалла зарядов противоположного знака. Термин "пироэлектричество"¹ был введён шотландским физиком Дейвидом Брюстером (Brewster, 1781—1868 гг.) в 1824 г. Английский физик лорд Кельвин (Kelvin, 1824—1907 гг.) связал пироэлектрический эффект с изменением электрической поляризации при изменении температуры. В. Аккерман (Ackermann) в 1915 г. исследовал пироэлектрический эффект в ряде кристаллов в широком интервале температур и обнаружил тенденцию к убыванию пироэлектрического эффекта при понижении температуры. Первая микроскопическая теория создана русским физиком Сергеем Анатольевичем Богославским (1883—1923 гг.) в 1915 г. В дальнейшем было установлено, что у сегнетоэлектриков величина эффекта велика вблизи точки фазового перехода.

Анализ термодинамических соотношений, описывающих пироэффект, показывает, что должен существовать эффект, обратный пироэффекту: изменение температуры кристалла при приложении к нему электрического поля, т. е. при изменении его спонтанной поляризации. Этот эффект был назван **электрокалорическим**.

С изменением температуры свободный кристалл изменяет свои размеры — сужается или расширяется. Очевидно, что в результате такого расширения

¹ От греч. "пиро" — тепло.

(сужения) даже при условии, что в кристалле не произошло никакой перестройки его структуры из-за изменения температуры, спонтанная поляризация кристалла изменяется, так как изменится число зарядов и диполей в единице объёма (которое и определяет величину спонтанной поляризации). Такой эффект обычно трактуется как пьезоэлектрический, так как он обусловлен деформацией, вызванной нагреванием (охлаждением) кристалла.

Если говорить о разработке устройств, предназначенных для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую на пирозлектриках, то, в принципе, такой преобразователь (пирозлектрический кристалл) должен работать по циклу: нагрев с выделением некоторой мощности (которая обусловлена изменением поляризации кристалла) на нагрузочном сопротивлении внешней цепи и охлаждение с тем же результатом, но при токе противоположного направления.

Наиболее эффективным, однако, является другой цикл. В этом случае спонтанно поляризованный сегнетоэлектрик, находящийся при температуре чуть ниже точки Кюри, нагревается с переходом через точку Кюри; процесс нагревания идет со "сбрасыванием" заряда спонтанной поляризации во внешнюю цепь. При последующем охлаждении с переходом через точку Кюри на нагрузке создаётся ток противоположного направления. Такой цикл, как и всякий тепловой цикл, имеет коэффициент полезного действия (КПД) (в данном случае — эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую) не выше коэффициента идеального цикла Карно. Этот предельный КПД, в свою очередь, зависит от температуры, при которой происходит преобразование. Расчёт показывает, что, например, для BaTiO_3 КПД пирозлектрического преобразования близок к 2%.

Реальное устройство, использующее пирокристаллы, легче всего представить как нагреваемое от внешнего источника (например, Солнца) и охлаждаемое за счёт излучения во внешнее пространство за время пребывания в тени (вращающийся преобразователь). Эффективность такого преобразователя, вообще говоря, зависит от многих причин: температуропроводности элемента, его теплоёмкости, пироккоэффициента, области рабочих температур, скорости вращения преобразователя и пр.

Оценочные расчёты показывают, однако, что, несмотря на низкий КПД, применение пирозлектриков в качестве преобразователей тепловой энергии в электрическую в некоторых случаях не лишено смысла. По **удельной мощности** (мощности, снимаемой с единицы веса материала) пирозлектрики близки к полупроводниковым преобразователям.

Тонкие пластинки пирозлектриков служат весьма чувствительными приёмниками регистрации инфракрасного излучения. Для удобства усиления сигнала и избежания утечки заряда перед регистрирующим кристаллом обычно ставится прерыватель, модулирующий поток излучения на кристалл.

5.11. Электреты, термоэлектреты, фотоэлектреты

Электреты — диэлектрики (аморфные и поликристаллические), обладающие свойством длительное время сохранять *электрическую поляризацию* после снятия внешнего *электрического поля*, вызвавшего поляризацию, и создающие электрическое поле в окружающем пространстве (электрические аналоги *постоянных магнитов*). Такая поляризация называется **остаточной**.

Первые научные сведения об электретном состоянии есть в работах Грея (1732 г.) и Фарадея (1839 г.). Термин "электрет" впервые ввёл Хевисайд (1892 г.), а изучать это явление начал японский физик Ёгути (Yoguchi) в 1919 г.

По методам получения стабильные электреты разделяются на:

- **коронозлектреты** — действием поля *коронного разряда*;
- **криоэлектреты** — при застывании органических растворов в электрическом поле;
- **магнетоэлектреты** — поляризацией в сильном магнитном поле;
- **механоэлектреты** — механической деформацией электретов;
- **радиоэлектреты** — радиоактивным облучением;
- **термоэлектреты** — нагревая, а затем охлаждая диэлектрик в сильном электрическом поле;
- **трибоэлектреты** — трением;
- **фотоэлектреты** — освещая в сильном электрическом поле;
- **электроэлектреты** — поляризацией в сильном электрическом поле без нагревания.

Долгое время термоэлектреты изготавливались из таких органических веществ, как канифоль, смолы, пчелиный воск. В связи с обнаружением в элек-

третах остаточных зарядов, распределённых по объёму электрета, подчёркивается важность наличия ионной проводимости для веществ, из которых можно приготовить электреты.

Со временем у электретов наблюдается уменьшение заряда, обычно более быстрое в первое время после изготовления. В дальнейшем заряды электретов изменяются незначительно в течение длительного времени. При комнатной температуре временная стабильность электретов высока (например, у электретов из политетрафторэтилена время жизни $\sim 10^2$ — 10^4 лет).

Характерное для электретов состояние с остаточной поляризацией может быть создано при определённых условиях в некоторых кристаллах за счёт фотопроводимости. Такие электреты, в отличие от обычных термоэлектретов, принято называть фотоэлектретами. Первые работы по получению и исследованию фотоэлектретов выполнил в 1937 г. болгарский физик Георги С. Наджаков (1896—1981 гг.) на монокристаллах серы.

Как и в случае термоэлектретов, для получения фотоэлектрета фотопроводящий кристалл помещают в электрическое поле и одновременно он освещается через один из электродов, который делается прозрачным или полупрозрачным. В таких условиях в кристалле под действием света создаются свободные носители электрического заряда, которые смещаются электрическим полем и локализуются на дефектах решётки. После создания поляризации в кристалле за счёт фотопроводимости освещение прекращают и отключают поляризующее поле. Созданная поляризация (**фотополяризация**) при содержании кристалла в темноте может сохраняться довольно долго. Так, в образцах из поликристаллической серы за 10 суток сохраняется около 75% заряда фотоэлектрета.

Устойчивая фотополяризация может быть создана не во всех кристаллах. Прежде всего, кристалл должен обладать фотопроводимостью. Кроме того, для того чтобы поляризованное состояние сохранялось сколько-либо длительное время, необходимо, чтобы кристалл имел глубокие уровни прилипания. Только при этом условии образовавшиеся при фотополяризации заряженные центры не будут исчезать за счёт термической активации с последующей рекомбинацией.

Электреты применяют как источники электрического поля (электретные микрофоны и телефоны, вибродатчики, генераторы слабых переменных сигналов, электромеры, электростатические вольтметры и др.), а также как чувствительные датчики в дозиметрах, устройствах электрической памяти, для изготовления барометров, гигрометров и газовых фильтров, пьезодатчиков, в электрофотографии и т. п.

ГЛАВА 6

Проводники. Электрическая ёмкость

6.1. Проводники

...ищем только истину, насколько нам ум позволяет её обнаружить.

Ч. Дарвин¹

Проводниками электрических зарядов называют вещества, содержащие в своей структуре свободные носители зарядов, способные перемещаться в веществе под действием электрического поля.

Электропроводность (Электропроводимость) — способность вещества осуществлять под действием электрического поля направленное (упорядоченное) движение носителей зарядов, называемое *электрическим током*.



Проводники — вещества, хорошо проводящие электрический ток.

Проводниками являются металлы и сплавы (**проводники первого рода**), *электролиты* (**проводники второго рода**), ионизованные газы и плазма (электрически нейтральное состояние вещества).

Согласно **классической теории электропроводности** электропроводность металлов обусловлена присутствием свободных носителей заряда в металле. Свободные носители заряда — электроны проводимости — в классической

¹ Чарльз Роберт Дарвин (Darwin, 1809—1882 гг.) — английский естествоиспытатель, основоположник эволюционного учения о происхождении видов животных и растений путём естественного отбора.

теории электропроводности рассматривают как идеальный "электронный газ", заполняющий решётку "кристаллического" металла.

В *электролитах* электропроводность обусловлена положительными и отрицательными ионами.

В ионизованном газе и *плазме* электропроводность обусловлена свободными электронами и ионами.

В *полупроводниках* электропроводность осуществляется движением электронов проводимости и дырок, *подвижность* которых на много порядков превышает *подвижность* ионов. В соответствии с этим электропроводность у полупроводников намного больше, чем у диэлектриков; она сильно зависит от химического состава и наличия примесей. Температурная зависимость электропроводности полупроводников определяется в основном быстрым повышением концентрации электронов и дырок с ростом температуры (по экспоненте), *подвижность* при этом также изменяется, но обычно значительно медленнее (табл. 23).

Таблица 23. Характерные значения электрофизических параметров диэлектриков, полупроводников и металлов

Класс вещества	Концентрация носителей n , см^{-3}	Подвижность носителей μ , $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	Удельная электропроводность, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$
Диэлектрики	Ниже 10^9	Ниже 10^{-4}	Ниже 10^{-14}
Полупроводники неорганические	$10^{11}—10^{20}$	$10^5—10^{-3}$	$10^3—10^{-9}$
Полупроводники органические	$10^6—10^{19}$	$10^2 \div 10^{-6}$	$10^2—10^{-14}$
Металлы	10^{22}	10^3	$10^2—10^8$

Контрольные вопросы

- ? Какие вещества называют проводниками?
- ? Что называют проводниками первого рода?
- ? Что называют проводниками второго рода?

6.2. Модель металла Дрүде—Лоренца

[Френкель] был буквально заполнен идеями и вместе с тем превосходно владел всей техникой теоретической физики. Хотя его идеи были иногда довольно странными, они всегда были плодотворными... Я горд тем, что могу причислить его к моим друзьям и научным коллегам.

*М. Борн*¹

В **классической электронной теории металлов** предполагается, что движение электронов проводимости подчиняется законам классической механики Ньютона. Далее, в этой теории пренебрегают взаимодействием электронов между собой, а взаимодействие электронов с положительными ионами решётки сводят только к соударениям.



В классической электронной теории электроны проводимости в металлах рассматривают как электронный газ, подобный идеальному атомарному газу молекулярной физики.

Такой электронный газ должен подчиняться всем законам идеального газа и, в частности, закону равномерного распределения энергии по степеням свободы, согласно которому средняя кинетическая энергия теплового движения,

приходящаяся на каждую степень свободы, равна $\frac{1}{2}kT$. Так как свободный электрон обладает тремя степенями свободы поступательного движения, то средняя энергия беспорядочного теплового движения, приходящегося на

один электрон, равна $\frac{3}{2}kT$.

Концентрация n электронов проводимости в металлах по порядку величины равна 10^{28} — 10^{29} электрон·м⁻³ и различна в различных металлах.

Согласно классической **теории металлов Дрүде**, предложенной в 1900 г. немецким физиком Паулем Дрүде (Drude, 1863—1906 гг.), металл состоит из

¹ Макс Борн (Born, 1882—1970 гг.) — немецкий физик-теоретик.

свободных электронов (*электронный газ*) и тяжёлых положительных ионов, расположенных в узлах кристаллической решётки, которые можно считать неподвижными.

Число свободных электронов в единице объёма равняется:

$$n = \frac{ZN_{\text{A}}\rho}{A}, \quad (185)$$

где Z — число валентных электронов в атоме металла; N_{A} — число Авогадро; ρ — массовая плотность металла; A — относительная атомная масса.

В отсутствие внешних полей электроны в металле в условиях теплового равновесия движутся свободно (беспорядочно). Это движение прерывается столкновениями их с ионами, но в промежутках между столкновениями взаимодействие электронов с ионами и друг с другом не учитывается. Столкновения в теории металлов Друде — мгновенные события, внезапно изменяющие скорость электрона. Вероятность такого изменения скорости в течение бесконечно малого промежутка времени dt равна dt/τ , где τ — время релаксации, имеющее смысл времени свободного пробега электрона. Благодаря столкновениям электроны приходят в состояние теплового равновесия со своим окружением. Средняя кинетическая энергия электрона равна $\frac{3}{2}kT$, где k — постоянная Больцмана, T — локальная абсолютная температура в месте нахождения электрона. В состоянии теплового равновесия распределение электронов по энергиям соответствует распределению Максвелла—Больцмана.

Во внешних полях направленное движение электронов подчиняется классическим (ньютоновским) уравнениям, в которых действие столкновений учитывается как некоторая сила трения, пропорциональная скорости направленного движения.

Теория металлов Друде качественно объясняет ряд кинетических явлений — статическую и высокочастотную проводимость, эффект Холла. В частности, из этой теории следует *закон Ома* (см. разд. 7.7), *закон Джоуля—Ленца*. Теория металлов Друде также качественно объясняет электронную теплопроводность и некоторые термоэлектрические явления в металлах. Наиболее впечатляющим, хотя и ошибочным¹, результатом теории металлов Друде явилось объяснение *закона Видемана—Франца*.

¹ Из-за взаимной компенсации двух ошибок при вычислении электронной теплоёмкости и среднего квадрата скорости электрона, кроме того, Друде ошибся в 2 раза при вычислении электропроводности.

Теория металлов Друде, дополненная и развитая голландским физиком Хендриком А. Лоренцем (Lorentz, 1853—1928 гг.), будучи классической теорией, принципиально не могла объяснить ряд экспериментальных фактов:

- отсутствие электронного вклада в теплоёмкость, равного $\frac{3}{2}nk$;
- величину длины свободного пробега λ электронов, превосходящую в сотни раз расстояние между ионами;
- знак постоянной Холла, который может быть как отрицательным, так и положительным;
- зависимость *сопротивления* многих металлов от внешнего *магнитного поля* (**магнетосопротивление**);
- наблюдаемые значения *термоЭДС*, которые примерно на 2 порядка меньше, чем следует из этой теории.

Проблема с отсутствием вклада в теплоёмкость металлов свободных электронов казалась столь вопиющей, а многочисленные попытки её преодолеть — столь бесплодными, что она получила — с лёгкой руки австрийско-голландского физика-теоретика Пауля Эренфеста (Ehrenfest, 1880—1933 гг.) — звучное название "**катастрофы с теплоёмкостью**".

Катастрофическое положение с теплоёмкостью удалось преодолеть в 1924 г. Френкелю привлечением к описанию кристаллического тела боровской теории атома.

Специфика металлов заключается в сравнительно небольшой величине **потенциала ионизации**, т. е. слабой связи электрона внешней орбиты с ядром. Таковую орбиту — вытянутый эллипс — Френкель называл "*кометоподобной*" из-за аналогии с орбитами комет. Таким образом, атомы металлов с геометрической точки зрения могут быть охарактеризованы значительным удалением внешнего электрона от ядра.

Например, в кристаллической решётке натрия расстояние между атомами равно $3,72 \text{ \AA}$, а максимальное удаление валентного электрона от ядра изолированного атома достигает $2,56 \text{ \AA}$. Понятно, что часть времени этот валентный электрон будет ближе к соседнему атому, чем к "своему" ядру.



Валентные электроны в металле принадлежат не конкретному атому, а всей решётке (продолжая в каждый момент времени принадлежать одному конкретному атому), и, попадая в сферу влияния других атомов

решётки, переходят от одного атома к другому — **блуждающие электроны Френкеля**.

Блуждающие электроны Френкеля, сменившие свободные электроны Друде—Лоренца, по образному выражению Френкеля, имеют только один род свободы — свободу перемены хозяина, переходя из рук в руки — от одного атома решётки к другому, т. е. становятся "*рабами коллектива*". По Френкелю в идеальной кристаллической решётке металла "*движение электрона может быть уподоблено движению точки по окружности колеса, катящегося по гладкой дороге. Вращательному движению колеса соответствует обращение электрона вокруг отдельных атомов, а поступательному — переход от одного атома к другому. В действительности расположение атомов даже в идеально чистом металле не бывает абсолютно правильным вследствие теплового движения. Последнее создаёт своеобразную "ухаби-стость" того трёхмерного поля, по которому катятся "электронные колёса"*". Этой ухаби-стости обязано своим происхождением *электрическое сопротивление* металлов, которое растёт с температурой: при этом увеличивается высота "ухабов" и их число.

В дальнейшем мы будем электроны проводимости в металлах называть не "свободными" или "блуждающими", а "**квазисвободными**"¹, тем самым точнее характеризуя их свойства (рис. 63).

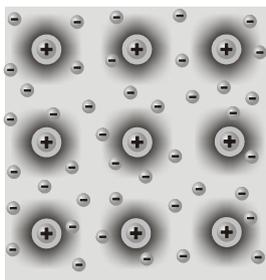


Рис. 63. Структура металлического кристалла: положительно заряженные ионы окружены квазисвободными электронами

Положительно заряженные ионы металла, образующие кристаллическую решётку, удерживаются вблизи положений равновесия силами взаимодействия с "газом квазисвободных электронов" (рис. 64).

¹ Квази... (от лат. quasi — якобы, как будто) — часть сложных слов, соответствующая по значению словам "мнимый", "ненастоящий", "почти", "близко".

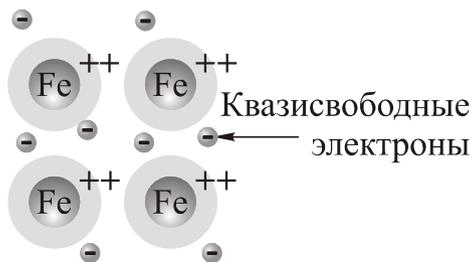


Рис. 64. Структура металлического кристалла железа

Развитие квантовой статистики и квантовой механики привело к появлению в 1928 г. квантостатистической теории электронного газа в металлах немецкого физика и математика Арнольда Зоммерфельда (Sommerfeld, 1868—1951 гг.) и зонной теории твёрдого тела, которые объяснили многие экспериментальные факты. Несмотря на это, классическую теорию благодаря простоте и наглядности можно использовать для качественных оценок кинетических явлений в металлах, и особенно в полупроводниках, где носители заряда подчиняются классической статистике.



Теория металлов Друде — приложение кинетической теории газов к электронному газу в металлах.

Контрольные вопросы

- ? Какие электрические заряды называют свободными?
- ? Какие частицы являются носителями свободных (квазисвободных) зарядов в металлах?

6.3. Электроёмкость проводника

Рассмотрим напряжённость поля вблизи поверхности произвольного заряженного металлического проводника, если заряды на нём находятся в равновесии. Выделим на поверхности проводника бесконечно малый элемент поверхности dS (рис. 65) и обозначим *поверхностную плотность заряда* на нём через σ .

В качестве замкнутой поверхности выберем, как мы это уже делали, поверхность прямого цилиндра с основанием dS и бесконечно малой высотой dh . В данном случае следует рассматривать бесконечно малый элемент поверхности проводника, так как в общем случае σ изменяется от точки к точке поверхности. Высота цилиндра должна быть также бесконечно малой, потому что в случае проводника произвольной формы линии смещения будут перпендикулярными к поверхности проводника только в непосредственной близости от неё.

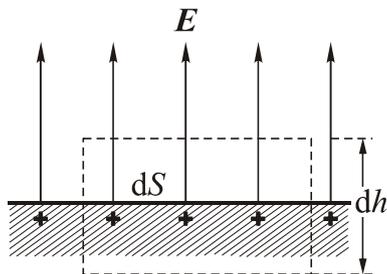


Рис. 65. Электрическое поле у поверхности заряженного проводника

В этом случае полный поток электрической индукции равен потоку через одно основание dS :

$$DdS = \sigma dS \Rightarrow \quad (186)$$

$$\Rightarrow D = \sigma,$$

$$E = \frac{1}{\epsilon_0} \sigma. \quad (187)$$



Значение *электрической индукции* D у поверхности проводника равняется поверхностной плотности заряда.

При действии электростатического поля E_0 на металлический проводник свободные носители заряда перемещаются в нём до тех пор, пока не произойдёт взаимная компенсация электростатических полей внешнего (действующего) и созданного переместившимися свободными зарядами (рис. 66):

$$E = E_0 + E' = 0. \quad (188)$$



В результате перемещения свободные заряды сосредоточатся в приповерхностной области так, что в объёме проводника электростатические поля E_0 и E' скомпенсируют друг друга, а E будет равняться нулю.

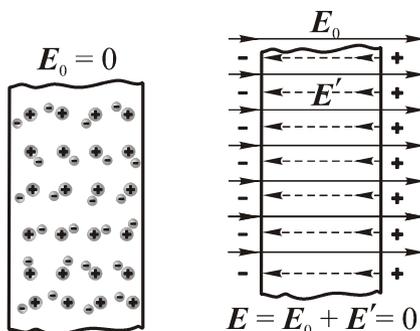


Рис. 66. Проводник в электростатическом поле E

Если бы удалось удалить внутренний объём проводника, оставив его оболочку, то соотношение электростатических полей вне и внутри проводника осталось бы неизменным, т. е.: $E = 0$.

Такую металлическую оболочку называют **экраном от электрических полей** (рис. 67).

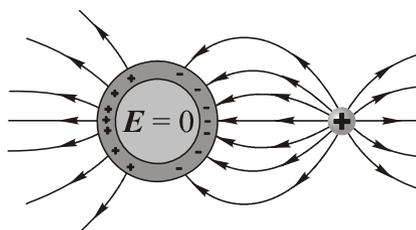


Рис. 67. Экран от внешних электрических полей



Металлический экран защищает внутреннее пространство от внешних электростатических полей.

По этой причине металлические экраны используют для защиты технических устройств и биосистем от действия внешних электростатических полей.

Экранирует ли замкнутая металлическая оболочка внешнее пространство от заряда (зарядов), находящихся внутри этой оболочки?

☞ Рассмотрим простой пример (рис. 68).

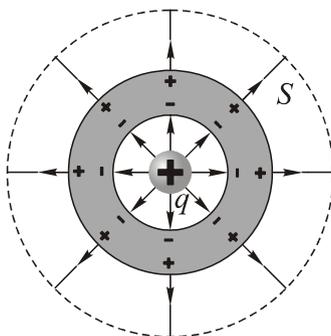


Рис. 68. Сферический металлический экран

Допустим, что внутри сферического металлического экрана находится положительный заряд $+q$. Под действием электростатического поля этого заряда в результате электризации на внутренней поверхности экрана локализируются отрицательные заряды, сумма которых по абсолютной величине равняется заряду q . На внешней поверхности экрана индуцируется положительный заряд, равный по абсолютному значению заряду, локализованному на внутренней поверхности экрана. Построим вокруг экрана замкнутую поверхность S и подсчитаем поток вектора \mathbf{E} через эту поверхность:

$$\oint_S \mathbf{E}_n dS = k_0 4\pi q \neq 0. \quad (189)$$

❖

Напряжённость \mathbf{E} электростатического поля заряда, находящегося внутри металлического экрана, отлична от нуля в окружающем экран внешнем пространстве. □

Если металлический экран соединить с поверхностью Земли, т. е. **заземлить** экран, то заряд с внешней поверхности экрана распределится по поверхности Земли так, что напряжённость электростатического поля металлического экрана устремится к 0.



Заземлённый замкнутый металлический экран защищает окружающее пространство от электростатического поля зарядов, находящихся в объёме, ограниченном экраном.

Если сообщить металлическому проводнику определённый заряд, то из-за взаимного отталкивания элементарных зарядов они будут двигаться по направлению к поверхности до установления равновесного состояния: движение зарядов прекратится тогда, когда внутри проводника напряжённость электростатического поля станет равной нулю, т. е. тогда, когда $E_0 = 0$:

$$E_0 = -\text{grad}\varphi_0 = -\frac{\partial\varphi_0}{\partial r} = 0, \quad (190)$$

$$\varphi_0 = \text{const}.$$

Согласно *теореме Гаусса* (см. разд. 3.3) внутри заряженного проводника:

$$\oint_S E_n dS = k_0 4\pi \sum_i q_i = 0, \quad (191)$$

так как:

$$\sum_i q_i = 0. \quad (192)$$



В заряженном проводнике свободные заряды локализуются у его поверхности.

Рассмотрим заряженный проводник, в котором заряд q распределён по поверхности так, что его *поверхностная плотность* на площадке dS равняется σ (рис. 69).

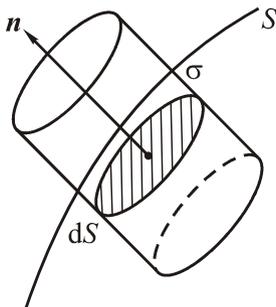


Рис. 69. Заряженный проводник

Поток вектора \mathbf{D} через поверхность цилиндра, построенного на основании dS , определяют соотношением:

$$d\Phi_D = \oint_S D_n dS = \oint_S \epsilon_a E_n dS = \epsilon_a \oint_S E_n dS = k_0 4\pi q \epsilon_a = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} 4\pi q \epsilon_0 \epsilon = \epsilon q = \epsilon \sigma dS. \quad (193)$$

Так как:

$$D_n = \epsilon_a E_n = \epsilon \sigma, \quad (194)$$

то:

$$E_n = \frac{\sigma}{\epsilon_0}. \quad (195)$$



Напряжённость электростатического поля заряженного проводника определяется поверхностной плотностью заряда.

Убедимся в этом на примере проводника, состоящего из двух сфер (большой и маленькой), соединённых между собой тонким проводником (рис. 70).

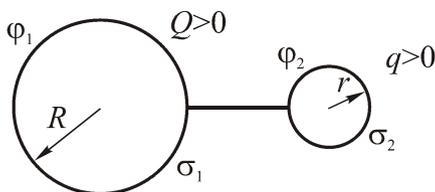


Рис. 70. Две проводящие сферы, соединённые тонким проводником

Пусть радиус большой сферы R и заряд на ней $Q > 0$. Потенциал электростатического поля этой сферы:

$$\varphi_1 = k_0 \frac{Q}{R}. \quad (196)$$

Пусть радиус маленькой сферы r и заряд на ней $q > 0$. Потенциал электростатического поля маленькой сферы:

$$\varphi_2 = k_0 \frac{q}{r}. \quad (197)$$

Так как сферы соединены между собой проводником, то их потенциалы одинаковы:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \varphi_2 \\ k_0 \frac{Q}{R} &= k_0 \frac{q}{r} \\ \frac{Q}{q} &= \frac{R}{r}.\end{aligned}\tag{198}$$

Учитывая, что напряжённость электростатического поля у поверхности заряженного проводника пропорциональна поверхностной плотности заряда:

$$E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon_0},\tag{199}$$

$$\sigma_1 = \frac{Q}{4\pi R^2},\tag{200}$$

$$\sigma_2 = \frac{q}{4\pi r^2},\tag{201}$$

получаем:

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{Qr^2}{qR^2} = \frac{Rr^2}{rR^2} = \frac{r}{R}, \text{ т. е.:}\tag{202}$$

$$E_{2n} = E_{1n} \frac{R}{r}.\tag{203}$$



Напряжённость электростатического поля заряженного проводника тем больше, чем меньше радиус его положительной кривизны.

Но напряжённость электростатического поля E пропорциональна поверхностной плотности заряда.



Поверхностная плотность заряда увеличивается с уменьшением радиуса положительной кривизны (выпуклость) и уменьшается с уменьшением радиуса отрицательной кривизны (вогнутость) поверхности проводника.

Плотность поверхностных зарядов заряженного проводника всегда высока у его остриёв (рис. 71). Это приводит к явлению "стекания" зарядов с металлических остриёв. Если по техническим требованиям необходимо зарядить сферический проводник возможно наибольшим зарядом, то проводник должен быть выполнен в виде идеальной сферы, т. е. не должен содержать неровностей.

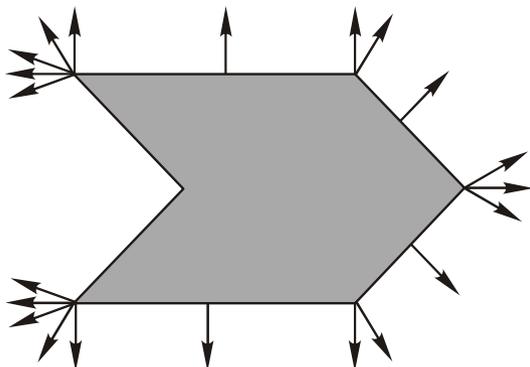


Рис. 71. Тело Колбе

Итак, напряжённость электрического поля около искривлённой проводящей поверхности тем больше, чем меньше радиус кривизны. *Напряжение*, приложенное к обычной швейной иголке, способно создать поле, в сотни раз более сильное, чем внутри плоского конденсатора с зазором между пластинами в 1 см. А если заменить иголку специально изготовленным остриём с радиусом закругления $1\,000\text{ \AA}$ и приложить к острию *напряжение* 1 000 В, то напряжённость поля достигнет $1\,000\,000\text{ В}\cdot\text{см}^{-1}$. Правда, область большой напряжённости поля около поверхности острия невелика — с удалением от него сетка *силовых линий* и *эквипотенциальных поверхностей* сильно редет.

Чем больше напряжённость поля, тем больше электронов вылетает из острия. В конечном итоге это приводит к гибели острия — в полях с напряжённостью $(6\text{—}7)\cdot 10^8\text{ В}\cdot\text{см}^{-1}$ оно расплавляется и затупляется. Если подать на остриё *напряжение* обратной полярности, безгранично возрастающий потенциальный барьер у поверхности острия будет надёжно запирает электроны внутри металла. Так у поверхности острия можно создать поле до $60\cdot 10^8\text{ В}\cdot\text{см}^{-1}$.

Пусть на металлическом проводнике, удалённом от других заряженных и незаряженных тел, находится заряд q . Этот заряд распределился по поверхности проводника так, что напряжённость его электростатического поля равняется:

$$E_{\text{внешн}} = E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}. \quad (204)$$

Для определённости считаем, что проводник — металлическая сфера с радиусом R . Потенциал его поверхности определяется величиной заряда q :

$$\varphi_R = k_0 \frac{q}{R}. \quad (205)$$

Следовательно, потенциал прямо пропорционален заряду проводника, а отношение заряда к потенциалу является постоянной величиной, характеризующей данный проводник:

$$\frac{q}{\varphi_R} = \frac{R}{k_0} = \text{const} \equiv C. \quad (206)$$

Эту характеристику проводника C называют его электроёмкостью.

Ёмкость электрическая (электроёмкость, ёмкость) — характеристика проводящего тела, мера его способности накапливать электрический заряд.

Электрическая ёмкость сферического проводника численно равняется заряду, который повышает его потенциал на единицу.



Ёмкостью C называется отношение сообщённого заряда q к возникающему в результате этого потенциалу φ .

Единицей электроёмкости проводников в системе СИ является **фарад**¹ (устаревшее название — фарада) (Φ , F) — ёмкость проводника, потенциал которого изменяется на 1 вольт при сообщении проводнику заряда в 1 кулон: $1 \Phi = 1 \text{ Кл} \cdot \text{В}^{-1}$.

Следует иметь в виду, что фарад — очень большая величина (шар с радиусом, равном земному, имеет ёмкость всего $7 \cdot 10^{-4} \Phi$). Чаще применяют доль-

¹ Названа в честь Фарадея.

ные единицы: микрофарад (мкФ, μF), равный 10^{-6} Ф, и пикофарад (пФ, pF), равный 10^{-12} Ф.

Ёмкость определяется геометрическими размерами проводника, его формой и электрическими свойствами окружающей среды (её диэлектрической проницаемостью) и не зависит от материала проводника.

Ёмкость проводника в однородной изотропной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ возрастает в ϵ раз:

$$C = \frac{R}{k_0} \epsilon. \quad (207)$$

В системе СГСЭ ёмкость уединённого проводящего шара в вакууме численно равна его радиусу:

$$C|_{\text{СГСЭ}} = R. \quad (208)$$

Поэтому единица электрической ёмкости в системе СГСЭ — сантиметр ёмкости (см): $1 \text{ Ф} = 8,99 \cdot 10^{11} \text{ см} = 10^{-9} \text{ ед. СГСМ}$ (табл. 24).

Таблица 24. Соотношения между единицами электрической ёмкости

Единица	Ф	см	СГСМ
1 Ф	1	$8,99 \cdot 10^{11}$	10^{-9}
1 см	$1,11 \cdot 10^{-12}$	1	$1,11 \cdot 10^{-21}$
1 СГСМ	10^9	$8,99 \cdot 10^{20}$	1

В СИ ёмкость проводящего шара, расположенного в диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ϵ , равна:

$$C = 4\pi\epsilon_a R. \quad (209)$$

В общем случае ёмкость геометрически подобных проводящих тел пропорциональна их линейным размерам.

Контрольные вопросы

- ? Что происходит в металле, помещённом в электрическое поле?
- ? На каком принципе основана электростатическая защита?

- ? Над громоотводом проходит отрицательно заряженная туча. Объясните на основании электронных представлений, почему на острие громоотвода возникает заряд? Каков его знак?
- ? Что такое электрическая ёмкость?
- ? Что называют электроёмкостью уединённого проводника и от чего она зависит? Какая формула выражает сущность этого понятия? Влияет ли среда на электроёмкость проводника?
- ? Напишите формулу электроёмкости шара.
- ? Назовите единицу электроёмкости в СИ. Сформулируйте определение этой единицы.

6.4. Конденсаторы

Конденсатор электрический — устройство, предназначенное для получения нужных величин электрической ёмкости и способное накапливать и отдавать (перераспределять) электрические заряды.

Два проводника, между которыми существует разность потенциалов, а все линии электрической индукции (*линии смещения*), исходящие из одного проводника, заканчиваются на другом, называют **простым конденсатором**.

Простым конденсатором является *шаровой конденсатор*, состоящий из двух проводников в виде концентрических сфер, несущих противоположные заряды.

Две параллельные проводящие пластины (*плоский конденсатор* (см. разд. 3.6)) также можно считать простым конденсатором, если расстояние между пластинами мало по сравнению с их размерами.

Простым конденсатором является и *цилиндрический конденсатор*, если длина цилиндров велика по сравнению с зазором между ними.

Оба проводника, образующие конденсатор, называют *обкладками конденсатора*.



Конденсатор состоит из двух (иногда более) проводящих тел (обкладок), разделённых диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников.

Так как линии смещения начинаются и заканчиваются на электрических зарядах, то отсюда следует, что заряды, находящиеся на обкладках простого конденсатора, всегда равны по величине и разноимённы по знаку.

Как правило, расстояние между обкладками, равное толщине диэлектрика, мало по сравнению с линейными размерами обкладок. Поэтому электрическое поле заряженного конденсатора практически полностью сосредоточено между обкладками.

Электрической ёмкостью (электроёмкостью) конденсатора или просто его **ёмкостью** C называют физическую величину, равную отношению заряда q , накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$ между его обкладками:

$$C \equiv \frac{q}{(\varphi_1 - \varphi_2)}. \quad (210)$$

Обозначим через C_0 ёмкость любого конденсатора, когда его обкладки находятся в вакууме. Пусть C — ёмкость того же конденсатора, если всё пространство между его обкладками заполнено каким-либо однородным диэлектриком. Тогда:

$$\frac{C}{C_0} = \varepsilon, \quad (211)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика.



Ёмкость конденсатора зависит от его размеров, формы и от свойств среды, находящейся между его обкладками.

Конденсаторы применяются в радиотехнике, электронике, электротехнике и т. д. (электрические цепи (сосредоточенные ёмкости), электроэнергетика (компенсаторы реактивной мощности), импульсные генераторы напряжения, измерительные цели (измерительные конденсаторы и ёмкостные датчики)).

Реальные конденсаторы представляют собой устройства из двух или более подвижных или неподвижных электродов (обкладок), разделённых слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок.

В зависимости от типа диэлектрика, материала обкладок и конструктивного исполнения различают:

- **бумажные конденсаторы** (обкладки выполнены из тонких лент фольги, а в качестве диэлектрика используется бумага, пропитанная твёрдым расплавленным (церезин, хлорнафталин) или жидким (изоляционное масло, совол) диэлектриком) — 100 кВ, 100 пФ — 10 мкФ;
- **воздушные конденсаторы** (диэлектриком служит воздух) — 1 кВ, 10—1 000 пФ;
- **керамические конденсаторы** (в качестве диэлектрика используется керамика) — 10 кВ, 1 пФ — 10 мкФ;
- **плёночные конденсаторы** (диэлектриком служит тонкая плёнка полистирола, полиэтилена, фторопласта и др.) — 0,1—10 кВ, 1 000 пФ — 1 мкФ;
- **слюдяные конденсаторы** (диэлектриком служит листовая слюда, а обкладками — фольга или слой напылённого на слюду металла) — 10 кВ, 10 пФ — 1 мкФ;
- **электролитические конденсаторы** (одной из обкладок служит электролит, а другой — металлическая пластинка (алюминий и др.), покрытая оксидным слоем) — 0,1—5 000 мкФ.

Электрические конденсаторы бывают постоянной и переменной ёмкости.

Вариконд¹ — сегнетокерамический конденсатор с резко выраженной нелинейной зависимостью ёмкости от приложенного к его обкладкам электрического *напряжения*. Ёмкость вариконда (номинальная) от 10 пФ до 1 мкФ с кратностью изменения 2—20. Применяется в устройствах автоматики и радиоэлектроники.

Контрольные вопросы

- ? Что называют конденсатором?
- ? Что называют зарядом конденсатора?

¹ Англ. varicond, от variable — переменный и condenser — конденсатор.

6.5. Ёмкость простых конденсаторов и двухпроводной линии

Для вычисления ёмкостей конденсаторов простой формы предполагают, что на каждой из обкладок находится некоторый заряд q , и вычисляют потенциал в электрическом поле рассматриваемого конденсатора. Далее вычисляется значение *напряжения* между обкладками и ёмкость конденсатора.

6.5.1. Плоский конденсатор

Существуют электрические системы, обладающие электроёмкостью, которая не зависит от присутствия других тел. Примером такой системы является плоский электрический конденсатор.

Плоский конденсатор представляет собой систему из двух металлических пластин площадью S , расположенных параллельно на малом расстоянии d друг от друга (рис. 72).

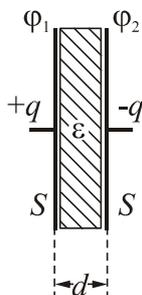


Рис. 72. Плоский конденсатор

Пусть зазор между пластинами d мал по сравнению с их размерами. Если одной из пластин сообщить заряд $+q$, то из-за электризации на другой пластине появится заряд $-q$.

Если на единице поверхности обкладок имеется заряд σ и диэлектриком является вакуум, то полное *напряжение* между обкладками равняется:

$$U = \frac{\sigma}{\epsilon_0} d, \quad (212)$$

где U — *напряжение* между пластинами; d — расстояние между пластинами.

Если площадь каждой пластины равна S , то полный заряд пластины есть $q = \sigma S$. Поэтому:

$$C = \frac{q}{U} = \epsilon_0 \frac{S}{d}. \quad (213)$$

Если диэлектриком является не вакуум, а вещество с диэлектрической проницаемостью ϵ , заполняющее пространство между обкладками, то электроёмкость будет в ϵ раз больше:

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d} \text{ (СИ)}. \quad (214)$$



Электроёмкость плоского конденсатора пропорциональна площади его пластин S , обратно пропорциональна расстоянию d между пластинами и определяется диэлектрической проницаемостью вещества, находящегося между пластинами.

При уменьшении расстояния d между обкладками ёмкость увеличивается.

6.5.2. Шаровой конденсатор

Если на обкладках *шарового конденсатора* имеется заряд q , то *напряжение* между обкладками в вакууме определяется по формуле $U = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q}{\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)}$, где a и b — радиусы внутренней и внешней обкладок. Поэтому ёмкость в вакууме:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{4\pi \epsilon_0}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b}}. \quad (215)$$

Если внешний радиус b гораздо больше внутреннего радиуса a , то формула упрощается:

$$C = 4\pi \epsilon_0 a. \quad (216)$$

Этот результат справедлив и в том случае, если внешняя обкладка имеет произвольную форму, при условии, что её размеры намного больше радиуса

внутренней сферы. В таком случае часто говорят о **ёмкости уединённого шара**, хотя это выражение всегда обозначает ёмкость конденсатора, у которого роль внешней обкладки играют удалённые предметы с одинаковым потенциалом.

Если величина зазора между обкладками $b - a = d$ весьма мала по сравнению со средним радиусом сфер r , то (215) можно представить в следующем виде:

$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{ab}{b-a} \approx 4\pi\epsilon_0 \frac{r^2}{d} = \epsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (217)$$

где $S = 4\pi r^2$ — площадь поверхности обкладок.



При малой величине зазора выражения для ёмкости сферического и плоского конденсатора совпадают.

6.5.3. Цилиндрический конденсатор

Рассмотрим конденсатор, состоящий из двух коаксиальных цилиндров с радиусами a (внутренний) и b (внешний). Длину цилиндров будем считать весьма большой по сравнению с зазором между ними. *Напряжение* между обкладками:

$$U = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{q}{a} \ln \frac{b}{a}, \quad (218)$$

где q — заряд на единицу длины цилиндров. Поэтому ёмкость цилиндрического конденсатора в вакууме на каждую единицу длины равна:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{b}{a}}. \quad (219)$$

Эта формула выражает, в частности, ёмкость коаксиального кабеля, состоящего из металлического провода, окружённого слоем диэлектрика и металлической оплёткой (при этом (219) следует умножить ещё на диэлектрическую проницаемость ϵ диэлектрика).

Если расстояние между цилиндрами $b - a = d$ малó по сравнению с их радиусами, то (219) упрощается.

В этом случае $\ln \frac{b}{a}$ можно разложить в ряд и ограничиться только членом первого порядка:

$$\ln \frac{b}{a} = \ln \left(1 + \frac{d}{a} \right) \approx \frac{d}{a} \Rightarrow \quad (220)$$

$$\Rightarrow C = \frac{2\pi\epsilon_0}{d/a} = \frac{\epsilon_0 S}{d}. \quad (221)$$

6.5.4. Двухпроводная линия

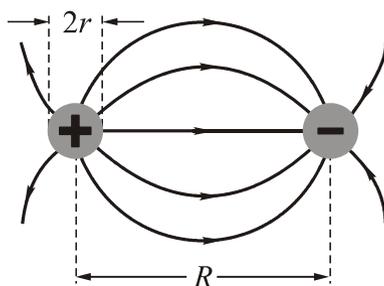


Рис. 73. Электрическое поле двухпроводной линии

Ёмкость двухпроводной линии (рис. 73) на каждую единицу длины:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{R}{r}}. \quad (222)$$

Контрольные вопросы

? Что называют электроёмкостью двух проводников?

6.6. Размерность абсолютной диэлектрической проницаемости в СИ

Понятие электрической ёмкости используют в системе СИ для определения единицы измерения *абсолютной диэлектрической проницаемости* ϵ_0 .

Пользуясь, например, формулой (209) ($C = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d}$), имеем:

$$\epsilon_0 = \frac{Cd}{\epsilon S} \text{ (СИ)}. \quad (223)$$

Отсюда единица ϵ_0 в СИ — $1 \text{ (Ф} \cdot \text{м)} \cdot \text{м}^{-2} = 1 \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ ("фарад на метр").

6.7. Энергия заряженного конденсатора

Пусть на поверхности уединённого проводника находится заряд q , а потенциал равен φ . Перенесём на поверхность проводника дополнительный элементарный заряд dq . Работа, выполненная внешними силами по перенесению этого заряда из бесконечности на поверхность проводника, равняется:

$$\delta A_{\text{внешн}} = dq\varphi. \quad (224)$$

Так как заряд dq мал, то его перенесение на поверхность заряженного проводника лишь незначительно изменит его потенциал на $d\varphi$, а связь между ними:

$$dq = Cd\varphi, \quad (225)$$

где C — электрическая ёмкость проводника.

Тогда работа внешних сил $\delta A_{\text{внешн}}$ будет равняться:

$$\delta A_{\text{внешн}} = C d\varphi \varphi = C \varphi d\varphi. \quad (226)$$

Работа $A_{\text{внешн}}$ внешних сил по перенесению всех элементарных зарядов dq на поверхность проводника равняется:

$$\delta A_{\text{внешн}} = \int_{\varphi} C \varphi d\varphi = \frac{1}{2} C \varphi^2. \quad (227)$$

Работа $A_{\text{внешн}}$, выполненная внешними силами по перенесению всех зарядов dq на поверхность проводника, идёт на приращение потенциальной энергии $E_{\text{п}}$ заряженного проводника:

$$A_{\text{внешн}} = +\Delta E_{\text{п}}. \quad (228)$$

Следовательно, потенциальная энергия заряженного проводника равняется:

$$E_{\text{п}} \equiv W = \frac{1}{2} C \varphi^2 = \frac{1}{2} q \varphi = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}. \quad (229)$$

Таблица 25. Аналогии между механическими и электрическими физическими величинами

Механика	Электричество	
Кинетическая энергия движущегося тела: $E_{\text{к}} = \frac{1}{2} m v^2,$ где m — масса тела; v — скорость	Потенциальная энергия сжатой пружины: $E_{\text{п}} = \frac{1}{2} k x^2,$ где k — жёсткость пружины; x — абсолютное удлинение	Собственная (потенциальная) энергия конденсатора: $W = \frac{1}{2} \frac{1}{C} q^2,$ где C — электрическая ёмкость; q — электрический заряд

Энергия системы зарядов:

$$W = \frac{1}{2} \sum_i q_i \varphi_i. \quad (230)$$

Рассмотрим *плоский конденсатор* с помещённым между его пластинами диэлектриком ($\epsilon > 1$). Энергия плоского конденсатора:

$$W = \frac{1}{2} C \varphi^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_a S}{d} (Ed)^2 = \frac{1}{2} \epsilon_a S d E^2 = \frac{1}{2} \epsilon_a E^2 V, \quad (231)$$

где V — объём диэлектрика.

Объёмная плотность электрической энергии, т. е. энергия единицы объёма электростатического поля в конденсаторе равна:

$$w_e = \frac{E_{\text{п}}}{V} = \frac{1}{2} \epsilon_a E^2. \quad (232)$$



Объёмная плотность энергии электростатического поля в конденсаторе прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости его диэлектрика и квадрату напряжённости электростатического поля.

Контрольные вопросы

- ? Напишите формулы для расчёта энергии заряженного конденсатора.
- ? Чему равна объёмная плотность энергии электростатического поля?

6.8. Соединения конденсаторов

Электрические конденсаторы часто включаются группами (в виде батарей). При присоединении нескольких конденсаторов друг к другу различают параллельное (рис. 74) и последовательное (рис. 75) их соединения.

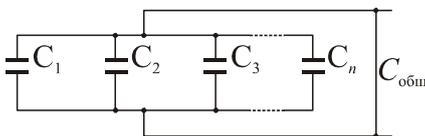


Рис. 74. Параллельное соединение конденсаторов:

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 74) одна из пластин каждого конденсатора имеет один и тот же потенциал φ_1 , а другая φ_2 . На пластинах каждого конденсатора находится заряд q_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), так что суммарный заряд всех конденсаторов равняется:

$$q = \sum_i q_i = \sum_i C_i (\varphi_1 - \varphi_2) = (\varphi_1 - \varphi_2) \sum_i C_i. \quad (233)$$

Отсюда следует:

$$\begin{aligned} \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} &= \sum_i C_i, \\ C_{\text{общ}} &= \sum_i C_i. \end{aligned} \quad (234)$$



При параллельном соединении конденсаторов их электроёмкости суммируются.

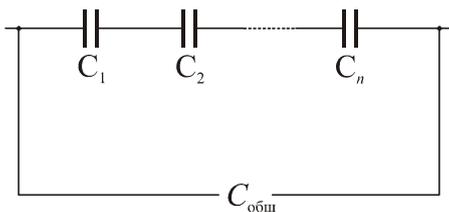


Рис. 75. Последовательное соединение конденсаторов: $\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 75) под влиянием приложенной разности потенциалов их пластины электризуются так, что на них появляются равные, но противоположные по знаку заряды q . Разности потенциалов пластин каждого конденсатора суммируются (пусть $n = 3$):

$$\varphi_1 - \varphi_4 = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + (\varphi_3 - \varphi_4) = q \frac{1}{C_1} + q \frac{1}{C_2} + q \frac{1}{C_3} = q \sum_i \frac{1}{C_i}. \quad (235)$$

Следовательно:

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \sum_i \frac{1}{C_i}. \quad (236)$$



При последовательном соединении конденсаторов суммируются величины, обратные их ёмкостям, т. е. суммарная ёмкость уменьшается.

Контрольные вопросы

- ? Как рассчитать ёмкость при параллельном и последовательном соединении конденсаторов?

6.9. Энергия электрического поля системы разделённых неподвижных зарядов

При создании системы разделённых неподвижных зарядов совершается работа внешними силами для размещения зарядов в заданных точках r_i про-

странства. Подсчитаем потенциальную энергию такой системы. Рассмотрим начнём с простейшей системы, состоящей из двух разделённых неподвижных зарядов q_1 и q_2 , находящихся в точках 1 и 2 на расстоянии r_{12} друг от друга.

Работа внешних сил по перемещению первого заряда q_1 (в отсутствии второго заряда) из бесконечности в точку 1 равняется нулю, так как первоначальное электростатическое поле отсутствует, и потенциал поля в этой точке равняется нулю:

$$\begin{aligned} A_{\infty 1} &= q_1 (\varphi_1 - \varphi_{\infty}), \\ \varphi_1 &= \varphi_{\infty} = 0, \\ A_{\infty 1} &= 0. \end{aligned} \quad (237)$$

Перенесём заряд q_2 из бесконечности в точку 2, расположенную на расстоянии r_{12} от заряда q_1 . Работа внешних сил по перемещению заряда q_2 из бесконечности в точку 2, в которой присутствует электростатическое поле заряда q_1 , равняется:

$$A_{\text{внешн}} = q_2 (\varphi_{12} - \varphi_{\infty}), \quad (238)$$

где $\varphi_{12} = k_0 \frac{q_1}{r_{12}}$, $\varphi_{\infty} = 0$. Поэтому:

$$\begin{aligned} A_{\text{внешн}} &= k_0 q_2 \frac{q_1}{r_{12}}, \\ A_{\text{внешн}} &= -A_{\text{сист}}, \\ A_{\text{сист}} &= -\Delta E_{\text{п}}. \end{aligned} \quad (239)$$

По определению:

$$\begin{aligned} \varphi_{21} &= k_0 \frac{q_2}{r_{21}}, \\ |r_{21}| &= |r_{12}|. \end{aligned} \quad (240)$$

Потенциальную энергию системы из двух разделённых неподвижных зарядов можно представить в виде:

$$E_{\text{п2}} = k_0 q_2 \frac{q_1}{r_{12}} = \frac{1}{2} k_0 q_1 \frac{q_2}{r_{21}} + \frac{1}{2} k_0 q_2 \frac{q_1}{r_{12}} = \frac{1}{2} q_1 \varphi_{21} + \frac{1}{2} q_2 \varphi_{12} = \frac{1}{2} (q_1 \varphi_{21} + q_2 \varphi_{12}). \quad (241)$$

Подсчитаем потенциальную энергию системы из трёх разделённых неподвижных зарядов q_1 , q_2 и q_3 . Эту систему создадим, внося из бесконечности в систему из двух зарядов третий заряд q_3 . Работа внешних сил по перемещению заряда q_3 из бесконечности в точку 3 электростатического поля, создаваемого двумя зарядами q_1 и q_2 , равняется:

$$A_{\text{внешн}} = q_3 (\Phi_3 - \Phi_\infty). \quad (242)$$

Потенциал Φ_3 электростатического поля двух точечных зарядов q_1 и q_2 в точке 3, где находится заряд q_3 , равен:

$$\Phi_3 = k_0 \frac{q_1}{r_{13}} + k_0 \frac{q_2}{r_{23}}. \quad (243)$$

Следовательно, работа внешних сил по перемещению заряда q_3 из бесконечности в точку поля 3 равняется:

$$A_{\text{внешн}} = q_3 \Phi_3 = q_3 \left(k_0 \frac{q_1}{r_{13}} + k_0 \frac{q_2}{r_{23}} \right). \quad (244)$$

Потенциальная энергия системы из трёх разделённых неподвижных зарядов q_1 , q_2 и q_3 , расположенных в точках 1, 2 и 3, будет равняться:

$$\begin{aligned} E_{\text{п3}} &= \frac{1}{2} k_0 \frac{q_1 q_2}{r_{21}} + \frac{1}{2} k_0 \frac{q_2 q_1}{r_{12}} + \frac{1}{2} k_0 \frac{q_3 q_1}{r_{13}} + \frac{1}{2} k_0 \frac{q_3 q_2}{r_{32}} = \\ &= \left(\frac{1}{2} k_0 \frac{q_1 q_2}{r_{21}} + \frac{1}{2} k_0 \frac{q_2 q_1}{r_{12}} \right) + \left(\frac{1}{2} k_0 \frac{q_3 q_1}{r_{13}} + \frac{1}{2} k_0 \frac{q_1 q_3}{r_{21}} \right) + \left(\frac{1}{2} k_0 \frac{q_3 q_2}{r_{23}} + \frac{1}{2} k_0 \frac{q_2 q_3}{r_{32}} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \left[q_1 \left(k_0 \frac{q_2}{r_{21}} + k_0 \frac{q_3}{r_{31}} \right) + q_2 \left(k_0 \frac{q_1}{r_{12}} + k_0 \frac{q_3}{r_{32}} \right) + q_3 \left(k_0 \frac{q_1}{r_{13}} + k_0 \frac{q_2}{r_{23}} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{2} (q_1 \Phi_1 + q_2 \Phi_2 + q_3 \Phi_3). \end{aligned} \quad (245)$$

Этот результат можно обобщить на систему из n разделённых неподвижных зарядов:

$$E_{\text{пн}} = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^n q_m \Phi_m = \frac{1}{2} k_0 \sum_{m=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{q_m q_i}{r_{im}}, \quad (246)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$; $m = 1, 2, 3, \dots$; $i \neq m$.

Известно, что устойчивому состоянию системы соответствует минимум потенциальной энергии: $\frac{\partial E_{\text{п}}}{\partial r} = 0$. Система из n точечных разделённых неподвижных зарядов не удовлетворяет этому требованию, так как:

$$\frac{\partial E_{\text{п}}}{\partial r} \sim \frac{q_m q_i}{r_{im}}. \quad (247)$$



Электростатическая система из разделённых точечных зарядов неустойчива при любом их взаимном расположении.

Полученный результат для энергии системы неподвижных электрических зарядов можно использовать только в том случае, если заряды разделены, т. е. находятся на некотором расстоянии друг от друга. В случае неподвижных поверхностных или объёмных зарядов формула для энергии таких систем принимает иной вид. В таких случаях систему макроскопических зарядов необходимо рассматривать как совокупность элементарных поверхностных или объёмных зарядов:

$$q_i = \sigma dS \quad (248)$$

или:

$$q_i = \rho dV. \quad (249)$$

Тогда потенциальная энергия систем с равномерным распределением неподвижных зарядов будет, соответственно, равняться:

$$E_{\text{п}\sigma} = \frac{1}{2} \int_S \sigma \phi dS, \quad (250)$$

$$E_{\text{п}\rho} = \frac{1}{2} \int_V \rho \phi dV, \quad (251)$$

где ϕ — потенциал электростатического поля, созданного всеми элементарными зарядами в данной точке поля.

Полную энергию сложной системы, состоящей из неподвижных поверхностных и объёмных зарядов, вычисляют по формуле:

$$E_{\text{п}} = \frac{1}{2} \left(\int_S \sigma \phi dS + \int_V \rho \phi dV \right). \quad (252)$$

В этой формуле под φ подразумевают не только потенциал, создаваемый поверхностными и объёмными зарядами, но учитывают и их взаимодействие между собой.

6.10. Энергия поляризованного диэлектрика

Плотность энергии электрического поля:

$$w_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 \text{ (СИ)}, \quad (253)$$

$$w_e = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi} E^2 \text{ (гауссова система)}.$$

Так как напряжённость электростатического поля E и электрическая индукция D связаны между собой соотношением $D = \varepsilon_a E$, то выражение (253) для *объёмной плотности энергии электростатического поля в конденсаторе* можно представить в виде:

$$w_e = \frac{\varepsilon_a E^2}{2} = \frac{ED}{2} = \frac{E(\varepsilon_0 E + P)}{2} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{EP}{2}. \quad (254)$$

Первое из этих слагаемых соответствует объёмной плотности энергии электростатического поля в вакууме, а второе — энергии единицы объёма поляризованного изотропного диэлектрика.

Энергию, затраченную на создание электростатического поля в единице объёма в поляризованном изотропном диэлектрике, называют **энергией поляризованного диэлектрика**.

Энергия поляризованного диэлектрика определяется работой сил электростатического поля по поляризации (смещению) связанных зарядов диэлектрика. Элементарная работа равняется:

$$\delta A = \sigma'_+ E dI_+ + \sigma'_- E dI_-. \quad (255)$$

Так как индуцированные полем заряды σ'_+ и σ'_- равны по величине ($|\sigma'_+| = |\sigma'_-| = \sigma'$), но противоположны по знаку, то:

$$\delta A = \sigma'_+ (dI_+ + dI_-) E = \sigma' dIE. \quad (256)$$

Учитывая, что в единице объёма изотропного диэлектрика индуцированный полем электрический дипольный момент численно равняется величине вектора поляризации $\sigma dL = dP = \epsilon_0 \chi_e dE$, получаем:

$$\delta A = EdP = E\epsilon_0 \chi_e dE = \epsilon_0 \chi_e EdE = d\left(\frac{\epsilon_0 \chi_e E^2}{2}\right) = d\left(\frac{EP}{2}\right). \quad (257)$$

Следовательно, полная работа по поляризации единицы объёма изотропного диэлектрика равняется:

$$A = \int \delta A = \int_0^E \epsilon_0 \chi_e EdE = \epsilon_0 \chi_e \int_0^E EdE = \epsilon_0 \chi_e \frac{E^2}{2} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \chi_e EdE = \frac{1}{2} PE. \quad (258)$$



Энергия единицы объёма поляризованного в электростатическом поле изотропного диэлектрика определяется величиной вектора напряжённости \mathbf{E} этого поля и величиной вектора поляризации \mathbf{P} диэлектрика.

ГЛАВА 7

Электрический ток в металлах

Имена Гальвани и Вольты почитаются всем культурным миром как имена учёных, своим долголетним и упорным трудом прошедших первый, самый трудный этап в истории электротехники.

В. Ф. Миткевич¹

7.1. Электрический ток

Если левой рукой взяться за один конец оголённого провода, а правой рукой взяться за второй конец оголённого провода, Вы поймёте, отчего загорается лампочка.

С. Т. Альтов²

Первый этап в развитии учения об электричестве относят к XVIII в. Он заключался в исследовании законов взаимодействия электрических зарядов (см. разд. 1.1). В конце XVIII в. и в первой половине XIX в. началось изучение действий электрического тока — исследовались химические, тепловые и магнитные его действия.

¹ Владимир Фёдорович Миткевич (1872—1951 гг.) — советский электротехник.

² Семён Теодорович Альтов (род. в 1945 г.) — российский писатель-юморист.

В ноябре 1780 г. профессор анатомии в Болонье Луиджи Гальвани (Galvani, 1737—1798 гг.), экспериментируя с мышцами лягушки, заметил, что сокращение мышц происходит в момент разряда электростатической машины, которая находилась в его лаборатории. Он установил, что сокращение мышцы происходит и без разряда, в момент контакта с мышцей различных пар металлов.

Вольта, ознакомившись с описанием опытов Гальвани, повторил их и убедился, что ответственными за эффект действительно является пара различных металлов, которая замыкается жидкостью в мышце лягушки. В подтверждение этого Вольта провёл опыты с парами различных металлов, используя вместо мышц воду или слабый раствор кислоты. Вольта брал две монеты из разных металлов и клал их себе в рот — одну на язык, другую — под язык. Когда Вольта соединял монеты проволочкой, он чувствовал солонватый вкус.

Эффект появления электричества подтвердился, и в 1794 г. Вольта писал: *"...электрический флюид гонится в это влажное тело или к самой воде от самих металлов"*. Правда, ещё в 1752 г. швейцарский философ и математик Иоганн Георг Зульцер (Sulzer, 1720—1779 гг.) опубликовал результат своего эксперимента: *"Если два куска металла, один — оловянный, другой — серебряный, соединить... и если приложить их к языку, то последний будет ощущать некоторый вкус, довольно похожий на вкус железного купороса, в то время как каждый кусок металла в отдельности не даёт и следа этого вкуса"*.

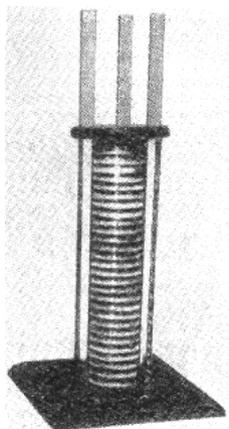


Рис. 76. Фотография вольтова столба, изготовленного самим Вольта. Столб уничтожен во время пожара в 1901 г. [31]

Поставив друг на друга свыше ста цинковых и серебряных кружков, разделённых бумагой, смоченной солёной водой, Вольта получил мощный источник электричества, названный современниками "**вольтовым столбом**" (рис. 76).

Вскоре Вольта сделал ещё одно изобретение — электрическую батарею, названную "*короной сосудов*" и состоявшую из многих последовательно соединённых цинковых и медных пластин, опущенных попарно в сосуды с разбавленной кислотой. В 1800 г. во Французском национальном институте Вольта продемонстрировал свои опыты с электричеством императору Франции Наполеону I Бонапарту (Napoléon, 1769—1821 гг.) (рис. 77) и сообщил о своих исследованиях Лондонскому королевскому обществу.

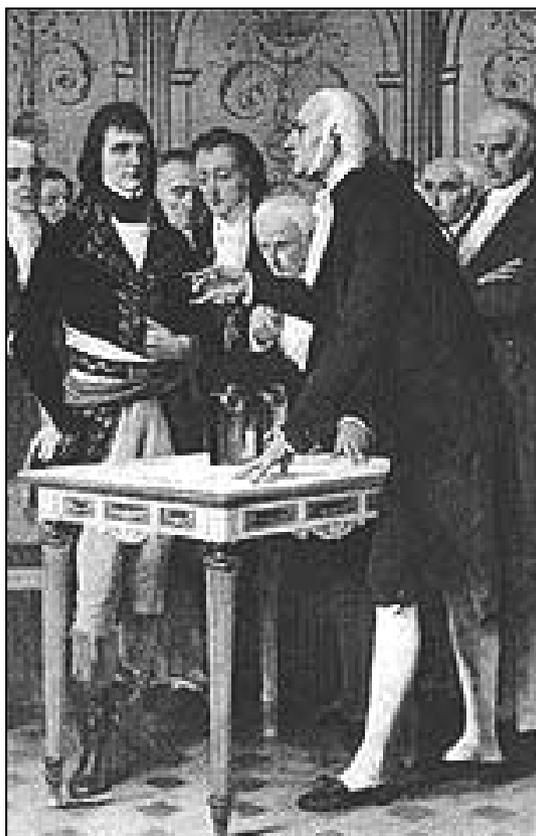


Рис. 77. Вольта демонстрирует Наполеону опыты с электричеством

Изучая действие вольтова столба, профессор физики Петербургской медико-хирургической академии Василий Владимирович Петров (1761—1834 гг.) установил, что действие, производимое столбом, зависит не только от числа пар различных металлов, размеров пластин, но и от внешней части цепи. В 1803 г. в Санкт-Петербурге вышла из печати монография Петрова *"Известие о гальвани-вольтовых опытах, которые производил профессор физики Василий Петров, посредством огромной наипаче батареи, состоявшей иногда из 4 200 медных и цинковых кружков..."*, в которой было дано подробное описание выполненных им экспериментов с первым в мире источником постоянного тока высокого напряжения, в 100 с лишним раз превосходившим существовавшие ранее столбы.

Батарея Петрова была готова в апреле 1802 г. Она представляла собой деревянный ящик длиной около 3 м с 4 200 медных и цинковых кружков диаметром 35 мм и толщиной около 2,5 мм, размещёнными горизонтально в четыре ряда. Дно и стенки ящика тщательно изолировались толстым слоем лака и промасленной бумагой. Между каждой парой металлических пластин прокладывались картонные или суконные кружочки, смоченные раствором нашатыря. Таким образом, фактически это была батарея со сравнительно большим внутренним сопротивлением, составленная из 2 100 медно-цинковых элементов, соединённых последовательно. ЭДС батареи составляла 1 650—1 700 В. Максимальный ток, который могла давать батарея, колебался в пределах 0,1—0,15 А.

Монография Петрова стала первой публикацией на русском языке, в которой были подробно проанализированы все известные и вновь открытые электрические явления. Петров подчёркивал, что он подготовил книгу *"...наипаче для пользы тех читателей, которые... живут в отдалённых от обеих столиц местах и которые не имели случая приобрести нужного понятия о сих предметах"*. Советский академик Сергей Иванович Вавилов (1891—1951 гг.) писал, что труды Петрова, *"...напечатанные на русском языке, оставались неизвестными за границей потому, что там не понимали русского языка, а в России — потому, что не понимали сути дела..."*.

В 1810 г. английский химик и физик Гемфри Дэви (Davy, 1778—1829 гг.), не зная об исследованиях Петрова, выполнил опыты с батареей из 2 000 элементов и получил аналогичные результаты.

Электрический ток — направленное (упорядоченное) движение носителей электрических зарядов (электронов, ионов, дырок и т. п.). Условием существ-

ования электрического тока в материальной среде (твёрдой, жидкой или газообразной) является наличие свободных носителей заряда.

Носители заряда (носители тока) — заряженные частицы (или квазичастицы), обуславливающие прохождение электрического тока через данное вещество. В газе носители заряда — электроны и ионы. Чаще термин "носители заряда" применяют в физике твёрдого тела. В твердотельных проводниках носители заряда — электроны проводимости и дырки.

Постоянный ток — электрический ток, не изменяющийся во времени ни по силе, ни по направлению.

Переменный ток — электрический ток, периодически изменяющийся по силе и направлению. В широком смысле — всякий ток, изменяющийся во времени.

Помимо разделения электрического тока на переменные токи и постоянные токи, до некоторой степени условно различают токи проводимости и конвекционные токи.

Направлением тока исторически принято считать направление движения положительных зарядов¹ (рис. 78, 79).

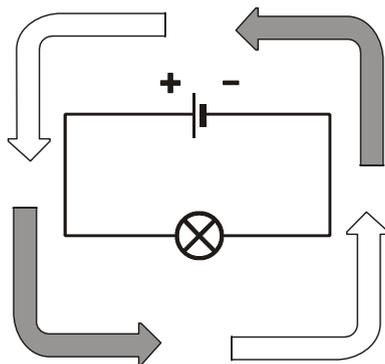


Рис. 78. Направление постоянного тока

Линии тока — линии, вдоль которых движутся заряженные частицы. **Направление линий тока** — направление движения положительных зарядов.

¹ Франклин, не зная о существовании отрицательно заряженных электронов, наугад принял, что тело, которое накапливает электричество, заряжается положительно.

Контрольные вопросы

- ? Что называют электрическим током?
- ? Какое направление тока принимают за положительное?
- ? Какой ток называют постоянным?

7.2. Опытная проверка электронного характера проводимости металлов

Я прожил большую жизнь, но другого такого человека не встречал. Мандельштам — редчайшая личность. Такое сочетание могучего интеллекта с поразительной человечностью и чистотой!

И. Е. Тамм¹

Если бы при электрическом токе происходило движение ионов, то электрический ток в металлах должен был бы обязательно сопровождаться переносом вещества металла. В **опытах Рике** электрический ток проходил в течение года через три поставленных друг на друга цилиндра — медный, алюминиевый и опять медный. Несмотря на то, что общий заряд, прошедший через цилиндры, достигал огромного значения около 3,5 миллиона кулонов, никакого проникновения металлов друг в друга обнаружено не было, и масса цилиндров сохранялась с точностью до $\pm 0,03$ мг.

Идею интересных опытов, подтверждающих электронный характер проводимости металлов, разъясняет рис. 79. Представим себе кусок незаряженного (электронейтрального) металла, движущийся с постоянной скоростью v . Вместе с металлом с той же скоростью будут двигаться и квазисвободные электроны электронного газа, и поэтому никакого упорядоченного движе-

¹ Игорь Евгеньевич Тамм (1895—1971 гг.) — советский физик-теоретик.

ния электронов относительно кристаллической решётки не будет, а следовательно, не будет и электрического тока. Однако электроны имеют массу, и поэтому им присуща определённая инерция. При всяком изменении скорости движения куска металла электроны будут либо отставать от движения решётки, либо его опережать, отчего возникнет кратковременный электрический ток.

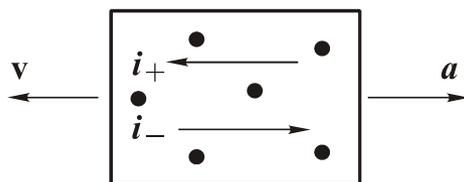


Рис. 79. Идея опытов с инерцией электронов

Направление этого тока зависит от знака заряда подвижных частиц в металле. Так, при торможении куска металла (ускорение a направлено слева направо, рис. 79) заряженные частицы будут опережать решётку и двигаться относительно неё справа налево. Если частицы несут положительный заряд, то и возникающий ток i_+ будет направлен также справа налево. Если же частицы несут отрицательный заряд, то ток i_- будет направлен противоположно. Так, исследуя на опыте направление возникающего тока, можно определить знак носителей заряда в металлах. А измеряя величину заряда, перенесённого этим током, можно определить отношение заряда к массе q_0/m носителей заряда и, следовательно, установить их природу.

Идея такого опыта была высказана в 1913 г. российскими физиками Леонидом Исааковичем Мандельштамом (1879—1944 гг.) и Николаем Дмитриевичем Папалёкси (1880—1947 гг.). Они произвели предварительные опыты и установили, что в катушке с проволокой, совершающей вращательные колебания вокруг своей оси, действительно возникает электрический ток. Затем этот опыт был предложен вновь Лоренцем и осуществлён с количественными результатами шотландским физиком Т. Д. Стюартом (Stewart) и американским физиком Ричардом Чейсом Толменом (Tolman, 1881—1948 гг.) в 1916 г. (см. разд. 7.6).

7.3. Сила и плотность тока

Плотность электрического тока \mathbf{j} — это векторная величина, определяющая количество электрических зарядов, проходящее в единицу времени в определённом направлении через единицу площади проводника:

$$\mathbf{j} = \rho \mathbf{v}, \quad (259)$$

где ρ — объёмная плотность зарядов; \mathbf{v} — скорость движения зарядов.

Направление вектора \mathbf{j} совпадает с направлением вектора \mathbf{E} . Модуль плотности тока можно выразить следующим образом:

$$j = nq \langle v \rangle, \quad (260)$$

где n — число носителей зарядов в единице объёма; q — величина заряда каждого из носителей; $\langle v \rangle$ — средняя скорость их упорядоченного перемещения.

Подвижность носителей зарядов μ_q равна отношению средней скорости $\langle v \rangle$ их упорядоченного движения, которую они приобретают в электрическом поле, к напряжённости этого поля:

$$\mu_q \equiv \mu = \frac{\langle v \rangle}{E} \Rightarrow \quad (261)$$

$$\Rightarrow j = nq\mu E = \sigma E, \quad (262)$$

где E — напряжённость электрического поля внутри проводника; $\sigma = nq\mu$ — удельная проводимость.

Заметим, что последнее уравнение (262) фактически представляет собой закон Ома в дифференциальной форме, который мы рассмотрим позже (см. разд. 7.7).

Размерность подвижности в системе СИ — $\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ (квадратный метр на вольт-секунду) (табл. 26).

Таблица 26. Подвижность электронов в металлах [30, 38]

Металл	Подвижность μ , $\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
Ag	0,0056—0,0058
Na	0,0048

Таблица 26 (окончание)

Металл	Подвижность μ , $\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
Be	0,0044
Cu	0,0035
Au	0,003
Li	0,0019
Al	0,001
Cd	0,00079
Zn	0,00058

В том случае, когда имеется несколько типов заряженных частиц, плотность электрического тока определяется как сумма по всем видам частиц:

$$j = \sum \rho v. \quad (263)$$

Сила электрического тока — количество электричества, протекающего за единицу времени через сечение S проводника (рис. 80):

$$I = \int_S j dS. \quad (264)$$

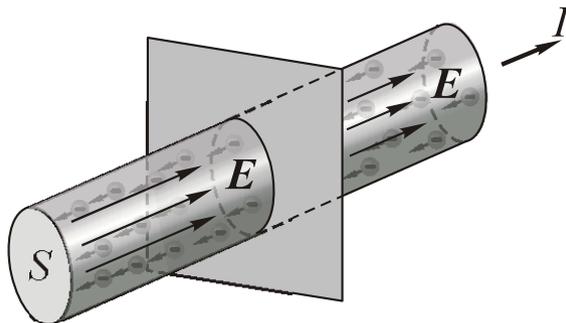


Рис. 80. Электрический ток

Другими словами, сила электрического тока — величина, характеризующая упорядоченное движение электрических зарядов и численно равная количе-

ству заряда Δq , протекающего через полное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

$$I \equiv \frac{dq}{dt}.$$
(265)

Последнее уравнение учитывает и общий случай переменного тока.



Сила тока в каком-либо проводнике равна величине заряда, проходящего в единицу времени через полное сечение проводника.

Единицей силы тока в СИ служит ампер (А). Строгое определение ампера основывается на электромагнитных явлениях, поэтому пока мы просто сформулируем это определение, а объяснение будет дано в *тome "Магнетизм и электромагнитные явления" данного курса*.

Ампер — единица силы электрического тока, равная силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум прямолинейным параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Пока мы можем пользоваться следующим толкованием ампера: при токе в 1 А через полное сечение проводника проходит заряд 1 Кл за время 1 с. На практике употребляют и более мелкие единицы: 1 миллиампер (мА) = 10^{-3} А и 1 микроампер (мкА) = 10^{-6} А.

Единица плотности тока в системе СИ — ампер на квадратный метр ($\text{А} \cdot \text{м}^{-2}$).

В гауссовой системе единиц сила тока имеет размерность $[I] = [L]^{3/2} [M]^{1/2} [T]^{-2}$, и измеряется в единицах СГС, которые иногда называют **статамперами**. $1 \text{ А} \approx 3 \cdot 10^9$ СГС (табл. 27).

В системе СГСМ сила тока измеряется в электромагнитных единицах силы тока — **би́о** (би). Био¹ определяется аналогично амперу: 1 би равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум прямолинейным параллельным проводникам бесконечной длины и бесконечно малой площади сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 см один от другого,

¹ Назван в честь французского физика Жана Б. Био́ (Biot, 1774—1862 гг.).

вызвал бы на участке проводника длиной 1 см силу взаимодействия, равную 2 дин.

Таблица 27. Соотношения между единицами силы тока

Единица	Ампер	Статампер	Био
1 А	1	$3 \cdot 10^9$	0,1
1 СГС	$3,33564 \cdot 10^{-10}$	1	$3,33564 \cdot 10^{-11}$
1 би	10	$3 \cdot 10^{10}$	1

Теперь мы можем дать более точное определение *постоянного тока*. **Постоянный (стационарный) ток** — это ток зарядов, при котором плотность тока и сила тока не изменяются во времени.

Микроскопическая природа *постоянного тока* состоит в направленном перемещении дискретных заряженных частиц, но макроскопически он может рассматриваться как непрерывный процесс, аналогичный течению жидкости или газа. Чаще всего постоянный ток обусловлен движением зарядов в токопроводящих средах. Стационарный поток заряженных частиц в пустоте также представляет собой постоянный ток.

Из *закона сохранения электрического заряда* следует замкнутость линий плотности постоянного тока. Тогда замкнутой оказывается и цепь в целом.

Контрольные вопросы

- ? Что называют силой тока в СИ? Какая формула выражает смысл этого понятия?
- ? Какова единица силы тока в СИ?
- ? Постройте и объясните график постоянного тока.
- ? Что называется плотностью тока? Какая формула выражает смысл этого понятия?
- ? Какова единица измерения плотности тока в СИ?

Интернет-ресурсы

- <http://www.allmeasures.com/table.asp?electric=on&Submit=Conversion+Table>

7.4. Закон Ома

Всякий физический закон лишь потому является законом, что его выражение обладает единственностью и простотой.

Ж. Бюффон¹

После изобретения *вольтова столба* сообщения об электрических опытах занимали всё больше места в научных журналах того времени. Так, было замечено, что проволока, соединяющая полюса источника тока, нагревается. Необходим был качественно новый скачок от созерцательных исследований и накопления экспериментальных результатов к установлению законов, описывающих процесс протекания электрического тока по проводнику. Заслуга в решении этого вопроса принадлежит немецкому физика Георгу С. Ому (Ohm, 1787—1854 гг.).

Если в проводнике имеется ток, то потенциал в различных его точках уже не одинаков. При наличии тока существует **падение напряжения** вдоль проводника.

Падение напряжения означает, что существует составляющая напряжённости поля E_τ , направленная вдоль проводника. Из этого следует, что напряжённость поля у поверхности проводника с током, а следовательно, и силовые линии, уже не перпендикулярны к поверхности проводника. Они наклонены в направлении тока на некоторый угол α , причём:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{E_n}{E_\tau}. \quad (266)$$

Видно, что для поддержания постоянного тока, т. е. движения электронов с постоянной скоростью, необходимо непрерывное действие силы (равной eE_τ , где e — заряд электрона). А это значит, что электроны в проводниках движутся "с трением", или, иначе говоря, что проводники обладают электрическим сопротивлением.

Если сопротивление проводника остаётся неизменным, то для каждого проводника существует однозначная зависимость между *напряжением* U , приложенным к концам проводника, и силой тока I в нём: $I = f(U)$. Она называется **вольт-амперной характеристикой** данного проводника.

¹ Жорж Луи Леклерк Бюффон (Buffon, 1707—1788 гг.) — французский естествоиспытатель.

Для многих проводников, в особенности для металлов, эта зависимость достаточно проста — сила тока пропорциональна приложенному *напряжению*:

$$I = GU, \quad (267)$$

где G — коэффициент пропорциональности (впоследствии названный **активной электрической проводимостью для постоянного тока**).

Данная зависимость была установлена Омом в 1826 г., и носит название **закон Ома**.

В основу своего электроизмерительного прибора Ом положил конструкцию крутильных весов Кулона (*см. разд. 1.4*) и известное к тому времени действие электрического тока на магнитную стрелку — открытие, сделанное в 1819—1820 гг. датским физиком Хансом Кристианом Эрстедом (*Ørsted, 1777—1851 гг.*). Магнитную стрелку Ом подвешивал с помощью проволоки над проводником, расположенным в направлении магнитного меридиана. При включении вольтова столба в цепь проводника магнитная стрелка отклонялась на некоторый угол и, чтобы вернуть её в первоначальное положение, Ом закручивал головку весов с прикрепленным подвесом и измерял углы. С помощью этого прибора Ом измерял "*силу магнитного действия*" при включении в цепь проволок одинакового поперечного сечения, но различной длины. В этой же серии опытов Ом провёл исследование зависимости угла отклонения магнитной стрелки от площади поперечного сечения проводников. Результаты своего исследования Ом оформил в виде статьи "Предварительное сообщение о законе, по которому металлы проводят контактное электричество", опубликованной в 1825 г. в "Журнале физики и химии", издававшемся в Германии. Экспериментальный закон Ома в первоначальном виде выглядел так:

$$X = \frac{ma}{mb + x}, \quad (268)$$

где X — сила магнитного действия проводника с током; x — длина проводника; a — величина, зависящая от возбуждающей силы источника тока; m — число элементов в источнике тока; b — величина, зависящая от остальной части цепи.

В 1827 г. Ом дал теоретическое обоснование обнаруженным им закономерностям. Ом исходил из представления об электрическом токе как о течении электрического флюида, аналогичном теплопроводности и поэтому отмечал, что величина силы магнитного действия пропорциональна разности электрической силы на полюсах источника тока, подобно тому, как в учении о теплоте (закон Фурье) принимается, что передача теплоты между двумя элементами тела пропорциональна разности их температур.

Первыми зарубежными учёными, признавшими правильность закона Ома, стали российские физики — будущий ректор Петербургского университета (с 1863 г.) Эмилий Христианович Ленц (1804—1865 гг.) и Борис Семёнович Якоби (1801—1874 гг.).

Разбирая неопубликованные рукописи Кавендиша, Максвелл выяснил, что Кавендиш не только закон Кулона открыл раньше Кулона, но и закон Ома открыл раньше Ома: *"Кавендиш был первым, кто открыл закон Ома, поскольку он последовательной серией экспериментов нашёл, что сопротивление в следующих степенях зависит от скорости: 1,08, 1,03, 0,980, и заключил, что это первая степень. И всё это — с помощью физиологического гальванометра..."*.

Одним из предшественников Ома также был Петров. Исследуя закономерности в электрической цепи, Петров ещё в 1802 г. (т. е. на четверть века раньше Ома, когда Ом ещё был 15-летним юношей) установил зависимость величины электрического тока от площади поперечного сечения проводника. Петров впервые обратил внимание на то, что действие батареи зависит от материала и толщины соединительных проводов. *"Я заметил, — писал Петров, — что при всех прочих одинаковых обстоятельствах происходит весьма великое различие в следствиях опытов, когда гальвани-вольтовская жидкость протекает по металлическим проводникам большего или меньшего состава"*. Кроме того, Петров установил, что при использовании более толстой проволоки имеет место *"более сильное действие... и весьма скорое течение гальвани-вольтовской жидкости"*. Спустя почти 20 лет к подобным выводам пришёл и Дэви.

В статье "Забытый электротехник", опубликованной в 1936 г. в английском журнале Science progress (№ 122) и посвящённой трудам Петрова, отмечено, что: *"Петров также открыл влияние размеров поперечного сечения проволоки... он определённо установил, что... более толстые проводники более эффективны... превосхитив этим закон Ома"*.

Коэффициент пропорциональности G в (267) сегодня называют электропроводностью проводника, а величину, обратную электропроводности, — **электрическим сопротивлением**. Термин "сопротивление проводника" первым из учёных ввёл в 1803 г. Петров в монографии "Известие о гальвани-вольтовских опытах..." для характеристики степени "противодействия", которое оказывает жидкое или твёрдое тело протекающему по нему току.

Исследуя прохождение тока через различные жидкости (в том числе *"растительные масла"* и *"винный спирт"*), Петров подчёркивал, что, чем больше их электрическое сопротивление, тем большее количество *"гальвани-вольтовской*

жидкости" (так он называл *электрический ток*) необходимо накопить, для того чтобы она смогла "*пройти*" через эти жидкости. Петровым также впервые было осуществлено параллельное соединение проводников.

Если обозначить сопротивление проводников тока через R , то:

$$G = \frac{1}{R}. \quad (269)$$

Электропроводность (**электрическая проводимость, проводимость**) G — способность *проводника* пропускать *электрический ток* под действием *электрического поля*, а также величина, количественно характеризующая эту способность. Электропроводность может быть анизотропной, так как *подвижность* μ может различаться в различных пространственных направлениях анизотропной среды.



Электрическое сопротивление — физическая величина, характеризующая противодействие проводника или электрической цепи электрическому току.

Электрическое сопротивление определяется как коэффициент пропорциональности между разностью потенциалов и силой тока в законе Ома.

Электропроводность G и сопротивление R зависят от рода вещества проводника, от его геометрических размеров и формы, а также от состояния проводника.

Единицей сопротивления R в СИ служит ом. **Ом**¹ — сопротивление такого проводника, в котором при *напряжении* между его концами 1 В существует ток силой 1 А: 1 Ом = 1 В·А⁻¹ (табл. 28).

Таблица 28. Соотношения между единицами электрического сопротивления

Единица	Ом	Гауссова (СГСЭ)	СГСМ
1 Ом	1	$1,11 \cdot 10^{-12}$	10^9
1 СГС (СГСЭ)	$8,99 \cdot 10^{11}$	1	$8,99 \cdot 10^{20}$
1 СГСМ	10^{-9}	$1,11 \cdot 10^{-21}$	1

¹ Принят на I Международном конгрессе электриков в Париже.

Единица электропроводности G в системе СИ — **обратный ом** (Ом^{-1}) или **сименс**¹ (См, S) — единица электрической проводимости, равная электрической проводимости участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом.

Известно, что при перемещении заряда q на участке dl элементарная работа δA , выполняемая сторонней силой F , равняется:

$$\delta A = F_l dl = qE_l dl . \quad (270)$$

Макроскопическая работа, выполняемая этой силой по переносу заряда q на пути 1—2 в электрической цепи, равняется:

$$A_{12} = \int_1^2 qE_l dl = q(\varphi_1 - \varphi_2) . \quad (271)$$

Из этого соотношения следует:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q} = \frac{q \int_1^2 E_l dl}{q} , \quad (272)$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E_l dl . \quad (273)$$



Разность *потенциалов* между определёнными участками однородного проводника численно равняется работе, выполненной сторонней силой по переносу единичного заряда на этом участке.

Согласно закону Ома для участка однородного проводника:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = IR . \quad (274)$$

Следовательно, для участка однородного проводника:

$$IR = \int_1^2 E_l dl . \quad (275)$$

Это равенство называют законом Ома в интегральной форме.

¹ По фамилии немецкого электротехника и изобретателя Эрнста Вернера Сименса (Siemens, 1816—1892 гг.).

Закон Ома в интегральной форме устанавливает линейную связь между силой тока на участке электрической цепи и приложенным к этому участку *напряжением*:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (276)$$

Для регулирования и ограничения силы тока или *напряжения* применяют переменные сопротивления — **реостаты** (рис. 81). Основная часть реостата — проводящий (резистивный) элемент и подвижный контакт, при помощи которого регулируют (плавно или ступенчато) сопротивление включаемой в цепь части резистивного элемента (за счёт зависимости полного сопротивления проводника от его длины — см. разд. 7.4).

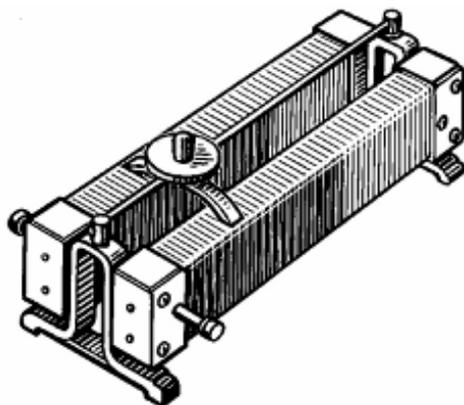


Рис. 81. Реостат лабораторного типа с непрерывным изменением сопротивления

7.4.1. Измерение сопротивлений МОСТОВЫМ МЕТОДОМ

Простейшим примером мостовой схемы может служить "мост Уитстона" — схема, впервые разработанная в 1844 г. английским электротехником Чарльзом Уитстоном (Wheatstone, 1802—1875 гг.) для измерения сопротивлений.

Мост Уитстона (рис. 82) включает в себя четыре сопротивления (R_1 , R_2 , R_3 , R_4) — четыре плеча моста, соединённые четырёхугольником, источник

тока (E), включённый в одну диагональ моста, и гальванометр (Γ), включённый в другую диагональ. Одно из сопротивлений неизвестно, три другие известны и, хотя бы одно из них, может изменяться. Варьируя величину регулируемого сопротивления, можно добиться такого состояния схемы, при котором разность потенциалов между точками C и D равна 0. Индикатором служит гальванометр, показывающий в этом случае отсутствие тока в ветви CD . В таком состоянии мост называют **сбалансированным**.

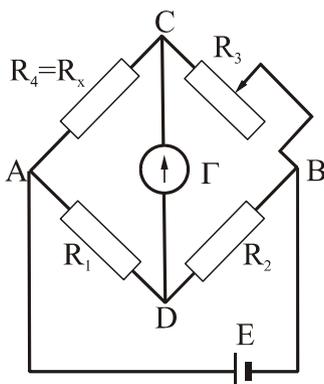


Рис. 82. Электрическая схема мостового метода электрических измерений (мост Уитстона)

Очевидно, что в этом случае:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2, \\ I_3 &= I_4, \\ U_{AD} &= I_1 R_1 = U_{AC} = I_2 R_2, \\ U_{DB} &= I_2 R_2 = U_{CB} = I_3 R_3. \end{aligned} \quad (277)$$

Решив эту систему уравнений, получим:

$$\begin{aligned} R_1 R_3 &= R_4 R_2 \quad \text{или} \\ \frac{R_1}{R_2} &= \frac{R_4}{R_3}. \end{aligned} \quad (278)$$



Если мост сбалансирован, то между сопротивлениями существует определённое соотношение и, следовательно, неизвестное сопротивление можно выразить через три другие.

Контрольные вопросы

- ? Что называют падением напряжения?
- ? Как записывают и формулируют закон Ома для участка цепи?
- ? Что называется сопротивлением проводника?
- ? Установите единицу сопротивления в СИ и сформулируйте её определение.
- ? Постройте вольт-амперную характеристику проводника первого рода.

Интернет-ресурсы

- <http://www.allmeasures.com/table.asp?electric=on&Submit=Conversion+Table>

7.5. Удельное электрическое сопротивление и проводимость

Дэви одному из первых удалось количественно определить проводимость металлов. Он установил, что 1 дюйм платиновой проволоки, 6 дюймов серебряной, 5,5 дюйма медной, 4 дюйма золотой, 3,8 дюйма свинцовой, 0,9 дюйма палладиевой и 0,9 дюйма железной проволоки одинакового поперечного сечения имели одинаковое сопротивление. В этих же экспериментах он указал на существование обратной пропорциональной зависимости между сопротивлением проводника и его поперечным сечением.

Удельная проводимость (электропроводность) σ_l — величина, количественно характеризующая способность вещества пропускать электрический ток под действием электрического поля:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{\sigma_l} \frac{l}{S},$$

$$\sigma_l \equiv \sigma = \frac{l}{RS},$$
(279)

где R — сопротивление проводника; l — длина проводника; S — площадь сечения проводника; $\rho = \frac{1}{\sigma_l}$ — удельное электрическое сопротивление, характеризующее материал проводника; $\sigma_l \equiv \sigma$ — удельная проводимость.

Размерность удельной электропроводности σ в СИ — сименс на метр ($\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$, $\text{S}\cdot\text{м}^{-1}$) или сименс на сантиметр ($\text{См}\cdot\text{см}^{-1}$, $\text{S}\cdot\text{см}^{-1}$).

Размерность удельного сопротивления ρ : Ом·м (СИ) или мкОм·см (СГС и гауссова) (табл. 29).

Таблица 29. Соотношения между единицами удельного сопротивления

Единица	Ом·м	Ом·см	Ом·мм ² ·м ⁻¹	СГСЭ	СГСМ
1 Ом·м	1	10 ²	10 ⁶	1,11·10 ⁻¹⁰	10 ¹¹
1 Ом·см	10 ⁻²	1	10 ⁴	1,11·10 ⁻¹²	10 ⁹
1 Ом·мм ² ·м ⁻¹	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	1	1,11·10 ⁻¹⁶	10 ⁵
1 СГСЭ	8,99·10 ⁹	8,99·10 ¹¹	8,99·10 ¹⁵	1	8,99·10 ²⁰
1 СГСМ	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹	10 ⁻⁵	1,11·10 ⁻²¹	1

Таблица 30. Удельное электрическое сопротивление некоторых веществ

Вещество	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м
Алюминий	(2,65—3,2)·10 ⁻⁸
Бронза фосфористая	8·10 ⁻⁸
Вольфрам	(5,03—5,5)·10 ⁻⁸
Дюралюминий	40·10 ⁻⁸
Железо	(9,7—9,8)·10 ⁻⁸
Золото, 20 °С	2,25·10 ⁻⁸
Латунь	(1,8—8,0)·10 ⁻⁸
Манганин (сплав: 85% Cu + 12% Mn + 3% Ni)	(4,2—4,8)·10 ⁻⁷

Таблица 30 (окончание)

Вещество	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м
Медь	$(1,67—1,8) \cdot 10^{-8}$
Молибден	$(4,8—5,7) \cdot 10^{-8}$
Нейзильбер (сплав: 65% Cu + 20% Zn + 15% Ni)	$(2,8—3,5) \cdot 10^{-7}$
Никелин (сплав: 54% Cu + 26% Ni + 20% Zn)	$(3,9—4,5) \cdot 10^{-7}$
Нихром (сплав: 67,5% Ni + 15% Cr + 16% Fe + 1,5% Mn)	$(1,0—1,1) \cdot 10^{-6}$
Олово, 20 °С	$11,5 \cdot 10^{-8}$
Платина	$(10,7—11,0) \cdot 10^{-8}$
Реотан (сплав: 84% Cu + 12% Mn + 4% Zn)	$(4,5—5,2) \cdot 10^{-7}$
Ртуть	$9,58 \cdot 10^{-8}$
Свинец, 20 °С	$20,648 \cdot 10^{-8}$
Серебро	$(1,59—1,66) \cdot 10^{-8}$
Сталь	$(1,0—2,0) \cdot 10^{-7}$
Хромель (сплав: 90% Ni + 10% Cr)	$1,3 \cdot 10^{-6}$

С 1820-х гг. было известно о зависимости электрического сопротивления металлов от температуры. Ещё в 1821 г. Дэви установил зависимость сопротивления проводника от температуры. Но лишь в 1835 г. эксперименты, проведённые Ленцем, однозначно показали, что при охлаждении металлов их сопротивление уменьшается. В классической электронной теории падение сопротивления объяснялось тем, что по мере охлаждения амплитуда колебаний атомов в решётке уменьшается, следовательно, уменьшается вероятность столкновений электронов с решёткой, а, значит, ток возрастает. Зависимость сопротивления от температуры характеризуется **температурным коэффициентом сопротивления** α (табл. 31): $\rho = \rho_0(1 + \alpha T)$, где ρ_0 — удельное сопротивление проводника при $T = 0$ °С.

Таблица 31. Температурный коэффициент сопротивления [30, 38]

Вещество	Температура, °С	Температурный коэффициент сопротивления ¹ α , К ⁻¹
Алюминий		$(3,8—4,9) \cdot 10^{-3}$
Бронза фосфористая		$4,0 \cdot 10^{-3}$
Вольфрам		$(4,5—4,6) \cdot 10^{-3}$
Графит	18	$-5 \cdot 10^{-4}$
Железо		$(6,2—6,57) \cdot 10^{-3}$
Константан	18	²
Латунь		$(2—7) \cdot 10^{-3}$
Манганин		$1,5 \cdot 10^{-5}$
Медь	18	$(3,9—4,3) \cdot 10^{-3}$
Молибден		$3,3 \cdot 10^{-3}$
Никель		$5,0 \cdot 10^{-3}$
Нихром		$(1,0—3) \cdot 10^{-4}$
Олово		$4,2 \cdot 10^{-3}$
Платина	0—100	$(2,5—3,8) \cdot 10^{-3}$
Свинец		$4,1 \cdot 10^{-3}$
Серебро	0—100	$(3,6—4) \cdot 10^{-3}$
Сталь		$(5—6,2) \cdot 10^{-3}$
Стекло	100	от $-0,1$ до $-0,2$

¹ Указанные в таблице значения являются средними в интервале температур от 0 до 100 °С. Их величина для различных образцов зависит от степени чистоты, термообработки и т. д.

² Значение температурного коэффициента сопротивления для константана изменяется от $-0,00004$ до $+0,00001$ в зависимости от образца. Минус при температурном коэффициенте означает, что с увеличением температуры сопротивление уменьшается.

Таблица 31 (окончание)

Вещество	Температура, °С	Температурный коэффициент сопротивления ¹ α , К ⁻¹
Тантал		$3,1 \cdot 10^{-3}$
Хром		$3,04 \cdot 10^{-3}$
Цинк		$(3,5—3,9) \cdot 10^{-3}$

Температурный коэффициент сопротивления чистых металлов близок к $1/273^\circ \approx 0,00367 \text{ К}^{-1}$.

При $T \rightarrow 0$, когда тепловые колебания не влияют на электрическое сопротивление, оно полностью определяется кристаллической структурой и не зависит от температуры T .

При крайне низких (криогенных) температурах ряд веществ (**сверхпроводники**) обладает сопротивлением намного меньшим, чем при комнатной температуре. Эксперименты показывают, что если создать ток в замкнутом контуре из сверхпроводников, то этот ток продолжает циркулировать и без источника ЭДС.

Сверхпроводимость исчезает под действием следующих факторов:

- повышение температуры;
- действие достаточно сильного магнитного поля;
- достаточно большая плотность тока в образце.

С повышением температуры до некоторой критической температуры T_c почти внезапно появляется заметное омическое сопротивление. Переход от сверхпроводимости к проводимости тем круче и заметнее, чем однороднее образец (наиболее крутой переход наблюдается в монокристаллах).

Более подробно о сверхпроводимости см. в теме "Магнетизм и электромагнитные явления" данного курса.

¹ Указанные в таблице значения являются средними в интервале температур от 0 до 100 °С. Их величина для различных образцов зависит от степени чистоты, термообработки и т. д.

Контрольные вопросы

- ? Какой формулой выражают зависимость сопротивления проводника от его длины, поперечного сечения и вещества?
- ? Как с точки зрения электронной теории объяснить понятие "сопротивление проводника"?
- ? Каков характер зависимости сопротивления металлов от температуры? Объясните данную зависимость с точки зрения электронной теории.
- ? Напишите формулы зависимости сопротивления и удельного сопротивления проводника от температуры.
- ? Что называют температурным коэффициентом сопротивления? Каков его физический смысл?
- ? Нарисуйте график зависимости удельного сопротивления от температуры.
- ? В чём состоит явление сверхпроводимости?
- ? Каковы главные технические трудности использования сверхпроводников на практике?

7.6. Опыт Стюарта—Толмена

Схема **опыта Стюарта—Толмена** показана на рис. 83. Катушка с большим числом витков тонкой медной проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси. Концы обмотки были присоединены к чувствительному *баллистическому гальванометру* (см. разд. 1.5) Г при помощи длинных гибких проводов, скручивающихся при вращении катушки. После раскручивания катушки до $1\,500\text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$ (до линейной скорости $56,4\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) она резко тормозилась с отрицательным ускорением ($39,6\text{—}282\text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$). Общая длина обмотки составляла примерно 500 м. При измерениях тщательно устранялось действие магнитного поля Земли, которое могло бы вызвать появление индукционных токов.

При торможении катушки в цепи действительно возникал кратковременный ток, а его фактическое направление объяснялось движением отрицательно

заряженных частиц. В этих опытах было определено отношение заряда к массе носителей заряда.

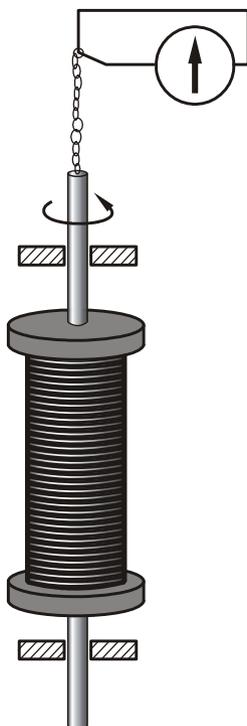


Рис. 83. Схема опыта Стюарта—Толмена

Пусть проводник длиной l движется со скоростью v . При резком торможении проводника свободные заряды, обладая импульсом mv , по инерции продолжают движение, и в проводнике возникнет кратковременный ток (прекращение тока обусловлено сопротивлением проводника R). Подобное движение заряженных частиц можно получить с помощью электрического поля соответствующей напряжённости E . Только время существования такого поля в неподвижном проводнике должно быть равно времени торможения движущегося проводника. Обозначив это время t , из равенства силы инерции (найденной из второго закона Ньютона) силе, действующей на заряд со стороны электрического поля, получим:

$$\frac{mv}{t} = q_0 E, \quad (280)$$

откуда:

$$\frac{q_0}{m} = \frac{vl}{qR}. \quad (281)$$

Так как $U = El$, то:

$$\frac{q_0}{m} = \frac{vl}{Ut}. \quad (282)$$

Отношение $\frac{q_0}{m}$ — **удельный заряд** частицы.

Вычисления показали, что отношение $\frac{q_0}{m}$ по модулю равно удельному заряду электрона. В то же время направление тока в проводнике оказалось противоположным направлению скорости v .

Мы показали, что заряд q , протекающий по цепи за время торможения катушки, выражается формулой:

$$q = \frac{m vl}{e R}, \quad (283)$$

где v — начальная линейная скорость проволоки; l — её длина; R — сопротивление цепи.

Зная величину элементарного заряда e , можно было найти массу m носителей заряда в металлах. Она оказалась порядка 10^{-30} кг, примерно в 2 000 раз меньше массы самого лёгкого атома — водорода ($m_f = 1.67 \cdot 10^{-27}$ кг).

Подтверждением электронного характера проводимости в металлах может служить и **акустоэлектрический эффект** — возникновение постоянного электрического поля в металлах и полупроводниках при распространении в них ультразвука или гиперзвука. Поле направлено вдоль направления распространения волны. Акустоэлектрический эффект связан с увлечением носителей заряда звуковой волной.

Контрольные вопросы

- ❓ Какой эксперимент подтвердил существование в металлах квазисвободных электронов? Нарисуйте схему эксперимента и объясните суть опыта.
- ❓ Что называют удельным зарядом носителя тока?

7.7. Закон Ома в дифференциальной форме

Закон Ома (267) и (279) позволяет найти силу тока в однородных проволоках постоянного сечения. Однако часто приходится вычислять силу тока в проводящих средах, в которых трубки тока не имеют цилиндрической формы. В неоднородных проводниках электрическое поле имеет определённое значение только в микрообластях, в некоторых точках проводника, по этой причине закон Ома и должен применяться в окрестности данной точки проводника.

Найдём связь между *плотностью тока* \mathbf{j} и напряжённостью электрического поля \mathbf{E} в окрестности некоторой точки проводника. Выделим в окрестности этой точки элементарный цилиндрический объём dV с образующими, параллельными вектору \mathbf{j} , т. е. параллельными вектору \mathbf{E} — вектору напряжённости стороннего электрического поля. Поперечное сечение выделенного цилиндра равно dS , а его длина dl . Для электрического тока в таком цилиндрическом проводнике выполняется соотношение, называемое **законом Ома в дифференциальной (локализованной) форме**:

$$dI = j dS = \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} \right)_{dl} = \frac{E dl}{\rho \frac{dS}{dS}}, \quad (284)$$

$$\mathbf{j} = \frac{1}{\rho} \mathbf{E} = \sigma \mathbf{E},$$

где σ — удельная проводимость (электропроводность), $\sigma = \frac{1}{\rho}$.



В каждой точке проводника направление электрического тока совпадает с направлением электрического поля \mathbf{E} , а плотность тока \mathbf{j} пропорциональна напряжённости электрического поля в этой точке.

Закон Ома в дифференциальной форме устанавливает линейную связь между плотностью тока и напряжённостью электрического поля в проводнике.

Линейная связь между \mathbf{j} и \mathbf{E} в проводнике обусловлена линейной зависимостью эффективной силы трения, действующей на носители заряда, от их скорости.

В анизотропных средах, каковыми, например, являются многие кристаллы, направления j и E , вообще говоря, не совпадают. В этом случае вместо (284) получается более сложное соотношение.

7.8. Закон Джоуля—Ленца

При прохождении электрического тока в любом участке цепи совершается определённая работа. Опытным путём было установлено, что при прохождении через проводник электрического тока проводник нагревается: в проводнике выделяется тепло.

Определим количество теплоты Q , выделяющейся в единицу времени на участке неподвижного однородного проводника при прохождении по нему электрического тока силой I .

Из физического смысла разности потенциалов электростатического поля (см. разд. 4.2):

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{A_{12}}{q_2} \quad (285)$$

следует, что работа сил поля при перемещении заряда q между двумя точками поля прямо пропорциональна разности потенциалов (напряжению) между этими точками:

$$A = Uq, \quad (286)$$

где U — *напряжение* (разность потенциалов) на участке цепи; q — заряд, перенесённый через поперечное сечение проводника за время t прохождения тока I .

Так как $q = It$, то работа электрического тока на участке цепи будет:

$$A = UIt. \quad (287)$$

Когда вся электрическая энергия превращается во внутреннюю энергию (т. е. затрачивается на нагревание участка цепи), справедлив *закон Ома в интегральной форме*:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (288)$$

Подставляя (288) в (287), получим формулу для вычисления работы на участке цепи:

$$A = \frac{U^2 t}{R} = I^2 R t . \quad (289)$$

Мощность на участке цепи измеряют работой за единицу времени:

$$P = \frac{A}{t} . \quad (290)$$

Подставляя в (290) формулы (289) и (287), получим:

$$P = I^2 R \Rightarrow \quad (291)$$

$$\Rightarrow P = UI \Rightarrow U = \frac{P}{I} . \quad (292)$$

В системе СИ мощность P измеряют в ваттах (Вт). 1 **ватт**¹ — мощность, выделяющаяся током силой 1 ампер (1 А) при его прохождении в проводнике участка с разностью потенциалов в 1 вольт (1 В) (табл. 32).

Таблица 32. Соотношения между единицами мощности

Единица	Вт	эрг·с ⁻¹	кВт	кал·с ⁻¹	ккал·ч ⁻¹	л.с.
1 Вт	1	10 ⁷	10 ⁻³	0,239	0,860	1,36·10 ⁻³

Формула (292) используется для определения **единицы напряжения в системе СИ**. Единица напряжения в СИ — вольт (В, V). Вольт² — электрическое *напряжение*, вызывающее в электрической цепи постоянный ток силой 1 А при мощности 1 Вт: 1 В = 1 Вт·А⁻¹.

В качестве единиц *работы* в электричестве часто используются единицы, производные от единиц мощности, — **киловатт-час** (кВт·ч, kWh) и его производные: 1 кВт·ч = 1 000·3 600 Вт·с = 3,6·10⁶ Дж.

В случае если участок цепи представляет собой неподвижный однородный проводник, подчиняющийся *закону Ома*, то справедлив **закон Джоуля—Ленца**:

$$Q = I^2 R t , \quad (293)$$

¹ Названа в честь шотландского изобретателя и механика Джеймса Уатта (Watt, 1736—1819 гг.).

² Назван в честь Вольты.

где Q — количество теплоты, выделяющейся в единицу времени на участке электрической цепи с сопротивлением R при протекании по нему постоянного тока I .

Этот закон был впервые установлен опытным путём в 1842 г. Ленцем и, независимо от него, английским физиком Джеймсом П. Джоулем (Joule, 1818—1889 гг.).



Количество теплоты, выделенной в однородном проводнике при прохождении постоянного тока, прямо пропорционально сопротивлению проводника, квадрату силы тока и времени его прохождения.

Пусть сила тока в проводнике постоянна ($I = \text{const}$). Это означает, что за время dt через проводник переносится заряд $dq = Idt$. При этом силами электрического поля E за время dt выполняется работа dA_{12} :

$$dA_{12} = dq \int_l E_l dl = Idt \int_l E_l dl . \quad (294)$$

Согласно закону сохранения и превращения энергии эта работа превращается в энергию в форме теплоты Q :

$$dQ = Idt \int_l E_l dl . \quad (295)$$

Отсюда получаем закон Джоуля в интегральной форме:

$$Q = I \int_l E_l dl \cdot \Delta t . \quad (296)$$

Обычно при расчётах используют другую формулу:

$$Q = I^2 R \Delta t . \quad (297)$$

В единицу времени величина выделившейся энергии в участке однородного проводника, по которому течёт постоянный ток силой I , равняется:

$$\frac{Q}{t} = I^2 R . \quad (298)$$

При этом энергия, выделяющаяся в однородном цилиндрическом участке проводника сечением dS и длиной dl в единицу времени, равняется:

$$dW = (jdS)^2 \rho \frac{dl}{dS} = j^2 \rho dl dS = \frac{1}{\sigma} (\sigma E)^2 dV. \quad (299)$$

В единице объёма проводника энергия (в единицу времени) равняется:

$$w_e \equiv \frac{dW}{dV} = \sigma E^2 \quad (300)$$

и называется **объёмной энергией**.

Равенство (300) называют **законом Джоуля в дифференциальной форме**.



Объёмная энергия w_e (выделяющаяся в единице объёма однородного проводника при прохождении постоянного электрического тока) пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля в данной точке проводника.

При последовательном соединении проводников с сопротивлениями R_1 и R_2 количество выделенной в них энергии (теплоты) равняется:

$$Q_1 = I^2 R_1 t, \quad (301)$$

$$Q_2 = I^2 R_2 t, \quad (302)$$

откуда следует, что:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (303)$$



Количество теплоты, выделенной током в каждом проводнике при их последовательном соединении, прямо пропорционально сопротивлению этих проводников.

При параллельном соединении проводников с сопротивлениями R_1 и R_2 количество выделенного в них тепла равняется:

$$Q_1 = \frac{U^2 t}{R_1}, \quad (304)$$

$$Q_2 = \frac{U^2 t}{R_2}, \quad (305)$$

откуда следует, что:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (306)$$



Количество теплоты, выделенной током в каждом проводнике при их параллельном соединении, обратно пропорционально сопротивлению этих проводников.

Таблица 33. Допустимые токи в изолированных проводах

Сечение провода, мм ²	Сила тока (норма), А		
	медь	алюминий	железо
1	6	6	—
1,5	10	8	—
2,5	15	10	6
4	20	15	8
6	25	20	10
10	31	25	15
16	43	35	25
25	75	60	—

Таблица 34. Максимальные допустимые токи в изолированных проводах при продолжительной работе, А [38]

Материал провода	Сечение провода, мм ²							
	1	1,5	2,5	4	6	10	16	25
Алюминий	8	11	16	20	24	34	60	80
Железо			8	10	12	17	30	
Медь	11	14	20	25	31	43	75	100

Нагревание проводников током находит многочисленные применения. Наиболее важное из них — осветительные лампы¹. Попыты по получению света путём нагрева проводников электрическим током начались вскоре после открытия теплового действия тока в 1800 г.

12 января 1850 г. в 11 часов вечера на башне Адмиралтейства в Санкт-Петербурге зажёгся электрический фонарь. Как сообщала "Северная пчела", *"Адмиралтейская площадь более нежели до половины освещена электрическим светом"*. Это был первый опыт электрического освещения на улице.

В 1854 г. немецкий эмигрант часовщик Гейнрих Гебель (Göbel, 1818—1893 гг.) представил в Нью-Йорке первую пригодную для практического применения электрическую лампу накаливания. Он взял обугленную бамбуковую нить, вставил её в стеклянную колбу с откачанным воздухом и, подавая на нить ток от батареи, накалил до свечения.

Большое значение в развитии ламп накаливания имели работы русского электротехника Александра Николаевича Лодыгина (1847—1923 гг.), который в 1872 г. изобрёл угольную лампу накаливания (патент 1874 г.), а уже в 1873 г. демонстрировал в Санкт-Петербурге различные типы своих ламп — с молибденовой и вольфрамовой нитью. 29 января 1875 г. *"в средней комнате магазина белья Жюля Флорана"* на Большой Морской улице в Санкт-Петербурге был осуществлён первый опыт освещения магазина электрическими лампами Лодыгина.

В 1879 г. американский изобретатель Томас А. Эдисон (Edison, 1847—1931 гг.), применив для тела накала угольную нить, создал лампу серийного производства с резьбовым цоколем, дошедшим до наших дней под названием E27. Воздух из баллона был откачан. Вольфрамовые лампы с нитевидными телами накала появились в 1903—1909 гг. В 1913 г. американский физик Ирвинг Лэнгмюр (Langmuir, 1881—1957 гг.) предложил наполнить лампу накаливания нейтральным газом и применить спиралевидное тело накала вместо нитевидного.

Лампа накаливания — источник света с излучателем в виде проволоки (нити или спирали) из тугоплавкого металла (обычно вольфрамовой), накаливаемой электрическим током до температуры 2 500—3 000 К (рис. 84). Световая отдача лампы накаливания 10—35 лм·Вт⁻¹.

¹ От франц. *lampe* — первоисточник и греч. *lampás* — светоч, светильник.

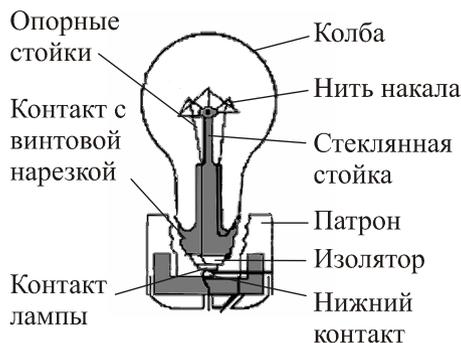


Рис. 84. Электрическая лампа накаливания

"Плюсы" ламп накаливания:

- низкая стоимость;
- возможность управления степенью концентрации и направлением распространения света;
- удобство применения;
- отсутствие систем электронного запуска и стабилизации.

Недостатком ламп накаливания является постепенное испарение вольфрама и осаждение его на стенках колбы. Это приводит к снижению световой отдачи, повышению температуры внутри колбы и, как следствие, к перегоранию нити.

Лампы накаливания имеют сплошной спектр излучения, цветовая температура лампы с прозрачной колбой составляет 2 500—2 700 К. Поэтому при освещении такими лампами усиливаются "тёплые" цветовые тона и ослабляются "холодные", что не позволяет обеспечить высокое качество цветопередачи.

"Минусы" ламп накаливания:

- короткий срок службы (около 1 000—1 500 часов);
- 95% потребляемой лампами накаливания энергии преобразуется в тепло и только 5% — в свет.

Низкая эффективность ламп накаливания привела к тому, что в начале XXI в. в некоторых странах эти источники света были фактически запрещены. В России продажа ламп накаливания мощностью 100 Вт и выше должна быть прекращена в 2011 г., от 75 Вт — к 2014 г.

В последнее время распространение получили **галогенные лампы накаливания**, созданные в 1959 г. Отличие галогенных ламп от обычных ламп накаливания в том, что колба лампы заполнена газом-наполнителем с парами галогена (обычно йода) или его соединений. В таких лампах в **вольфрамово-**

галогенном цикле молекулы вольфрама, осевшие на стенках колбы, соединяются с йодом и образуют йодистый вольфрам WI_2 , который испаряется и затем, подходя к раскалённой спирали, вновь распадается на вольфрам и йод, причём молекулы вольфрама оседают на спирали, а йод вновь участвует в цикле. Для обеспечения такого цикла требуется, чтобы температура внутренней стенки колбы была выше $250\text{ }^\circ\text{C}$, а температура нити выше $1\ 600\text{ }^\circ\text{C}$. Галогенные лампы служат дольше, чем обычные лампы накаливания. Лампы с галогенным наполнением дают исключительно яркое белое свечение. Яркость галогенных ламп существенно выше, чем яркость обычных ламп накаливания той же мощности. Применение кварцевой колбы позволяет производить лампы малого размера и большой мощности. Обычно мощность галогенных ламп составляет от 20 до 50 Вт.

"Плюсы" галогенных ламп:

- более яркий свет;
- сохранение яркости на протяжении всего срока службы;
- экономичность превосходит аналогичные показатели ламп накаливания в 2 раза.

"Минусы" галогенных ламп:

- более высокая стоимость;
- более высокая, чем у обычной лампы, рабочая температура;
- высокая рабочая температура требует вместо стеклянного баллона кварцевого;
- высокая рабочая температура требует теплостойкой оснастки.

Контрольные вопросы

- ? Напишите формулу для определения работы постоянного тока.
- ? Докажите, что работа в электричестве также измеряется в джоулях.
- ? Как записывается закон Джоуля—Ленца?
- ? Как зависит количество теплоты, выделяемое электрическим током в проводниках, от сопротивления этих проводников при их последовательном и параллельном соединении?
- ? Напишите формулу мощности постоянного тока.
- ? Докажите, что мощность электрического тока также выражается в ваттах.
- ? Что измеряется в киловатт-часах?

Интернет-ресурсы

☛ <http://www.allmeasures.com/table.asp?Energy=on&Submit=Conversion+Table>

7.9. Вывод законов Ома и Джоуля по классической теории электропроводности металлов

В основе *классической теории электропроводности* металлов (см. разд. 6.1) лежат представления о кристаллической структуре металлов — о существовании кристаллической решётки, в узлах которой расположены ионы, а валентные электроны находятся в хаотическом тепловом движении, создавая "электронный газ".

В отсутствие внешнего электрического поля электроны не создают направленного движения — электрический ток отсутствует. Их скорости характеризуют средним значением скорости $\langle u \rangle$ теплового (хаотического) движения "молекул" электронного газа (*теория металлов Друде* — см. разд. 6.2). Средняя квадратичная скорость хаотического движения электронов может быть рассчитана как скорость частиц идеального газа и при комнатной температуре она равна примерно $1,1 \cdot 10^5$ м·с⁻¹.

Пусть в единице объёма металла находится n свободных электронов с массой m и зарядом e . Из-за беспорядочного движения электронов все их направления равновероятны и средняя плотность электронного тока равняется нулю: $j = 0$.

Во внешнем электрическом поле появляется направленное движение электронов, которое характеризуют средним значением направленной скорости $\langle v \rangle$. При этом плотность электронного тока равна:

$$\frac{I}{S} = j = en \langle v \rangle. \quad (307)$$

Определим величину направленной скорости $\langle v \rangle$. Ограничимся классическим приближением, рассматривая электронный газ как газ идеальный, т. е. будем

считать, что электроны движутся по законам движения точечных масс m с зарядом e под действием силы электрического поля с напряжённостью \mathbf{E} :

$$\mathbf{F}_E = e\mathbf{E} . \quad (308)$$

Электроны не взаимодействуют друг с другом, но сталкиваются с ионами в узлах решётки. Между двумя последовательными столкновениями каждый электрон под действием силы \mathbf{F}_E движется направленно с ускорением \mathbf{a} . Его максимальная скорость:

$$v_{\max} = a \langle \tau \rangle = \frac{eE}{m} \langle \tau \rangle , \quad (309)$$

где $\langle \tau \rangle$ — средняя продолжительность движения электрона между двумя столкновениями с ионами решётки; $\frac{eE}{m} = a$ — ускорение, сообщённое электрону силой F_E .

В момент столкновения с ионом решётки электрон приобретает случайное направление и случайную величину скорости, так что среднее её значение равно 0. Заряд, помещённый в электростатическое поле, испытывает действие силы со стороны этого поля и приобретает ускорение. Поэтому направленная скорость заряда в течение времени свободного пробега линейно возрастает со временем. В конце свободного пробега электрон сталкивается с ионом, отдаёт ему накопленную энергию, и его направленная скорость падает до 0. Отсюда в электрическом поле средняя скорость $\langle v \rangle$ направленного движения электрона в металле приобретает значение:

$$\begin{aligned} \langle v \rangle &= \frac{1}{2} u_{\max} , \\ \langle v \rangle &= \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \langle \tau \rangle . \end{aligned} \quad (310)$$

Обозначим среднюю длину свободного пробега электрона между двумя столкновениями с узлами решётки через $\langle \lambda \rangle$. Тогда его среднее время пробега:

$$\langle \tau \rangle = \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle u \rangle} . \quad (311)$$

Следовательно:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle u \rangle} . \quad (312)$$

Таким образом, модуль плотности электронного тока в металле равняется:

$$j = en\langle v \rangle = \frac{e^2 n \langle \lambda \rangle}{2m \langle u \rangle} E = \sigma E, \quad (313)$$

где σ — удельная проводимость.

Уравнение (313) соответствует закону Ома в дифференциальной форме (см. разд. 7.7).

Среднее значение направленной скорости движения электронов составляет около $10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, поэтому даже при значительных токах скорость направленного движения много меньше скорости хаотического движения.

Проводимость σ связана со временем свободного пробега электрона τ соотношением:

$$\sigma = \frac{e^2 n \langle \lambda \rangle}{2m \langle u \rangle} = \frac{e^2 n \tau}{2m}. \quad (314)$$

Из этой формулы можно определить τ по измеренным значениям σ . При комнатной температуре $\tau \sim 10^{-14} - 10^{-15} \text{ с}$.

На заключительном этапе своего направленного движения электрон приобретает максимальное значение своей кинетической энергии:

$$E_{\text{кmax}} = \frac{1}{2} m v_{\text{max}}^2. \quad (315)$$

Следовательно:

$$E_{\text{кmax}} = \frac{e^2 \langle \lambda \rangle^2}{2m \langle u \rangle^2} E^2. \quad (316)$$

Сталкиваясь с тяжёлым ионом в узле решётки металла, электрон передаёт ему энергию, заставляя его более энергично колебаться около положения равновесия, что эквивалентно повышению температуры решётки. Каждый электрон сталкивается с ионами решётки с частотой:

$$\nu = \frac{1}{\tau} = \frac{\langle u \rangle}{\langle \lambda \rangle}. \quad (317)$$

Следовательно, в единицу объёма металла в одну секунду электронами передаётся энергия:

$$w = E_{\text{кmax}} \frac{1}{\tau} n = \frac{e^2 \langle \lambda \rangle^2}{2m \langle u \rangle^2} E^2 \frac{\langle u \rangle}{\langle \lambda \rangle} n = \frac{e^2 n \langle \lambda \rangle}{2m \langle u \rangle} E^2 = \sigma E^2, \quad (318)$$

где $\sigma = \frac{e^2 n \langle \lambda \rangle}{2m \langle u \rangle}$.

В результате металл при прохождении электронного тока разогревается. Полученная формула (318) соответствует *закону Джоуля в дифференциальной форме*.

7.10. Закон Видемана—Франца

Из опытных данных известно, что металлы обладают большой теплопроводностью. Немецкие физики Густав Г. Видеман (Wiedemann, 1826—1899 гг.) и К. Франц (Franz, 1827—1902 гг.) опытным путём в 1853 г. установили закон, носящий их фамилии — **закон Видемана—Франца**:

Отношение коэффициента теплопроводности λ_T к коэффициенту электропроводности σ для всех металлов при 300 К приблизительно одинаково.

Действительно, измерения показали, что при 300 К:

$$\frac{\lambda_T}{\sigma} [\text{Al}] = 5,8 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} \cdot \text{Ом} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1},$$

$$\frac{\lambda_T}{\sigma} [\text{Cu}] = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} \cdot \text{Ом} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1},$$

$$\frac{\lambda_T}{\sigma} [\text{Pb}] = 7,0 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} \cdot \text{Ом} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

По классической теории, если считать электронный газ идеальным, т. е. принять для коэффициента его теплопроводности величину:

$$\lambda_T = \frac{1}{3} n \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \frac{3}{2} k = \frac{1}{2} n \langle v \rangle \langle \lambda \rangle k, \quad (319)$$

где k — постоянная Больцмана, то тогда:

$$\frac{\lambda_T}{\sigma} = \frac{\frac{1}{2} n \langle v \rangle \langle \lambda \rangle k}{\frac{e^2 n \langle \lambda \rangle}{2m \langle v \rangle}} = \frac{km \langle v \rangle^2}{e^2}. \quad (320)$$

Учитывая, что среднее значение кинетической энергии направленного движения электронов в электронном газе равняется:

$$\langle E_k \rangle = \frac{m \langle v \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (321)$$

$$m \langle v \rangle^2 = 3kT,$$

получаем для отношения коэффициента теплопроводности к коэффициенту электропроводности металлов (закон Видемана—Франца):

$$\frac{\lambda_T}{\sigma} = 3 \left(\frac{k}{e} \right)^2 T. \quad (322)$$

Подставляя в это уравнение $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ и $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, получа-

ем: $\frac{\lambda_T}{\sigma} = 2,23 \cdot 10^{-8} \cdot T \frac{\text{Дж} \cdot \text{Ом}}{\text{с} \cdot \text{К}}$. При 300 К: $\frac{\lambda_T}{\sigma} = 6,7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Дж} \cdot \text{Ом}}{\text{с} \cdot \text{К}}$, что соответствует экспериментально полученным результатам Видемана и Франца для Al, Cu и Pb.

Закон Видемана—Франца хорошо согласуется с **законом Лоренца** $\left(\frac{\lambda_T}{\sigma} \sim T \right)$.

Однако произведённые вскоре Лоренцем уточнённые расчёты с учётом максвелловского распределения скоростей электронов привели к замене в теоретической формуле экспериментального закона Видемана—Франца множителя 3 на 2 и к резкому расхождению классической теории с экспериментом.

7.11. Электродвижущая сила

Для получения постоянного тока в металлах на заряды в электрической цепи должны действовать какие-либо силы, отличные от сил электростатического поля. Такие силы получили общее название **сторонних сил**.

Электродвижущая сила — феноменологическая характеристика источников тока, введённая Омом в 1827 г. для цепей постоянного тока и определённая немецким физиком Густавом Р. Кирхгофом (Kirchhoff, 1824—1887 гг.) — в 1857 г. как работа "сторонних" (внешних) сил при переносе единичного электрического заряда вдоль замкнутого контура. Затем это понятие стали трактовать более широко — как меру удельных (на единицу переносимого током заряда) преобразований энергии, осуществляемых в квазистационарных электрических цепях не только "сторонними" источниками (*гальваническими батареями, аккумуляторами, генераторами* и т. п.), но и элементами нагрузки (*электромоторами, аккумуляторами* в режиме зарядки, *дросселями, трансформаторами* и т. п.).

Полное название связано с механическими аналогиями процессов в электрических цепях и применяется редко, более употребительным является сокращение — ЭДС.

ЭДС — физическая величина, характеризующая действие сторонних сил в источниках постоянного или переменного тока. В замкнутом проводящем контуре ЭДС равняется работе этих сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль всего контура.

Теперь мы можем дать более строгое определение для **электрического напряжения**: напряжение U_{12} между точками 1 и 2 электрической цепи измеряется работой, совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении по цепи единичного положительного заряда из первой точки во вторую:

$$U_{12} = \int_1^2 E_l dl + \int_1^2 (E_{ст})_l dl = (\varphi_1 - \varphi_2) + E_{12}, \quad (323)$$

где $E_{ст}$ — напряжённость поля сторонних сил; E_{12} — электродвижущая сила, действующая на участке цепи 1—2.

При отсутствии сторонних сил величины U_{12} и $(\varphi_1 - \varphi_2)$ совпадают.

ЭДС источника равна электрическому напряжению U (разности потенциалов $\Delta\varphi$) на его зажимах при разомкнутой внешней цепи, т. е. является предельной величиной электрической разности потенциалов при нулевом токе через элемент при установившихся локальных равновесиях переноса заряда и химических равновесиях. ЭДС определяет силу тока в цепи при заданном её сопротивлении.

В СИ ЭДС измеряется в вольтах (В, V).

В гауссовой системе (СГСЭ) единица ЭДС специального названия не имеет (1 ед. СГСЭ = 1 эрг·Фр⁻¹ ≈ 299,79 В).

Однородной цепью называют цепь, не содержащую ЭДС. Поэтому закон Ома для участка однородной цепи:

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{R}, \quad (324)$$

где $(\varphi_1 - \varphi_2)$ — разность потенциалов на концах участка; R — его сопротивление.

Контрольные вопросы

- ? Почему электрическое поле заряженных частиц не способно поддерживать постоянный электрический ток в цепи?
- ? Что называют сторонними силами?
- ? Что называют ЭДС источника тока?
- ? Каков физический смысл ЭДС? В каких единицах её выражают?
- ? Какова связь между напряжением, ЭДС и разностью потенциалов?
- ? Что показывает вольтметр, присоединённый к полюсам источника тока при разомкнутой внешней цепи?

7.12. Сторонние источники ЭДС и внутреннее сопротивление источника ЭДС.

Закон Ома для замкнутой цепи

Всякое устройство, в котором возникают *сторонние электродвижущие силы*, называется источником тока.

Источники тока — устройства, преобразующие различные виды энергии в электрическую. Условно различают **химические источники тока**, в которых электроэнергия вырабатывается в результате окислительно-восстановительной реакции (гальванические элементы), и **физические источники тока**, преобразующие тепловую, механическую, электромагнитную, а также энергию радиационного излучения и ядерного распада в электрическую (электромагнитные генераторы, термоэлектрические генераторы, солнечные и ядерные батареи и др.). Химические источники тока делятся на **первичные** (гальванические элементы и батареи из них), **вторичные** (электрические аккумуляторы и аккумуляторные батареи) и топливные элементы.

Рассмотрим источник тока, замкнутый на проводник с сопротивлением R . Источник тока представляет для тока определённое сопротивление, называемое **внутренним сопротивлением** r .

Источник тока непрерывно посылает электрические заряды во внешнюю замкнутую цепь с сопротивлением R , создавая их постоянный ток $I = \text{const}$.

Закон Ома для замкнутой (полной) цепи:

$$I = \frac{E}{r + R}, \quad (325)$$

где E — электродвижущая сила источника тока; r — внутреннее сопротивление источника тока; $R = \rho \frac{l}{S}$ — сопротивление проводника; ρ — удельное сопротивление проводника.

Сумма $R + r$ внешнего и внутреннего сопротивлений — **полное сопротивление цепи**.

Разность потенциалов $\Delta\varphi$ между точками 1 и 2 в электрической цепи, содержащей сопротивление R , равняется:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = IR = \frac{E}{r + R} R = E \left(1 - \frac{r}{r + R} \right) = E - Ir. \quad (326)$$



Разность потенциалов $\Delta\varphi$ в точках 1 и 2 электрической цепи с сопротивлением R меньше электродвижущей силы источника на величину Ir , равную падению напряжения внутри источника тока.

Из полученного соотношения для $\Delta\varphi$ следует:

- при $R \gg r$ $\Delta\varphi = E$ и $I = \frac{E}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}$,
- при $R \ll r$ $\Delta\varphi \ll E$ и $I_{\max} = \frac{E}{r}$ (ток короткого замыкания),
- при $R \rightarrow 0$ $\Delta\varphi \rightarrow 0$.

Закон Ома для участка неоднородной (т. е. содержащей ЭДС) цепи:

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \sum E}{\sum R}, \quad (327)$$

где $(\varphi_1 - \varphi_2)$ — разность потенциалов на концах участка; $\sum E$ — алгебраическая сумма всех ЭДС, имеющих на данном участке; $\sum R$ — сумма всех сопротивлений участка.

Контрольные вопросы

- ? Выведите формулу закона Ома для замкнутой цепи. Как читается данный закон?

7.13. Мощность во внешней цепи. КПД источника ЭДС

Найдём *мощность*, выделяющуюся во внешней цепи *источника ЭДС*. Для этого рассмотрим схему, в которой источник ЭДС E с внутренним сопротивлением r подключен ко внешней цепи сопротивлением R . Выделяющаяся во внешней цепи мощность P_R будет равна:

$$P_R = UI = RI^2 \Rightarrow \quad (328)$$

$$\Rightarrow P_R = E^2 \frac{R}{(R+r)^3}. \quad (329)$$

Найдём значение внешнего сопротивления R_{\max} , при котором во внешней цепи будет выделяться максимально возможная мощность P_{\max} . Для нахождения этого экстремума продифференцируем P_R по R и приравняем производную нулю:

$$\frac{dP_R}{dR} = E^2 \frac{r^2 - R_{\max}^2}{(r + R_{\max})^2} = 0. \quad (330)$$

Так как сопротивления R и r могут быть только положительными, получаем, что $R_{\max} = r$.



Мощность P_R , выделяемая во внешней цепи, достигает максимального значения, если сопротивление R внешней цепи равно внутреннему сопротивлению r источника ЭДС.

В этом случае сила тока в цепи будет равна $\frac{E}{2r}$, т. е. половине силы тока короткого замыкания, а максимально возможная мощность P_{\max} :

$$P_{\max} = \frac{E^2}{4r}. \quad (331)$$

Если источник ЭДС подключен ко внешней цепи, то ток протекает и внутри самого источника ЭДС, поэтому некоторая мощность тратится на его разогрев. Поэтому при практическом использовании источников ЭДС важно знать их КПД.

Найдём мощность P_r , выделяющуюся в источнике ЭДС:

$$P_r = rI^2. \quad (332)$$

Полная мощность P источника ЭДС будет складываться из этой мощности, и мощности, выделяющейся во внешней цепи:

$$P = rI^2 + RI^2 = EI, \quad (333)$$

а КПД источника ЭДС:

$$\eta = \frac{P_R}{P} = \frac{U}{E}. \quad (334)$$

Поскольку U не может быть больше E , то и КПД η не может быть больше 1 (100%).

Зависимость КПД η от силы тока I :

$$\eta = \frac{P_R}{P} = \frac{EI - rI^2}{EI} = 1 - \frac{r}{E}I. \quad (335)$$



КПД η источника ЭДС достигает максимального значения $\eta = 1$ в случае разомкнутой цепи ($R = \infty$), а затем линейно уменьшается до нулевого значения при коротком замыкании ($R = 0$).

В случае короткого замыкания вся мощность выделяется внутри источника ЭДС, что может привести к его перегреву и выходу из строя. Вот почему короткие замыкания реальных мощных источников ЭДС недопустимы.

7.14. Правила Кирхгофа для разветвлённых электрических цепей

Точку на принципиальной электрической схеме, в которой сходится не менее трёх проводников, называют **узлом**.

При определении, какие проводники сходятся в данном узле, следует учитывать, что в принципиальных электрических схемах сопротивление соедини-

тельных проводов считается равным нулю, и, следовательно, напряжение на каждом из соединительных проводов также равно нулю.

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма сил токов на участках цепи, сходящихся в любой точке разветвления (в узлах), равна нулю:

$$\sum_i I_i = 0. \quad (336)$$

Предполагается, что все величины I_i алгебраические, т. е. имеют знак, причём токи, текущие по направлению к узлу, считаются положительными, а текущие от узла — отрицательными.

Будем называть **электрическим контуром** любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям электрической цепи.

Второе правило Кирхгофа: для любого контура сумма всех падений напряжения равна сумме всех электродвижущих сил в этом контуре:

$$\sum_i I_i R_i = \sum_k E_k. \quad (337)$$

Падение напряжения $I_i R_i$ на участке цепи считается положительным, если направление обхода контура совпадает с направлением тока на этом участке. Значение ЭДС источника тока E_k считается положительным, если направление обхода внутри источника тока совпадает с направлением от отрицательного полюса к положительному.

Оба правила Кирхгофа весьма полезны при решении задач на разветвлённые цепи. Применяя эти правила к узлам и к различным контурам, входящим в состав сложной цепи, мы получаем уравнения для определения всех неизвестных токов. Получаемое при этом число независимых уравнений всегда равно числу неизвестных токов, и поэтому оба правила Кирхгофа дают общий метод решения задач на разветвлённые цепи.

При использовании правил Кирхгофа следует иметь в виду:

- число составляемых уравнений должно соответствовать числу неизвестных;
- составляя уравнения, надо следить, чтобы в каждое последующее входила хотя бы одна неизвестная величина, которая не входила в предыдущие уравнения;
- для каждого контура направление его обхода, определяющее знаки сил токов и ЭДС, выбирают произвольно. Если в результате решения на ка-

ком-то участке получается отрицательная сила тока, это означает, что ток на этом участке идёт в направлении, противоположном выбранному направлению обхода контура.

Контрольные вопросы

? Сформулируйте правила Кирхгофа.

7.15. Компенсационный метод измерения ЭДС

Компенсационный метод измерения ЭДС элементов был предложен немецким физиком Иоганном Кристианом Пóггендорфом (Poggendorf, 1796—1877 гг.).

Напомним, что закон Ома для замкнутой цепи имеет вид:

$$I = \frac{E}{R + r}, \quad (338)$$

где I — ток в цепи; R — сопротивление внешней цепи; r — внутреннее сопротивление источника тока; E — ЭДС источника тока или:

$$E = IR + Ir. \quad (339)$$



ЭДС равна напряжению на разомкнутых клеммах источника тока.

Принцип компенсации ЭДС заключается в следующем (рис. 85).

Источник тока с ЭДС E_1 подключается к реохорду АВ, другая батарея с ЭДС E_2 подключается одноимённым полюсом к началу реохорда А и через чувствительный гальванометр Г к подвижному контакту С реохорда. По реохорду АВ течёт ток I и на участке АС происходит падение напряжения:

$$U = IR', \quad (340)$$

где R' — сопротивление участка АС реохорда.

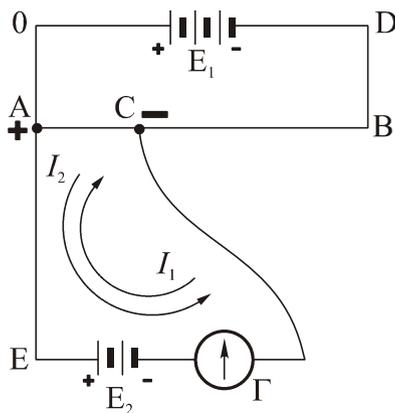


Рис. 85. Принцип компенсации ЭДС (E_1 — источник ЭДС

с внутренним сопротивлением r_1 ;

E_2 — источник ЭДС с внутренним сопротивлением r_2 ; Γ — гальванометр;

AB — реохорд ($R_{AB} = R$, $R_{AC} = R'$, $R_{CB} = R''$, $R' + R'' = R = \text{const}$))

Теперь рассмотрим контур АЕГС, в нём ток I_1 от элемента E_2 пойдёт от плюса к минусу по часовой стрелке. Ток I_2 от падения напряжения U на участке АС пойдёт в этом контуре против часовой стрелки. Когда ток I_1 будет равен току I_2 , в гальванометре ток идти не будет, т. е. $E_2 = U$.

Это явление называется **компенсацией** ЭДС, так как ЭДС скомпенсирована в этом случае падением напряжения U на участке АС реохорда. Чтобы произошла компенсация, необходимы два условия.

1. ЭДС элемента E_1 должна быть больше ЭДС элемента E_2 .
2. К точке А реохорда элементы E_1 и E_2 должны быть подключены одинаковыми полюсами.

Выберем положительное направление токов в соответствии с общим правилом, по которому за направление тока принимается направление от положительных полюсов к отрицательным, и применим к рассматриваемой схеме *правила Кирхгофа* (см. разд. 7.13).

Обозначим I :

$$I \equiv I_{0A} = I_{CD}. \quad (341)$$

Обозначим I' :

$$I' \equiv I_{AE} = I_{CF} . \quad (342)$$

Обозначим i :

$$i = I_{AC} . \quad (343)$$

Первое правило для точки А даёт:

$$I_{0A} + I_{AE} - I_{AC} = I + I' - i = 0 . \quad (344)$$

Первое правило для точки С даёт:

$$I_{AC} - I_{CF} - I_{CD} = i - I' - I = 0 . \quad (345)$$

Второе правило для контура A0E₁DBCA приводит к уравнению:

$$r_1 I + R'' I + R' i = r_1 I + (R - R') I + R' i = E_1 . \quad (346)$$

Второе правило для контура AEE₂ГСА приводит к уравнению:

$$r_2 I' + R' i = E_2 . \quad (347)$$

Ограничимся частным случаем и предположим, что сопротивления R' и R'' подобраны таким образом, что ток через гальванометр Г не течёт. В этом случае:

$$i = I , \quad (348)$$

$$r_1 I + (R - R') I + R' i = r_1 I + R I - R' I + R' i = (r_1 + R) I = E_1 , \quad (349)$$

$$I R' = E_2 . \quad (350)$$

Из двух последних уравнений получаем:

$$\frac{R'}{r_1 + R} = \frac{E_2}{E_1} , \quad (351)$$

$$E_2 = E_1 \frac{R'}{R + r_1} . \quad (352)$$

Пусть вместо источника с ЭДС E_2 в схему включён другой источник с ЭДС E_x и изменением переменных сопротивлений вновь достигнута компенса-

ция. Для этого вместо сопротивления R' потребовалось ввести сопротивление R'_x , тогда:

$$E_x = E_1 \frac{R'_x}{R + r_1}. \quad (353)$$

Деля почленно оба последних равенства друг на друга, находим:

$$\frac{E_2}{E_x} = \frac{R'}{R'_x}. \quad (354)$$

Отношение сравниваемых ЭДС не зависит от внутренних сопротивлений источников, от других сопротивлений источников и от других сопротивлений схемы и определяется только сопротивлениями участка цепи, к которому подключены сравниваемые источники. Не требуется знать и ЭДС вспомогательного источника, которая лишь должна быть достаточно постоянна и больше обеих сравниваемых ЭДС E_2 и E_x .

Для измерения ЭДС этим методом в качестве одного из сравниваемых источников выбирают *нормальный элемент*, ЭДС которого известна очень точно.

Контрольные вопросы

- ? Почему описанный метод называется компенсационным?
- ? Какими существенными достоинствами обладает данный метод?

ГЛАВА 8

Электрический ток в электролитах, в вакууме и в газах

8.1. Электрический ток в электролитах

Электролит — жидкое или твёрдое вещество, в котором в заметной концентрации присутствуют заряженные частицы (ионы), обуславливающие прохождение через него электрического тока, т. е. обладающее ионной проводимостью.

Жидкие электролиты — расплавы (жидкости при температурах, относительно далёких от критической точки, т. е. ближе к температуре плавления) солей (ионные жидкости), водные и неводные растворы солей, кислот и оснований.

К **твёрдым электролитам** относятся ионные кристаллы с дефектами кристаллической структуры с низкой ионной проводимостью.



Электрический ток в электролитах — направленное движение ионов под действием электрического поля.

Согласно гипотезе, предложенной литовским физиком и химиком немецкого происхождения Кристианом И. Д. фон Грётгусом (Grothus, 1785—1822 гг.) в 1805 г., молекулы растворённых солей состоят из двух частей, одна из которых заряжена положительно, а другая — отрицательно. В водном растворе они разделяются. Причина этого разделения в то время не была установлена.

Первым, кто предложил механизм возникновения ионов (заряженных фрагментов молекул) в растворах, был немецкий физик Рудольф Ю. Э. Клаузиус (Clausius, 1822—1888 гг.). Он считал, что в растворах каждая молекула растворённого вещества находится в окружении молекул растворителя. Если растворённое вещество полярно (соль, основание, кислота) и молекулы растворителя также полярны (вода), то вблизи молекул растворённого вещества молекулы растворителя испытывают ориентирующую силу (кулоновское взаимодействие полярных групп), поворачивающую молекулы растворителя к "противоиону" (рис. 86).

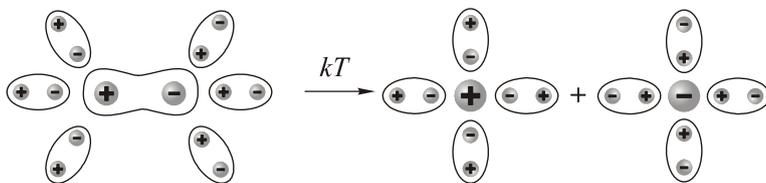
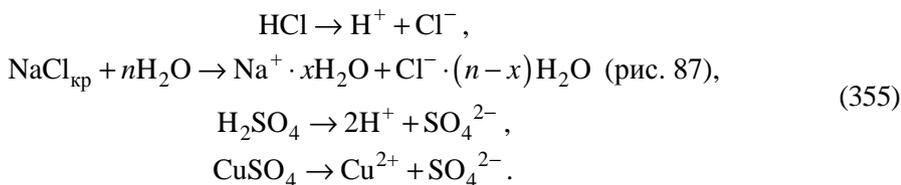


Рис. 86. Диссоциация под действием кулоновского взаимодействия полярных групп за счёт энергии теплового движения

Создаваемое молекулами растворителя электрическое поле ослабляет связь между ионами растворённого вещества, вследствие чего эта связь нарушается и может разорваться (диссоциировать) за счёт энергии теплового движения. В результате молекула растворённого вещества диссоциирует на два или большее число противоионов:



При невысоких температурах образовавшиеся ионы окружены полярными молекулами растворителя — сольватированы. Структуру, образованную из иона и сольватной оболочки, называют **сольватом**. Можно сказать, что сольватами называют молекулярные комплексы, образовавшиеся в результате **сольватации** — взаимодействия молекул растворителя с молекулами (ионами) растворённого вещества.

Интенсивное тепловое движение сольватов и молекул растворителя разрушает связь между ионом и молекулами, образующими сольватную оболочку. Следовательно, при высоких температурах размеры сольвата уменьшаются, и сольватная оболочка исчезает.

Образовавшиеся ионы при своём тепловом движении могут встретиться с противоположно заряженным ионом и вновь объединиться в нейтральную молекулу. Этот процесс называют **рекомбинацией**. Сольватная оболочка уменьшает вероятность рекомбинации. В результате непрерывно идущих процессов диссоциации и рекомбинации устанавливается стационарное равновесие, в котором доля диссоциировавших молекул в среднем остаётся неизменной.

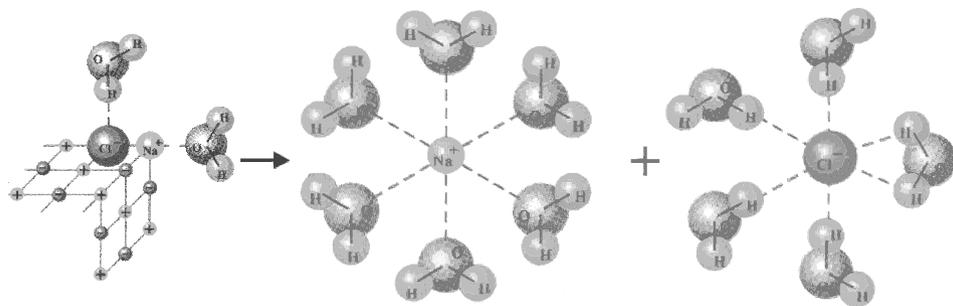


Рис. 87. Пример растворения и диссоциации ионного кристалла поваренной соли в воде

Наибольшей диссоциирующей способностью обладают растворители с наибольшей диэлектрической проницаемостью. К таким растворителям относится вода, у которой при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\epsilon = 81$.

Если в электролит поместить электроды и подать на них разность потенциалов, то ионы электролита в электрическом поле придут в направленное движение.

Анод — электрод в электролите, около которого происходит окисление ионов или молекул, входящих в состав электролита.

Катод — электрод в электролите, около которого происходит восстановление ионов, входящих в состав электролита.

Например, в водном растворе HCl ионы Cl^- , подходя к аноду, отдадут ему избыточный электрон, разрядятся до атомов Cl , которые превратятся в молекулы Cl_2 :



ионы водорода (протоны), принимая электроны на поверхности катода, превращаются в молекулы водорода H_2 :





В электролитах под действием электрического поля наблюдается ионная проводимость. В процессе переноса зарядов расходуется растворённое вещество, а на электродах выделяются химические продукты.

К ионным проводникам, которыми являются электролиты, применим закон Ома.

Обозначим число свободных отрицательно заряженных ионов (анионов) N_- , а число положительно заряженных ионов (катионов) N_+ . Заряды ионов кратны заряду электрона ($e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). Кратность заряда ионов — Z .

Так как в растворе электролита суммарный заряд анионов равняется суммарному заряду катионов, то:

$$eZ_+N_+ = eZ_-N_- . \quad (358)$$

В электрическом поле с напряжённостью E катионы движутся по направлению вектора E , а анионы — в противоположном направлении. Появляется ток зарядов. Плотность этого тока определяют из соотношения:

$$|j| = eZ_+n_+v_+ + eZ_-n_-v_- , \quad (359)$$

где n_+ — концентрация положительных ионов; v_+ — дрейфовая скорость положительных ионов; n_- — концентрация отрицательных ионов; v_- — дрейфовая скорость отрицательных ионов.

Так как на анионы и катионы в электрическом поле с напряжённостью E действует сила:

$$F_E = eZE , \quad (360)$$

то под действием этой силы ионы движутся с ускорением. Электролит как среда оказывает сопротивление направленному движению ионов. При радиусах r сольватов ионов и вязкости η электролита по закону Стокса будет действовать сила вязкого трения:

$$|F_{\text{Ст}}| = |6\pi\eta r\mathbf{v}| , \quad (361)$$

где $\pm\mathbf{v}$ — скорость движения сольватов.

В стационарном режиме устанавливается равенство сил:

$$\begin{aligned} F_E + F_{\text{Ст}} &= 0 , \\ F_E &= -F_{\text{Ст}} , \\ |eZE| &= |6\pi\eta r\mathbf{v}| . \end{aligned} \quad (362)$$

Следовательно, скорость движения ионов в электролите:

$$v = \frac{Ze}{6\pi\eta r} E = \mu E, \quad (363)$$

где $\mu \equiv \frac{Ze}{6\pi\eta r}$ — подвижность ионов (табл. 35).

Таблица 35. Подвижность ионов в водных растворах при 18 °C¹ [38]

Ионы ²	Подвижность μ , см ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹
H ⁺	0,003263
K ⁺	0,000669
Na ⁺	0,000450
Ag ⁺	0,00056
Zn ²⁺	0,00048
Fe ³⁺	0,00046
OH ⁻	0,00180
Cl ⁻	0,00068
NO ₃ ⁻	0,00062
SO ₄ ²⁻	0,00068
CO ₃ ²⁻	0,00062

Представим плотность тока в электролите как сумму плотностей токов анионов и катионов, и, учитывая полученное выражение для скоростей ионов, получим **закон Ома в дифференциальной форме для электролитов**:

$$j = j_+ + j_- = eZ_+ n_+ v_+ + eZ_- n_- v_- = eZn(\mu_+ + \mu_-) E = \sigma E, \quad (364)$$

где $\sigma = eZn(\mu_+ + \mu_-)$.

¹ При повышении температуры на 1 °C подвижности ионов возрастают примерно на 2%.

² Число плюсов или минусов у символа определяет число элементарных зарядов, переносимых одним ионом.



Электропроводность электролитов определяется концентрацией, зарядовым числом и подвижностью свободных ионов.

Удельное сопротивление электролитов с повышением температуры уменьшается (в отличие от проводников первого рода) (табл. 36).

Таблица 36. Удельное электрическое сопротивление некоторых электролитов для различных концентраций при 18 °С [38]

Растворённое вещество	Концентрация n , %	Плотность ρ , г·см ⁻³	Удельное электрическое сопротивление $\rho_{18^\circ\text{C}}$, Ом·м	Температурный коэффициент χ , °С ⁻¹
Едкий натр NaOH	5	1,05	$5,1 \cdot 10^{-2}$	0,0201
	10	1,11	$3,2 \cdot 10^{-2}$	0,0217
	20	1,22	$3,0 \cdot 10^{-2}$	0,0299
	40	1,43	$8,3 \cdot 10^{-2}$	0,0648
Кислота азотная HNO ₃	10	1,05	$2,1 \cdot 10^{-2}$	0,0145
	20	1,12	$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,0137
	30	1,18	$1,3 \cdot 10^{-2}$	0,0139
	40	1,25	$1,4 \cdot 10^{-2}$	0,0150
Кислота серная H ₂ SO ₄	5	1,032	$4,8 \cdot 10^{-2}$	0,0121
	20	1,14	$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,0145
	30	1,22	$1,4 \cdot 10^{-2}$	0,0162
	40	1,30	$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,0178
Кислота соляная HCl	5	1,023	$2,5 \cdot 10^{-2}$	0,0158
	20	1,1	$1,3 \cdot 10^{-2}$	0,0154
	40	1,2	$1,9 \cdot 10^{-2}$	

Таблица 36 (окончание)

Растворённое вещество	Концентрация n , %	Плотность ρ , г·см ⁻³	Удельное электрическое сопротивление $\rho_{18^\circ\text{C}}$, Ом·м	Температурный коэффициент χ , °C ⁻¹
Купорос медный CuSO ₄ ·5H ₂ O	5	1,062	52,9·10 ⁻²	0,0216
	10	1,107	31,5·10 ⁻²	0,0218
	17,5	1,206	23,8·10 ⁻²	0,0236
Купорос цинковый ZnSO ₄ ·7H ₂ O	5	1,062	52,4·10 ⁻²	0,0225
	10	1,107	31,2·10 ⁻²	0,0223
	20	1,232	21,3·10 ⁻²	0,0243
Хлорид аммония (нашатырь) NH ₄ Cl	5	1,011	10,9·10 ⁻²	0,0198
	10	1,029	5,6·10 ⁻²	0,0186
	20	1,057	3,8·10 ⁻²	0,0161
Хлорид натрия (соль поваренная) NaCl	5	1,034	14,9·10 ⁻²	0,0217
	10	1,071	8,3·10 ⁻²	0,0214
	20	1,148	5,1·10 ⁻²	0,0716

Удельное сопротивление электролитов для различных температур ρ_t может быть подсчитано по формуле:

$$\rho_t = \rho_{18^\circ\text{C}} [1 - \chi(t - 18)], \quad (365)$$

где χ — температурный коэффициент; $\rho_{18^\circ\text{C}}$ — удельное сопротивление при 18 °C; t — температура, при которой рассчитывается ρ_t .

Контрольные вопросы

- ? Какие вещества относятся к электролитам?
- ? Что такое электролитическая диссоциация?
- ? Что называют электрическим током в жидкостях?
- ? Чем обусловлена электропроводность электролитов?

8.2. Электролиз

В растворах электролитов находятся свободные ионы, и прохождение электрического тока связано с одновременным переносом вещества к электродам.

При прохождении тока через электролит на металлических электродах, находящихся в электролите, ионы разряжаются, превращаясь в нейтральные атомы или радикалы, и вступают в реакции, которые приводят к появлению химических продуктов.

Выделение на электродах химических продуктов при прохождении через электролит электрического тока называют электролизом.

Электролиз¹ — совокупность электрохимических процессов на электродах, погружённых в электролит, в результате которых вещества в составе электролита выделяются в свободном виде (рис. 88).

В 1800 г. английский физикохимик Уильям Николсон (Nicholson, 1753—1815 гг.) первым наблюдал **электролитическое разложение (электролиз) воды** на кислород и водород (рис. 89).

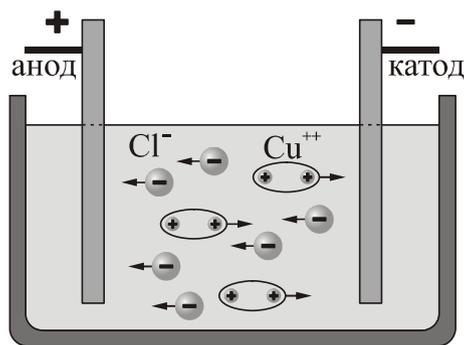


Рис. 88. Электролиз

Электролиз используют для производства ряда веществ путём электрохимических превращений компонентов электролита — растворённых или расплавленных солей, специально добавляемых веществ и т. д.

¹ От электро... и греч. *lysis* — разложение, растворение, распад.

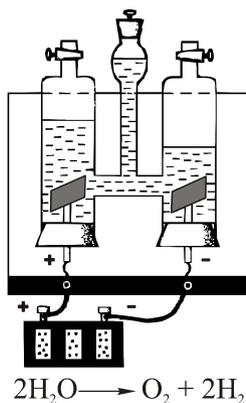
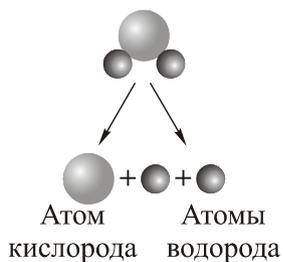
Гальванотехника — область прикладной электрохимии, охватывающая процессы электролитического осаждения металлов на поверхность металлических и неметаллических изделий. Разработана российским учёным Якоби в 1838 г.

Гальваностегия — покрытие металлических предметов тонким слоем другого металла (никелирование, хромирование, оцинковка, серебрение).

Гальванопластика — получение рельефных копий изображений (клише для печатания денежных знаков, матрицы для печатания газет).

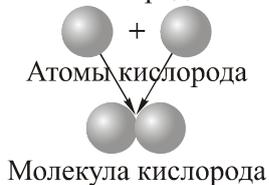
Электрополировка — исчезновение выступов на поверхности активного анода.

Схема распада молекул воды



Схемы:

а) образования молекулы кислорода



б) образование молекулы водорода

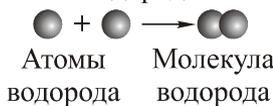


Рис. 89. Разложение воды электрическим током

Протекание тока в электролитах может играть и вредную роль. Металлические элементы машин, механизмов, строений, трубопроводов и т. п. контактируют с водой, которая всегда присутствует в воздухе и почве. Поскольку вода практически всегда содержит ионы различных солей, металл оказывает-

ся в электролите. Если в одном и том же электролите оказываются разные металлы или металл с примесью (что имеет место в подавляющем большинстве случаев — например, для сплавов), то их потенциалы относительно электролита становятся разными, и поэтому между ними начинает течь электрический ток.

В результате металлы окисляются и разрушаются, т. е. происходит **коррозия металлов** — разрушение металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с внешней (коррозионной) средой.

Из-за коррозии ржавеют и разрушаются корпуса судов, автомобилей, всевозможных сооружений и механизмов. В результате коррозии ежегодно теряется до 1,5% всего металла, накопленного и эксплуатируемого человечеством. Коррозия трубопроводов приводит к трудно оцениваемым в денежном исчислении экологическим авариям.

Контрольные вопросы

- ? Почему при прохождении тока по электролиту происходит перенос вещества, а при прохождении по металлическому проводнику не происходит?
- ? Что называется электролизом?
- ? Приведите примеры применения электролиза.

8.3. Законы Фарадея

Фарадей установил опытным путём 2 основных закона электролиза.

При разряде на электроде N ионов с зарядовым числом Z за время t через электролит к электроду переносится суммарный заряд:

$$Q = eZN = It. \quad (366)$$

Согласно **первому закону Фарадея для электролиза**, масса m вещества, выделившаяся на каком-либо из электродов, пропорциональна величине заряда Q , прошедшего через электролит:

$$m = KQ = KeZN = Kit, \quad (367)$$

где K — электрохимический эквивалент вещества, численно равный массе вещества, выделившегося на электроде, при прохождении через электролит единицы количества электричества. Обычно K выражают в граммах (или миллиграммах) на кулон (табл. 37).



Количество выделившегося на электроде вещества при электролизе пропорционально прошедшему через электролит количеству электричества.

Химический эквивалент вещества — отношение атомной массы A к валентности Z вещества или отношение молярной массы к количеству электронов, участвующих в реакции одной молекулы (табл. 37).

Таблица 37. Электрохимические и химические эквиваленты некоторых веществ [38, 65]

Ион ¹	Атомная масса A	Валентность Z	Химический эквивалент вещества A/Z	Электрохимический эквивалент K , мг·Кл ⁻¹
Алюминий Al ³⁺	27,1	3	9,03	0,0936
Водород H ⁺	1,008	1	1,008	0,01044
Кислород O ²⁻	16,0	2	8,0	0,0828
Медь Cu ⁺	63,6	1	63,6	0,6590
Медь Cu ²⁺	63,6	2	31,8	0,3297
Никель Ni ²⁺	58,7	2	29,35	0,304
Серебро Ag ⁺	107,9	1	107,9	1,118
Хлор Cl ⁻	35,5	1	35,5	0,3672

¹ Число плюсов или минусов у символов показывает число элементарных зарядов, переносимых одним ионом.

Так как:

$$K = \frac{m}{eZ} = \frac{mN_A}{eZN_A} = \frac{1}{eN_A} \frac{A}{Z}, \quad (368)$$

где N_A — постоянная Авогадро; $\frac{A}{Z}$ — химический эквивалент вещества; Z — валентность вещества; $eN_A = F = \text{const}$, то получается выражение, называемое **вторым законом Фарадея для электролиза**:

$$K = \frac{1}{F} \frac{A}{Z}, \quad (369)$$

где F — постоянная Фарадея.

Постоянная Фарадея (число Фарадея) F — фундаментальная физическая константа, равная произведению элементарного заряда (заряда электрона) на постоянную Авогадро: $F \equiv eN_A = (9,6485309 \pm 0,0000029) \cdot 10^4$ Кл·моль⁻¹. Значение F определялось на основе измерений электрохимического эквивалента серебра.



Электрохимический эквивалент пропорционален химическому эквиваленту данного вещества.

Оба закона Фарадея можно выразить одной формулой и получить **объединённый закон Фарадея для электролиза**:

$$m = \frac{A}{Z} \frac{Q}{F}. \quad (370)$$

Количество вещества, масса которого в граммах равна химическому эквиваленту, называют **грамм-эквивалентом** (г-экв).



Если через любой электролит проходит заряд, равный числу Фарадея, то на каждом из электродов выделяется 1 г-экв вещества.

Явление электролиза показывает, что молекулы растворённого вещества в электролитах существуют в виде положительно и отрицательно заряженных ионов, которые под действием электрического поля движутся в противоположные стороны: положительные ионы — к катоду, а отрицательные ионы — к аноду. Достигая анода, отрицательный ион передаёт аноду свой

отрицательный заряд, отчего один или несколько электронов (в зависимости от заряда иона) проходят по внешней цепи, и ион превращается в нейтральный атом или молекулу, выделяющуюся на аноде. Положительный ион, напротив, заимствует от катода один или несколько электронов и, нейтрализуясь, выделяется на катоде.

Ионы, выделяющиеся на аноде, т. е. несущие отрицательный заряд, Фарадей назвал **анионами**, а выделяющиеся на катоде (положительно заряженные) — **катионами**.

Контрольные вопросы

- ? Напишите и сформулируйте первый закон Фарадея для электролиза.
- ? Что называют электрохимическим эквивалентом вещества? Какова его физическая суть?
- ? Напишите и сформулируйте второй закон Фарадея для электролиза.
- ? Напишите формулу объединённого закона Фарадея для электролиза.
- ? Что называют постоянной Фарадея для электролиза? Каков физический смысл этой постоянной?

8.4. Источники тока

По механизму своего действия источник тока представляет собой устройство, в котором происходит разделение положительных и отрицательных зарядов. После разделения эти заряды переходят на клеммы (электроды) источника. Следовательно, единственным источником электрического поля в проводнике могут быть только электрические заряды, поступающие в проводник от источника. В однородном проводнике при прохождении по нему постоянного тока заряды создают поверхностную плотность тока. В неоднородных проводниках, когда ток изменяется от точки к точке, заряды появляются и в объёме проводника. Заряды по *закону Кулона* (см. разд. 1.4) действуют на другие заряды, создавая их такое распределение, которое обеспечивает существование в проводнике электрического поля, под влиянием которого и появляется непрерывный ток зарядов — *постоянный электрический ток*. Если ток стационарный, то в каждой точке поверхности проводника на место уходящих

зарядов от источника через проводник непрерывно поступают новые заряды в результате действия сторонней электродвижущей силы.

Как мы уже указывали, в 1800 г. Вольта изобрёл первый источник постоянного тока, названный впоследствии "*вольтов столб*" (последовательно соединённые серебряные и цинковые пластинки в растворе серной кислоты). Это была первая в мире электрическая батарейка.

Между электродом, погружённым в электролит, и раствором устанавливается разность потенциалов. Эту разность называют **электрохимическим потенциалом** данного электрода в данном растворе.

Абсолютными нормальными потенциалами U_H называют значения электрохимических потенциалов металлов в растворах с **нормальной концентрацией** их ионов (т. е. с концентрацией 1 г-экв ионов на 1 л). В этих условиях электрохимический потенциал зависит только от рода металла (табл. 38).

Таблица 38. Абсолютные нормальные потенциалы некоторых металлов [38]

Металл	U_H , В
Железо	-0,17
Кадмий	-0,13
Марганец	-0,78
Медь	0,61
Никель	0,04
Ртуть	1,13
Свинец	0,15
Серебро	1,07
Хром	-0,29
Цинк	-0,50

При погружении в электролит двух электродов между ними устанавливается разность потенциалов, равная разности электрохимических потенциалов

электродов. Электролит с двумя погруженными в него разнородными электродами называют гальваническим элементом.

В 1836—1840 гг. английским физиком и химиком Джоном Ф. Даниэлем (Daniell, 1790—1845 гг.) и независимо от него Якоби был разработан медно-цинковый гальванический элемент Даниеля—Якоби (рис. 90). Элемент состоял из Cu и Zn электродов, которые погружены в растворы CuSO_4 и ZnSO_4 соответственно, разделённые пористой перегородкой: $\text{Cu} \mid \text{CuSO}_4 \mid \text{ZnSO}_4 \mid \text{Zn}$. ЭДС элемента складывается из разницы потенциалов электродов, а также диффузионного потенциала на границе $\text{CuSO}_4 \mid \text{ZnSO}_4$; при 25 °С и равенстве концентраций растворов составляет ~1,10 В. В настоящее время элемент Даниеля—Якоби используется в основном в лабораторных исследованиях.



Рис. 90. Гальванический элемент Даниеля—Якоби

Гальванический элемент — химический источник тока, в котором электрическая энергия вырабатывается в результате прямого преобразования химической энергии окислительно-восстановительной реакции. В состав гальванического элемента входят два разнородных электрода (один — содержащий окислитель, другой — восстановитель), контактирующих с электролитом (рис. 91).

Для того чтобы с помощью *электрометров* (см. разд. 4.2) можно было измерять напряжение, их необходимо сначала проградуировать. Для градуировки электрометров (а также в схемах *компенсационного метода измерения ЭДС*) пользуются нормальными элементами, которые представляют собой гальванические элементы, составленные из таких веществ, которые обеспечивают высокую стабильность напряжения между электродами. Это напряжение тщательно измерено и хорошо известно, поэтому нормальные элементы являются удобными *эталоном* напряжений.

Нормальный элемент — гальванический элемент, ЭДС которого стабильна при постоянной температуре и давлении. Различают **нормальный элемент насыщенный** (ЭДС 1,0185—1,0187 В) и **ненасыщенный** (ЭДС 1,0186—1,0194 В).

Положительный электрод - анод
Отрицательный электрод - катод

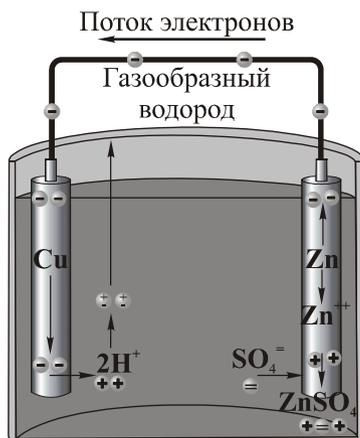


Рис. 91. Гальванический элемент и схема его работы

Нормальные элементы используют в качестве образцовой меры ЭДС и источника опорной ЭДС в измерительных приборах.

Большое распространение получил нормальный кадмиевый элемент (элемент Вестона¹). Его ЭДС при 20 °С равна 1,0186 В. При комнатных температурах

¹ Элемент Вестона (Weston cell) изобретён англо-американским инженером Эдвардом Вестоном (Weston, 1850—1936 гг.).

ЭДС этого элемента почти не зависит от температуры (при повышении температуры t на 1°C она уменьшается менее чем на $0,0001\text{ В}$):

$$E_t = 1,0186 - 406 \cdot 10^{-7} (t - 20) - 95 \cdot 10^{-8} (t - 20)^2 \text{ (В)}. \quad (371)$$

Устройство элемента **Вестона** показано на рис. 92. Он состоит из двух соединяющихся стеклянных пробирок, в дно которых впаяны платиновые проволоки. На дне одной из пробирок находится небольшое количество ртути Hg (1), а сверху — паста (деполяризатор) из смеси сернокислой ртути HgSO₄ и сернокислого кадмия CdSO₄ (3). На дне другой пробирки имеется амальгама кадмия HgCd (2). Пробирки заполнены насыщенным раствором сернокислого кадмия CdSO₄ (4). Чтобы раствор был всегда насыщен, над пастой и отрицательным электродом помещены кристаллы CdSO₄ (5). Весь стеклянный сосуд заключён в защитный кожух. В этом элементе положительным электродом (**анодом**¹) служит ртуть Hg (1), а отрицательным (**катодом**²) — амальгама кадмия HgCd (2).

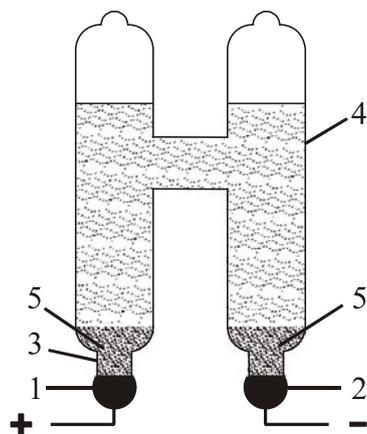


Рис. 92. Кадмиевый нормальный элемент Вестона:

1 — ртуть Hg; 2 — амальгама кадмия HgCd;

3 — смесь сернокислой ртути HgSO₄ и сернокислого кадмия CdSO₄;

4 — насыщенный раствор сернокислого кадмия CdSO₄; 5 — кристаллы CdSO₄

От такого элемента можно брать только очень слабые токи, не превышающие нескольких микроампер, так как только при этом условии его напряжение

¹ От греч. anodos — движение вверх, восхождение.

² От греч. kathodos — ход вниз, возвращение.

можно считать неизменным. При больших токах он легко поляризуется и после этого ему надо дать время восстановиться. Если в течение минуты через элемент Вестона протекает ток от 0,5 до 10 мкА, то элементу для полного восстановления потребуется от 10 минут до 24 часов.

Для получения более высоких напряжений нормальные элементы можно соединить между собой последовательно в батарее так, чтобы положительный полюс каждого предыдущего элемента был соединён с отрицательным полюсом последующего (рис. 93).

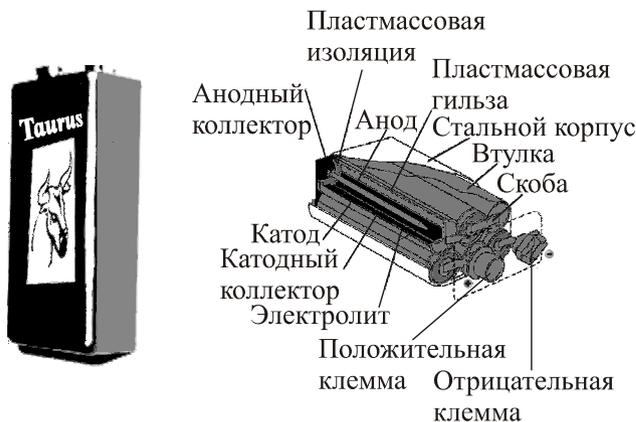


Рис. 93. 9-вольтовый марганцево-цинковый гальванический элемент со щелочным электролитом (сухой элемент) типа "Крона"

Электрический аккумулятор¹ — химический источник тока многократного действия — преобразует электрическую энергию в химическую и по мере надобности обеспечивает обратное преобразование; используется как автоматический источник электроэнергии (например, на транспорте).

Аккумуляторы являются гальваническими элементами, в которых электроды изготовлены из таких материалов, что они восстанавливают свои первоначальные свойства при пропускании тока (зарядке) в обратном направлении по сравнению с током при разрядке (табл. 39).

Первый кислотный свинцовый аккумулятор был создан французским физиком Гастоном Плантэ (Plante, 1834—1889 гг.) в 1859 г.

¹ От лат. *accumulator* — собиратель.

Количество электричества, которое может быть получено от аккумулятора при данных условиях работы (температуре, разрядном токе, начальном напряжении), называется **ёмкостью аккумулятора**. Ёмкость аккумулятора выражается в *ампер-часах* ($A \times ч$).

Таблица 39. Характеристики некоторых гальванических элементов [38]

Название элемента	Отрицательный полюс	Положительный полюс	Раствор	ЭДС, В
Аккумулятор кислотный свинцовый	Губчатый свинец	Перекись свинца PbO_2	27—28%-й раствор H_2SO_4 , свободный от хлора, плотность 1,20	—0,17
Аккумулятор щелочной серебряно-цинковый	Окись цинка	Серебро	Раствор едкого кали (KOH)	1,5
Аккумулятор щелочной железоникелевый (или никелькадмиевый)	Порошкообразное железо (или кадмий с примесью окислов железа)	Двуокись никеля	20%-й раствор едкого кали (KOH)	1,4—1,1
Элемент Вестона (нормальный) (рис. 92)	Амальга кадмия	Ртуть	Насыщенный раствор $CdSO_4$, паста из $HgSO_4$ и $CdSO_4$	1,0183
Элемент Грене	Цинк	Уголь	12 частей $K_2Cr_2O_7$, 25 частей H_2SO_4 , 100 частей H_2O	2,01
Элемент Даниеля—Якоби (рис. 90)	Цинк	Медь	Растворы у электродов разделены: цинк в растворе серной кислоты (5—10%), медь в насыщенном растворе медного купороса $CuSO_4$	1,1
Элемент Лекланше	Цинк	Уголь	Раствор нашатыря, перекись марганца с угольным порошком	1,46

Таблица 39 (окончание)

Название элемента	Отрицательный полюс	Положительный полюс	Раствор	ЭДС, В
Элемент Лекланше (сухой)	Цинк	Уголь	1 часть ZnO, 1 часть NH ₄ Cl, 3 части ZnCl ₂ и вода до получения пасты	1,3

В последние годы созданы аккумуляторы столь большой ёмкости, что это позволило на автомобилях вместо двигателей внутреннего сгорания использовать *электромоторы*. Например, аккумуляторная батарея с реакцией между жидким натрием и жидкой серой может накопить в 4 раза больший заряд, чем свинцовая аккумуляторная батарея. В ряде стран уже существуют **электромобили**, особенности которых (малая шумность, полное отсутствие выбросов в атмосферу, способность непосредственно использовать "вечное топливо" — энергию Солнца) делают их использование в городских условиях особенно перспективным. Максимальная скорость электромобиля составляет более 40 км·ч⁻¹, а модели, предназначенные для езды по трассам, развивают скорость до 55 км·ч⁻¹. В 2004 г. в США было официально зарегистрировано более 28 000 электромобилей только концерна DaimlerChrysler.

В 2009 г. публике был представлен электрический Renault Kangoo. Аккумуляторы позволяют ему проехать без дозаправки 100 км, при этом энергия запасается при торможении. В продажу электромобиль поступит в 2011 г. Готовятся к массовому производству и модели от других производителей: Chevrolet Volt, Opel Ampera, Toyota IQ FT-EV и др. Для любителей скорости есть Tesla Roadster. К 2009 г. было выпущено 160 таких электрокаров, которые разгоняются с места до 100 км·ч⁻¹ за 3,9 с.

Пока создание электромобилей тормозится не только их относительно высокой ценой, но и отсутствием необходимой инфраструктуры. Однако Сингапур, Великобритания, Гонконг, Израиль, КНР, Монако, Португалия, США, Швейцария, Япония и другие страны начали создавать инфраструктуры типа Zero Emission mobility¹, позволяющие владельцам электромобилей подзаряжать их транспортные средства прямо на городских улицах.

Интересно, что в мире к началу XX в. на 936 бензиновых авто приходилось 1 585 электрических. На электромобиле впервые была достигнута скорость

¹ Движение без вредных выбросов.

100 км·ч⁻¹ (К. Женатци, Франция, 1898 г.). Петербургский изобретатель Ипполит Владимирович Романов спроектировал четыре модели электромобилей: двухместный, четырёхместный, а также 17- и 24-местный омнибусы. Двухместный кэб и 17-местный (15 сидящих и 2 стоящих пассажиров) омнибус были построены по его проектам в 1899 г. Большое внимание Романов придавал снижению массы аккумуляторов. Аккумуляторы конструкции Романова имели более тонкие пластины, чем большинство батарей того времени, и располагались не вертикально, а горизонтально. Масса решёток, составлявших основу этих пластин, составляла 30% от общей массы, в то время как у аккумуляторов других конструкций этот показатель достигал 66%. Источником энергии 17-местного **электрического омнибуса Романова** служили 44 аккумуляторные батареи, размещённые в 8 ящиках в задней части кузова. Они обеспечивали без подзарядки пробег 64 км. Два электромотора общей мощностью 12 л. с. сообщали омнибусу, снаряжённая масса которого составляла около 1 600 кг, скорость 11 км·ч⁻¹, и позволяли двигаться также и задним ходом. В оборудовании омнибуса входили боковые сигнальные фонари, электрический прожектор, сигнальный звонок.

Однако в начале XX в. аккумуляторы не смогли конкурировать с топливными баками по количеству запасённой энергии. С 1970-х гг. появление усовершенствованных аккумуляторов, способных конкурировать с горючими источниками энергии, привело к новому развитию электромобиля. В 1989 г. на гонках электромобилей победил австрийский электромобиль с натриевой батареей. Он развил скорость 130 км·ч⁻¹, пробег без перезарядки составил 200 км, а количество возможных перезарядок составляло несколько тысяч.

Таблица 40. Сравнение тепловых и электрических источников энергии

Источники энергии	Удельная энергоёмкость		Удельная мощность, Вт·кг ⁻¹		Срок службы (число циклов)
	ккал·кг ⁻¹	Вт·ч·кг ⁻¹	минимальная	максимальная	
Горючее					
Дрова (воздушно-сухие)	2 500	3 000			
Уголь (антрацит)	8 000	9 600			
Нефть	11 000	13 000			

Таблица 40 (продолжение)

Источники энергии	Удельная энергоёмкость		Удельная мощность, Вт·кг ⁻¹		Срок службы (число циклов)
	ккал·кг ⁻¹	Вт·ч·кг ⁻¹	минимальная	максимальная	
Горючее					
Бензин	11 000	13 000			
Газ (пропан)	11 000	13 000			
Гальванические элементы					
Марганцево-цинковый с соевым электролитом (элемент Лекланшэ)	17—50	20—60	5	20	несколько
Марганцево-цинковый с щелочным электролитом	50—80	60—90	5	20	
Литиевый	260—400	300—600	10—20	50—100	
Ртутно-цинковый		400			
Воздушно-цинковый		250			
Аккумуляторы					
Никель-железный (щелочной)	25—30	20—35	4	100	1 000—2 000
Свинцовый (кислотный)	30—35	25—40	4	100	100—1 500
Серебряно-цинковый	85—100	100—130	10—30	600	100—200
Никель-цинковый		ок. 60			ок. 300

Таблица 40 (окончание)

Источники энергии	Удельная энергоёмкость		Удельная мощность, Вт·кг ⁻¹		Срок службы (число циклов)
	ккал·кг ⁻¹	Вт·ч·кг ⁻¹	минимальная	максимальная	
Аккумуляторы					
Никель-водородный		50—60			неск. тыс.
Литий-серный	170	200	50	200	500
Натрий-серный	180	220	50	200	1000

Контрольные вопросы

- ? Чему равна ЭДС нескольких последовательно соединённых источников тока?
- ? Чему равна ЭДС нескольких параллельно соединённых одинаковых источников тока?
- ? Почему внутреннее сопротивление аккумуляторов делают очень малым?

8.5. Эмиссия электронов

Блажен, кто вырваться на свет
Надеется из лжи окружной.

И. В. Гёте¹

В любом металле содержится очень много электронов — около 10^{22} на кубический сантиметр. Так как электроны удерживаются внутри металла, то вблизи поверхности существуют силы, действующие на электроны и направленные внутрь металла. Эти силы возникают вследствие притяжения между электронами и положительными ионами решётки. В результате такого взаи-

¹ Иоганн Вольфганг Гёте (Goethe, 1749—1832 гг.) — немецкий писатель и естествоиспытатель.

модействия в поверхностном слое металлов появляется *электрическое поле*, а *потенциал* при переходе из внешнего пространства внутрь металла увеличивается на некоторую величину. Соответственно уменьшается потенциальная энергия электрона. Если считать потенциальную энергию электрона в вакууме равной нулю, то потенциальная энергия электрона внутри металла окажется отрицательной.

В координатах "энергия—расстояние" взаимодействие внутри металла удобно изобразить в виде "потенциальной ямы", на дне которой находятся электроны. Глубина потенциальной ямы называется **электронным сродством** (сродством к электрону).

Сродство к электрону — свойство атомов или молекул образовывать прочную связь с электроном.

Чтобы извлечь хотя бы один электрон из металла, необходимо совершить определённую работу, — её называют работой выхода. **Работа выхода Φ** — энергия, которая затрачивается твёрдым или жидким телом при тепловом возбуждении электрона этого тела в вакуум (при равной нулю кинетической энергии) (табл. 41, 42). Работа выхода на графике "энергия—расстояние" представится высотой потенциального барьера, которую электрон должен преодолеть, чтобы выйти из металла. Работа выхода — характеристика поверхности тела. Грани одного и того же кристалла, образованные разными кристаллографическими плоскостями или покрытые разными веществами, имеют разные работы выхода (табл. 43, 44).

Таблица 41. Работа выхода электрона для некоторых металлов [30]

Металл	Работа выхода Φ , эВ
Алюминий	3,74
Барий	2,29
Висмут	4,62
Вольфрам	4,50
Железо	4,36
Золото	4,58
Калий	2,15
Кобальт	4,25

Таблица 41 (окончание)

Металл	Работа выхода Φ , эВ
Литий	2,39
Магний	3,5
Медь	4,47
Молибден	4,27
Натрий	2,27
Никель	4,84
Платина	5,29
Серебро	4,28
Титан	3,92
Цезий	1,89
Цинк	3,74

Условие, при котором электрон может покинуть металл, имеет вид:

$$\frac{1}{2} m_e v_n^2 \geq \Phi, \quad (372)$$

где m_e — масса электрона; v_n — проекция тепловой скорости электрона на направление нормали к поверхности; Φ — работа выхода.

При комнатных температурах и ниже практически для всех электронов в металлах энергия электрона в металле меньше энергии покоящегося электрона вне металла и электроны связаны в пределах проводника. Следовательно, для того чтобы электрон покинул металл ("вышел" из металла), электрону нужно каким-то образом сообщить дополнительную энергию. В этом случае часть электронов металла получает возможность покинуть металл, и происходит испускание электронов — **электронная эмиссия**.

В зависимости от того, каким способом сообщена электронам эта дополнительная энергия, различаются разные типы электронной эмиссии:

□ при подведении тепловой энергии наблюдается **термоэлектронная эмиссия**, и испускаются **термоэлектроны**. Термоэлектронная эмиссия

была впервые изучена английским физиком Оуэном У. Ричардсоном (Richardson, 1879—1959 гг.);

- при подведении световой энергии наблюдается **фотоэмиссия (фотоэффект)**, и испускаются **фотоэлектроны**;
- если энергия сообщается электронам бомбардировкой извне какими-либо частицами (электронами, ионами), то наблюдается **вторичная электронная эмиссия**, и испускаются **вторичные электроны**.



Выйти из металла могут только те электроны, энергия которых больше энергии электрона, покоящегося вне эмиттера.

В результате термоэлектронной эмиссии в вакууме в любой момент времени находятся электроны, которые образуют облако отрицательного заряда (**пространственный заряд**).

При прохождении термоэлектрического тока электроны, покидающие катод, отнимают у него энергию, необходимую для преодоления потенциального барьера на границе металл—вакуум (работы выхода), что приводит к охлаждению катода. Для сохранения температуры катода необходимо увеличить ток его накала.

В 1897 г. американский физик Роберт У. Вуд (Wood, 1868—1955 гг.), проводя эксперименты с рентгеновскими лучами в лампе собственной конструкции, обнаружил новую форму катодного разряда: он начинался при больших напряжениях между двумя платиновыми сферами и сопровождался переносом вещества с одной сферы на другую. С подачей напряжения электроны устремлялись от полюса к полюсу и, попадая на стенки колбы, вызывали свечение.

Лишь много лет спустя возникновение эмиссионного тока объяснила квантовая механика. В основе этого явления, названного **автоэлектронной эмиссией**, лежал "туннельный эффект", т. е. возможность преодолеть барьер даже, если электрон не обладает необходимой энергией. Вероятность такого туннельного перехода определяется шириной и высотой барьера. Туннельный переход становится реальным, если у поверхности металла создано достаточно сильное поле — напряжённостью около 10^7 В·см⁻¹.

Автоэлектронная эмиссия безынерционна (ток возникает мгновенно, стоит только приложить напряжение), плотность тока достигает огромных значений (до 10^7 А·см⁻²), поток электронов очень однороден по своим энергиям.

Контрольные вопросы

- ? Какие существуют виды электронной эмиссии?
- ? Что такое термоэлектронная эмиссия?
- ? Как изменяется электрический потенциал в области границы металл—вакуум?
- ? Как ток термоэлектронной эмиссии зависит от температуры катода?

8.6. Электрический ток в вакууме; закон Богуславского—Ленгмюра (закон трёх вторых)

Электроны, покидающие в вакууме катод, создают вблизи него облако отрицательного объёмного заряда, поле которого тормозит поступление всех испускаемых катодом электронов в объём. Теория, разработанная Лэнгмюром и Чайльдом для плоских электродов в предположении, что начальная скорость электронов равна нулю, приводит к зависимости плотности тока от напряжения между электродами (**закон трёх вторых**):

$$j = \frac{4\sqrt{2}\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{e}{m_e}} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d^2} \sim U^{\frac{3}{2}}, \quad (373)$$

где j — плотность тока; e и m_e — заряд и масса электрона; U и d — напряжение и расстояние между электродами.



Зависимость величины электрического тока между двумя электродами (катодом и анодом) в вакууме от потенциала анода — **закон Богуславского—Лэнгмюра (формула Ленгмюра, закон "3/2")**: при малых напряжениях U между эмиттером (катодом) и анодом плотность тока моноэнергетических электронов описывается законом трёх вторых: $j \sim U^{3/2}$.

Формула Лёнгмюра — аналитическая зависимость электрического тока между двумя электродами в вакууме от разности потенциалов между ними: $I = CU^{3/2}$, где коэффициент C зависит от формы и размеров электродов.

Контрольные вопросы

- ? Сформулируйте закон трёх вторых.
- ? При каких условиях выполняется закон трёх вторых?

8.7. Электровакуумные приборы

Электровакуумные приборы — приборы, в которых перенос тока осуществляется электронами или ионами, движущимися между электродами через высокий вакуум или газ.

Электровакуумные приборы разделяются на 2 класса — электронные приборы и ионные приборы.

В **электронных приборах** перенос электрического заряда в междуэлектродном пространстве обуславливается движением эмитированных катодом свободных электронов в высоком вакууме.

В **газоразрядных (ионных) приборах** в переносе электрического заряда участвуют как электроны, так и тяжёлые заряженные частицы — ионы, образующиеся при взаимодействии электронов, движущихся в электрическом поле, с атомами газа, заполняющего прибор.

Электронная лампа — электровакуумный прибор, действие которого основано на управлении потоком электронов (движущихся в вакууме) электрическим полем, формируемым с помощью электродов.

Приёмно-усилительные лампы — электронные лампы, предназначенные главным образом для усиления и детектирования электрических сигналов, преобразования частоты, выпрямления и генерирования электрических колебаний малой мощности в различных устройствах.

Анод — электрод электронной лампы, имеющий положительный заряд и обеспечивающий в электронной лампе движение электронов от катода к аноду.

Катод — электрод электронных и ионных приборов, служащий источником электронов; в зависимости от механизма испускания последних различают термо- (электрод, нагреваемый до высокой температуры (600—1 200 °С)), фотоэлектронные, холодные и другие катоды.

В простейшем случае катод изготавливают в виде металлической проволочки, накаливаемой вспомогательным током (током накала). Такие катоды называют **катодами прямого или непосредственного накала**. Большое распространение получили также **катоды косвенного накала**, иначе называемые **подогревными**. Катод такого типа имеет металлический цилиндр, поверхность которого покрыта активным слоем, испускающим электроны при меньшей по сравнению с чистым металлом температуре. Подогреватель в виде проволочки находится внутри цилиндра.

Вакуум в электронных лампах, необходимый для свободного движения электронов, должен быть не хуже 10^{-6} мм рт. ст.

По числу электродов электронные лампы делятся на *электровакуумные диоды, триоды, тетроды, пентоды* и т. д.

По способу подогрева катода — на лампы прямого накала и косвенного.

По конструкции — на стеклянные лампы с цоколем и без него (пальчиковые), металлические, металлостеклянные и металлокерамические, *нубисторы*, комбинированные лампы (содержащие в 1 баллоне несколько систем электродов — двойные диоды, триоды и пентоды, диод-триоды и т. п.) и др.

Контрольные вопросы

- ? Как устроена электронная лампа?
- ? Для чего применяют активированные катоды?

8.8. Электровакуумный диод

Для наблюдения термоэлектронной эмиссии может служить электровакуумная лампа, содержащая два электрода: один — в виде проволоки из тугоплавкого материала (вольфрам, молибден и др.), нагреваемой током (*катод*), и другой, холодный электрод, собирающий термоэлектроны (*анод*). Такие электровакуумные лампы называют **электровакуумными диодами**; впервые созданы английским изобретателем Джоном Флемингом (Fleming, 1849—1945 гг.) в 1904 г.

Флеминг показал, что высокочастотный электрический ток может быть выпрямлен с помощью электровакуумного диода. Флеминг сознавал значимость своего изобретения для превращения электрических колебаний в звук (он называл лампу "аудионом"¹), однако не сумел добиться широкого применения диода.

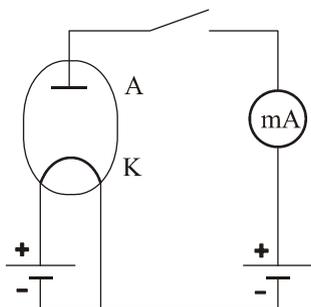


Рис. 94. Схема включения электровакуумного диода (кенотрона): А — анод; К — катод

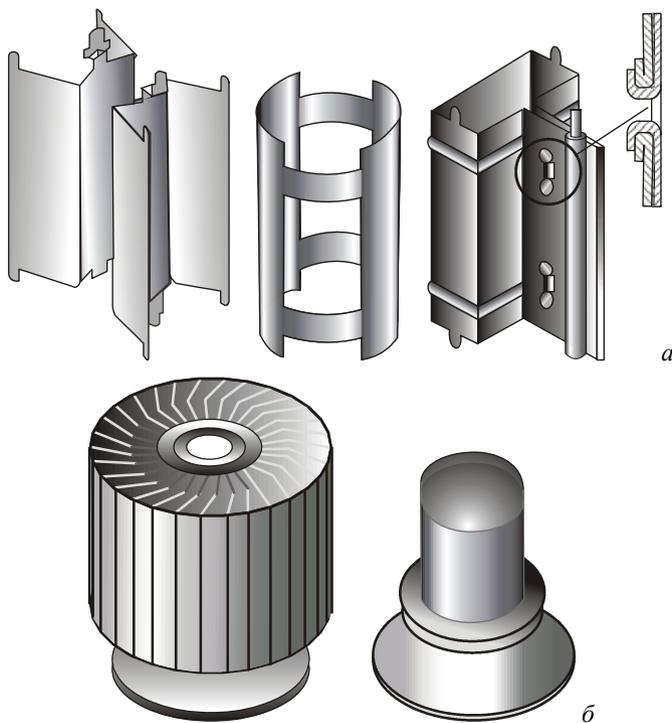


Рис. 95. Аноды приёмно-усилительных (а) и генераторных (б) ламп

¹ От латинского audio — слушаю.

Кенотрон¹ — электровакуумный диод, предназначенный для выпрямления переменного тока главным образом промышленной частоты (рис. 94).

На практике аноду чаще всего придают форму цилиндра, внутри которого расположен накаливаемый катод (рис. 95, 96).

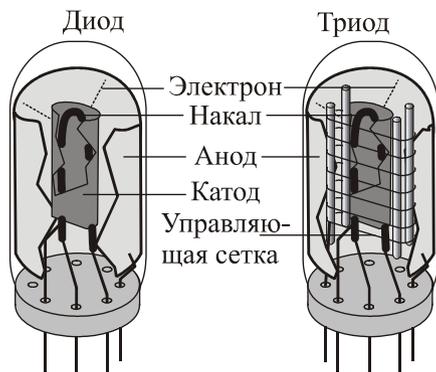


Рис. 96. Типичное устройство диода и триода

Контрольные вопросы

- ? Объясните устройство электровакуумного диода.
- ? Какие функции может выполнять диод?

8.9. Многоэлектродные лампы

В 1906 г. американский инженер Ли де Форест (De Forest, 1873—1961 гг.) ввёл в *электровакуумный диод* третий электрод. Между катодом и анодом расположил пластинку с отверстиями — **сетку**. Лампа стала трёхэлектродной — триодом (рис. 97). Форест использовал своё изобретение для радиосвязи. Ламповый приёмник Фореста принимал сигналы на сетку лампы, выпрямлял их и позволял прослушивать на телефоне телеграфные сигналы.

¹ От греч. kenos — пустой и ...трон.



Рис. 97. Вакуумный триод Ли де Фореста (1906 г.)

Триод¹ — электронная лампа с тремя электродами: термоэлектронным катодом (прямого или косвенного накала) К, управляющей сеткой (вблизи катода) С и анодом А (рис. 96, 98).

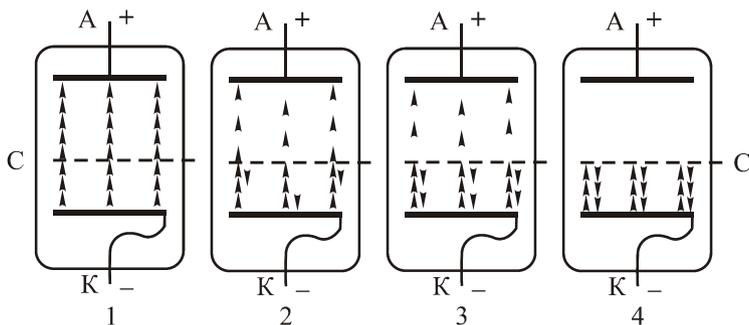


Рис. 98. Управляющее действие сетки в триоде:

- 1 — потенциал сетки равен 0; 2 — потенциал сетки отрицателен;
 3 — отрицательный потенциал сетки больше, чем в случае 2;
 4 — запирающее напряжение

Электронный ток в триоде зависит не только от потенциала анода, но и от потенциала управляющей сетки относительно катода. Если потенциал сетки равен нулю, триод в этом случае не отличается от *диода* (диаметр прбволочек сетки очень мал, а расположены они достаточно редко), и количество электронов, достигающих анода, будет практически тем же, что и в отсутствие анода (рис. 98, 1). При положительном потенциале сетки пространственный

¹ От греч. tri-, в сложных словах — три и (электр)од.

заряд в лампе уменьшится, и ток анода будет больше. Напротив, при отрицательном потенциале сетки пространственный заряд увеличится, вследствие этого часть *термоэлектронов* будет возвращена обратно в катод, и ток анода будет меньше, чем в отсутствие сетки (рис. 98, 2). С увеличением отрицательного потенциала сетки анодный ток будет уменьшаться (рис. 98, 3) и при некотором потенциале сетки ток в лампе прекратится (будет заперт) (рис. 98, 4). Этот запирающий отрицательный потенциал, очевидно, будет тем больше, чем выше положительный потенциал анода.



Изменяя потенциал управляющей сетки, можно изменять и ток анода, т. е. управлять им. Так как масса электронов ничтожна, то инерционность триода очень мала, и его управляющее действие сохраняется даже при очень быстрых изменениях потенциала сетки.

Сетка не потребляет энергию, но управляет энергией анодной "батареи". Небольшое переменное напряжение сетки управляет всем потоком электронов, "раскачивает" мощный анодный ток, превращая энергию анодной "батареи" в энергию колебательного (переменного) напряжения, точно повторяющего форму напряжения на сетке. Этот процесс, строго говоря, не является усилением переменного напряжения сетки, но результат работы лампы выглядит именно как усиление слабого напряжения на сетке за счёт энергии анодной "батареи". Это позволяет использовать триод в качестве усилителя. **Усилители**, собранные на триодах, усиливают сигналы в сотни тысяч и даже миллионы раз.

В диапазоне длинных, средних и коротких радиоволн электронная лампа работает как безынерционный прибор, мгновенно реагирующий на любые изменения высокочастотного (ВЧ) напряжения на её управляющей сетке. Однако на сверхвысоких частотах (СВЧ), соответствующих волнам ультракоротковолнового (УКВ) диапазона и более высоким частотам, время пролёта электронов между катодом и управляющей сеткой лампы становится уже сравнимым с периодом СВЧ-колебаний. Лампа на этих частотах становится уже инерционным прибором. Поэтому в диапазоне СВЧ на смену обычным лампам пришли специальные лампы: магнетроны, клистроны и лампы бегущей волны.

Триоды используются в радиотехнической аппаратуре как приёмно-усилительная лампа. В 1913 г. 30-летний сотрудник немецкой фирмы Telefunken Александр Мейсснер (Meissner, 1883—1958 гг.) открыл возможность использовать триод для генерации, т. е. создания радиоволн. Получили

распространение миниатюрные и сверхминиатюрные триоды (**нувисторы**). Триоды, предназначенные для работы в СВЧ-диапазоне, имеют электроды с кольцевыми выводами для удобства подсоединения к резонаторам или волноводам.

Пентод¹ — электронная лампа с пятью электродами: катодом, управляющей, экранирующей и защитной (антидинатронной) сетками и анодом (рис. 99). Пентод служит в качестве приёмно-усилительной лампы либо генераторной лампы на частотах до десятков мегагерц (МГц).

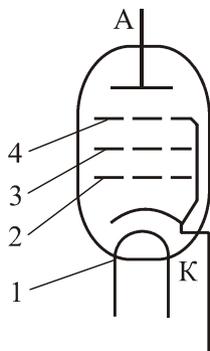


Рис. 99. Пентод: А — анод; К — подогревный катод; 1 — подогреватель катода; 2 — управляющая сетка; 3 — экранирующая сетка; 4 — антидинатронная сетка

Гептод² — электронная лампа, имеющая 7 электродов: катод, анод и 5 сеток (две — управляющие, две — экранирующие, одна — защитная или антидинатронная) (рис. 100). Гептод предназначен главным образом для преобразования и смещения ВЧ электрических колебаний, например, в супергетеродинных радиоприёмниках.

В конце XX в. произошла массовая замена электровакуумных ламп полупроводниковыми приборами. Последние намного компактнее, легче, экономичнее, менее инерционны и т. д., чем электровакуумные приборы. Полупроводниковые приборы надёжнее в работе, меньше боятся ударов, тряски, воздействия влаги. Срок службы полупроводниковых приборов исчисляется десятками тысяч часов, а обычные радиолампы могут непрерывно работать не более 3 тысяч часов.

¹ От греч. *pente* — пять и (электр)од.

² От греч. *hepta* — семь и (электр)од.

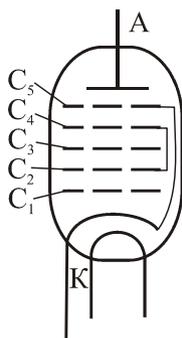


Рис. 100. Гептод: А — анод; К — катод; C_1 — C_5 — сетки

8.10. Вольт-амперные характеристики электривакуумных ламп

Наибольшее значение тока термоэлектронной эмиссии (при неизменной температуре) называют **током насыщения** (рис. 101). Эта величина является главной характеристикой тел по отношению к термоэлектронной эмиссии.

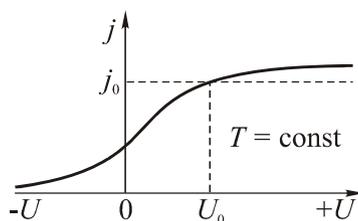


Рис. 101. Зависимость плотности j термоэлектронного тока от разности потенциалов U , приложенной между катодом и анодом (вольт-амперная характеристика)

Зависимость плотности тока насыщения от температуры определяется **формулой Ричардсона—Дэшмана**:

$$j_0 = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right), \quad (374)$$

где Φ — работа выхода, т. е. та работа, которую должен совершить электрон, чтобы выйти за пределы металла; T — термодинамическая температура; k — постоянная Больцмана; $A = 6,02 \cdot 10^5 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$ — **эмиссионная постоянная**, образованная совокупностью универсальных констант. На опыте, однако, получаются различные значения эмиссионной постоянной для разных металлов (табл. 42—44).

Таблица 42. Эмиссионные характеристики некоторых металлов [30, 38]

Элемент	Работа выхода Φ , эВ	Эмиссионная постоянная, $\text{А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$
Вольфрам	4,50—4,54	60—100
Железо	4,36	26
Медь	4,40—4,47	65
Молибден	4,3—4,37	115
Никель	4,50—4,84	30
Платина	5,29	32
Торий	3,41	70
Хром	4,51	48
Цезий	1,81—1,89	160

Таблица 43. Эмиссионные характеристики плёнок на металлах [38]

Металл	Плёнка	Работа выхода Φ , эВ	Эмиссионная постоянная, $\text{А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$
Вольфрам	Барий	1,56	1,5
	Торий	2,63	3,0
	Уран	2,81	3,2
Вольфрам	Цезий	1,36	3,2
	Цирконий	3,14	5,0

Таблица 43 (окончание)

Металл	Плѐнка	Работа выхода Φ , эВ	Эмиссионная постоянная, $A \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$
Молибден	Торий	2,58	1,5
Тантал	Торий	2,52	0,5

Широкое применение на практике получили **оксидные катоды**, получаемые путѐм нанесения на металлическое основание оксидов бария или некоторых других металлов, что значительно уменьшает работу выхода (табл. 44).

Таблица 44. Эмиссионные характеристики оксидных катодов [38]

Катод	Работа выхода Φ , эВ	Эмиссионная постоянная, $A \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$
Барий на окисленном вольфраме	1,10	0,3
Никель—BaO—SrO	1,20	0,96
Барий—кислород—вольфрам	1,34	0,18
Pt—Ni; BaO—SrO	1,37	2,45
BaO на никелевом сплаве	1,50—1,83	0,087—2,18
Ториево-оксидный катод (среднее значение)	2,59	4,35

Испускаемые электроны имеют распределение начальных скоростей Максвелла, соответствующее температуре эмиттера.

Отличие кривых на рис. 103 обусловлено различием температуры катода, которая для кривой 2 выше.

Так как при термоэлектронной эмиссии в вакуум электроны образуют у поверхности эмиттера объѐмный заряд, электрическое поле которого задерживает электроны с малыми начальными скоростями, то для получения тока насыщения между эмиттером (катодом) и коллектором электронов (анодом) создают электрическое поле, компенсирующее поле объѐмного заряда.

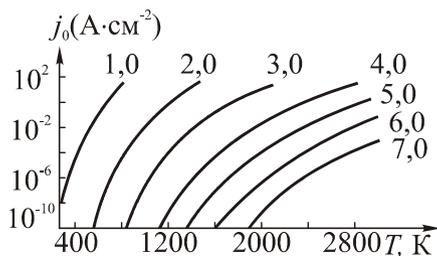


Рис. 102. Плотность термоэлектронного тока насыщения j_0 при различных температурах и работах выхода

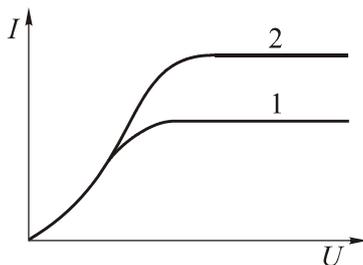


Рис. 103. Вольт-амперная характеристика диода при разных температурах катода (для кривой 2 температура катода выше, чем для кривой 1)

Плотность тока насыщения j_0 достигается при напряжении U_0 . При $U < U_0$ ток ограничен полем объёмного заряда у поверхности эмиттера. Термоэлектронный ток может протекать и в отсутствие внешних ЭДС. Это указывает на возможность создания вакуумных термоэлектронных преобразователей тепловой энергии в электрическую. Во внешних электрических полях с напряжённостью $E \sim 10^6 - 10^7$ В·см⁻¹ к термоэлектронной эмиссии добавляется туннельная эмиссия и термоэлектронная эмиссия переходит в термоавтоэлектронную эмиссию.

На вольт-амперной характеристике диода (рис. 104) начальная часть кривой (I—II) приближённо соответствует *закону трёх вторых*. Линейный участок II фактически аналогичен *закону Ома*. Затем по мере рассасывания электронного облака постепенно устанавливается ток насыщения (III), представляющий собой полный поток электронов, который способен давать катод при данной температуре.

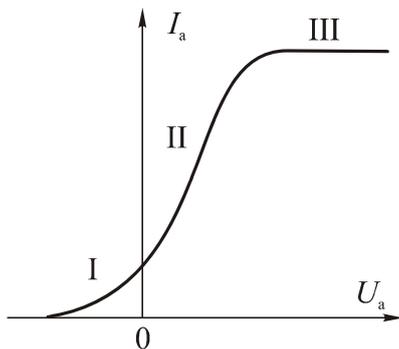


Рис. 104. Вольт-амперная характеристика электровакуумного диода



Нелинейный характер зависимости анодного тока от вызывающей его разности потенциалов определяется тормозящим действием *пространственного заряда*.

Наиболее важными для триодов являются **анодно-сеточные характеристики** — зависимость анодного тока I_a от напряжения на сетке U_C при постоянном анодном напряжении U_a , и **анодные характеристики** — зависимость анодного тока I_a от напряжения на аноде U_a при постоянном сеточном напряжении U_C . На рис. 105 представлено семейство анодно-сеточных характеристик триода ($U_{a1} < U_{a2} < U_{a3}$).

На рис. 106 представлено семейство анодных характеристик триода ($U_{c1} < U_{c2} < U_{c3}$).

Одним из простейших применений электровакуумного триода является его использование для усиления электрических сигналов. На рис. 107, *a* показана схема усилительного каскада на триоде.

К сетке лампы подводится переменное напряжение $U_{вх}$, подлежащее усилению. Это напряжение вызывает появление в анодной цепи переменного тока I_a (рис. 107, *б*) в соответствии с анодно-сеточной характеристикой лампы. Этот ток, протекая по сопротивлению нагрузки R_H , создаёт на нём падение напряжения. Это и есть выходное напряжение усилителя $U_{вых}$.

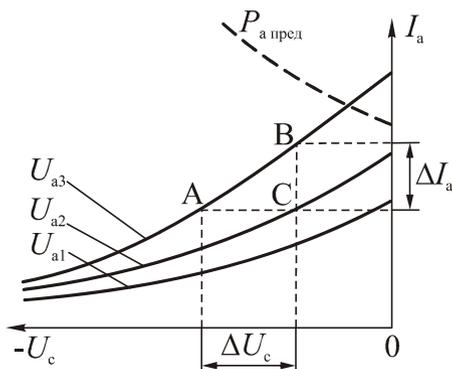


Рис. 105. Анодно-сеточные характеристики триода ($U_{a1} < U_{a2} < U_{a3}$)

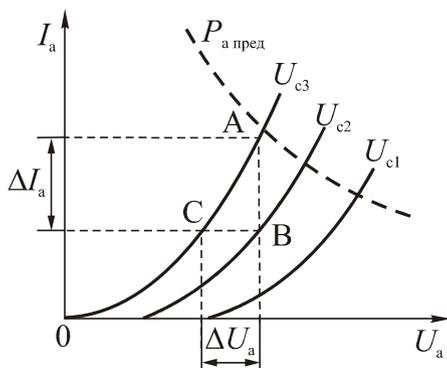


Рис. 106. Анодные характеристики триода ($U_{c1} < U_{c2} < U_{c3}$)

Приближённо его величину можно рассчитать по формуле:

$$U_{\text{вых}} = I_a R_H = U_{\text{вх}} S R_H, \quad (375)$$

где S — **крутизна** лампы, представляющая собой отношение изменения анодного тока к вызвавшему его изменению сеточного напряжения при постоянном анодном напряжении.

Коэффициент усиления лампового усилителя можно вычислить по формуле:

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = S R_H. \quad (376)$$

А теперь рассмотрим "плюсы" и "минусы" радиоламп ("плюсы" и "минусы" полупроводниковых приборов рассмотрены в *той* "Магнетизм и электро-

магнитные явления" данного курса). Начнём с очевидных "минусов", из-за которых радиолампы и были вытеснены полупроводниковыми приборами.

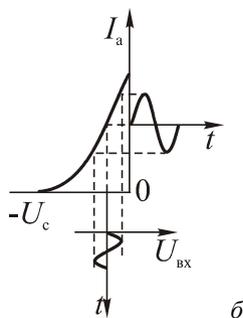
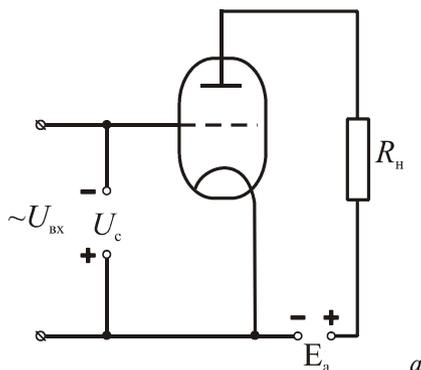


Рис. 107. Схема усилительного каскада (а); схематическое пояснение влияния изменения сеточного напряжения на анодный ток (б)

"Минусы" радиоламп

1. Высокий уровень шумов из-за наличия подогреваемого катода.
2. Высокое входное сопротивление радиоламп, что в усилителях мощности приводит к повышенному уровню наводок переменного тока, т. е. к ещё большему шуму.
3. Недолговечность. Радиолампы могут непрерывно работать не более 3 тысяч часов. При эксплуатации несколько дней в неделю по несколько часов в день максимальный срок службы выходных радиоламп — несколько лет. Далее их надо менять, подбирая по одинаковому начальному току анода.

4. Малая прочность.
5. Большая масса.
6. Необходимость времени "разогрева" для выхода на рабочий режим.
7. Невозможность избавиться от выходного трансформатора. Главные недостатки применения трансформатора — невозможность получить широкую полосу, невозможность получить высокую скорость нарастания выходного сигнала.
8. Радиолампы требуют применения высоких напряжений питания, составляющих сотни и даже тысячи вольт. Это накладывает определённые ограничения в плане безопасности эксплуатации.

"Плюсы" радиоламп

1. Высокая линейность ламп позволяет простыми средствами добиться высокого качества звучания. Плавный излом начальной характеристики обуславливает небольшую величину искажений.
2. При перегрузке усилителя ограничение выходного сигнала имеет "мягкий" характер.
3. Ток катода имеет определённую величину максимального тока, и кратковременное уменьшение сопротивления нагрузки не ведёт к его недопустимому повышению, что обуславливает достаточно высокую устойчивость ламповых усилителей. Однако длительная работа в таком режиме приводит к перегреву анода и термическому разрушению радиолампы.
4. Простота схем. Лампа обеспечивает большее усиление, чем транзистор, и её параметры мало зависят от внешних факторов. В результате, в ламповом усилителе на порядок меньше деталей, чем в полупроводниковом.
5. Высокая надёжность. Параметры радиоламп почти не зависят от температуры, давления, оптических и ионизирующих излучений (радиации).
6. Простота обслуживания. Вышедшую из строя радиолампу заменить гораздо проще, чем сгоревший транзистор или микросхему.

Контрольные вопросы

- ? Нарисуйте вольт-амперную характеристику электровакуумного диода.
- ? Каковы "плюсы" радиоламп?

8.11. Электрический ток в газах: самостоятельный, несамостоятельный и искровой разряды

Явления в откаченных трубках открывают для физической науки новый мир, в котором материя может существовать в четвёртом состоянии.

У. Крукс¹

Газы при нормальных условиях состоят из электрически нейтральных атомов и молекул, и по этой причине не проводят электричества. Газ становится проводником, когда некоторую часть его молекул ионизируют, т. е. происходит расщепление нейтральных атомов и молекул на положительные и отрицательные ионы — такие газы называют **ионизированными**.

Многообразие условий, определяющих исходное состояние газа (состав, давление и т. д.), приводит к тому, что существует множество видов ионизации газов, причём её законы сложнее, чем законы прохождения электрического тока в *проводниках первого или второго родов*. Ввиду зависимости концентрации ионов от *напряжённости поля* и неравномерного распределения ионов по объёму, занимаемому газом, газовые проводники в большинстве случаев не подчиняются *закону Ома* или подчиняются *закону Ома* лишь при очень малой приложенной разности потенциалов между анодом и катодом, поэтому их электрические свойства обычно описывают с помощью вольт-амперной характеристики.

Ионы в газах могут возникать под действием ионизаторов — высокой температуры (рис. 108), рентгеновских и ультрафиолетовых лучей, радиоактивного излучения, а также в результате столкновения электронов с атомами газа и т. д. Впрочем, и в нормальных условиях газы, например воздух, обладают электрической проводимостью, хотя и весьма ничтожной. Эта проводимость вызвана излучением радиоактивных веществ, а также космическими лучами.

Газовым разрядом называют прохождение электрического тока через газы. Систематическое изучение электрических токов и разрядов в газах было на-

¹ Уильям Крукс (Crookes, 1832—1919 гг.) — английский физик.

чато лишь в конце XIX в. Тогда была установлена природа газового разряда в различных условиях. Однако ввиду сложности этого явления, точной количественной теории не существует до настоящего времени.

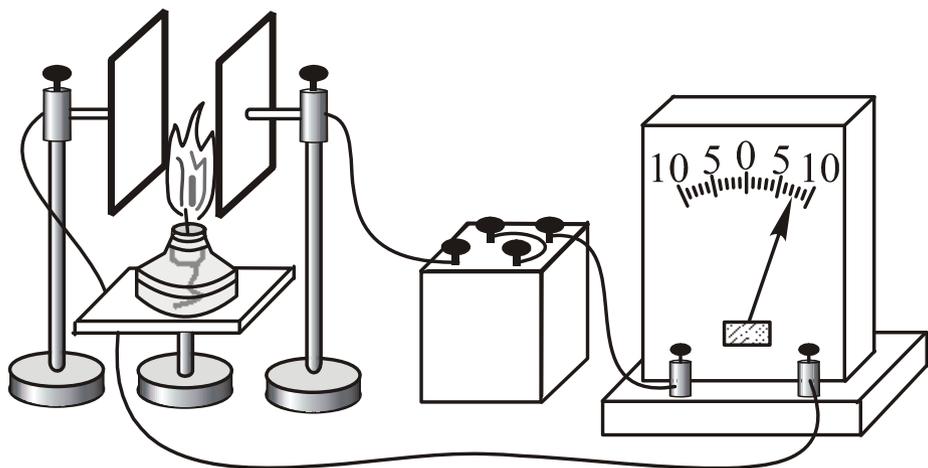


Рис. 108. Электрический ток в результате ионизации воздуха под действием высокой температуры пламени спиртовки

Если газовый разряд происходит только при вызывающем и поддерживающем ионизацию внешнем воздействии (т. е. при действии внешних ионизаторов), то такой разряд называют **несамостоятельным газовым разрядом**. Разряд в газе, продолжающийся и после прекращения действия внешнего ионизатора, называется **самостоятельным**.

Энергия, необходимая для отрыва электрона от молекулы или атома, называется **работой (энергией) ионизации**. Работа ионизации измеряется в **электронвольтах (эВ)** (табл. 45).

Таблица 45. Работы ионизации некоторых газов [30, 38, 56]

Газ	Работа ионизации, эВ
Азот $N_2 \rightarrow N_2^+$	15,8
Водород $H_2 \rightarrow H_2^+$	15,4
Гелий $He \rightarrow He^+$	24,5

Таблица 45 (окончание)

Газ	Работа ионизации, эВ
Кислород $O_2 \rightarrow O_2^+$	12,5
Натрия пары $Na \rightarrow Na^+$	5,12
Ртуты пары $Hg \rightarrow Hg^+$	10,4
Углекислый газ $CO_2 \rightarrow CO_2^+$	14,4

8.11.1. Ударная ионизация

При движении электронов с небольшими скоростями в газе их встречи с молекулами газа носят упругий характер. После центрального столкновения электрона с молекулой газа скорость молекулы изменяется незначительно:

$$v' = \frac{v(M - m_e) + 2m_e u}{M + m_e}. \quad (377)$$

В простейшем случае, когда молекула газа неподвижна ($v = 0$), а электрон движется со скоростью u , скорость молекулы после центрального столкновения с электроном ($M \gg m_e$) становится равной $\frac{2m_e u}{M}$.

Кинетическая энергия, переданная электроном молекуле газа после столкновения, равняется:

$$\Delta E_k = \frac{Mv'^2}{2} = \frac{4m_e m_e u^2}{2M} = \frac{4m_e}{M} E_{ke}, \quad (378)$$

где E_{ke} — кинетическая энергия электрона до столкновения.

При больших скоростях электронов происходят их неупругие столкновения с молекулами газа, при которых молекулы либо переходят в возбуждённое состояние, либо в ионизованное состояние.

В последнем случае молекула теряет один из своих электронов:



Обозначим энергию, необходимую для ионизации молекулы газа через E_i . Тогда для процесса ударной ионизации должно выполняться соотношение:

$$\frac{m_e u^2}{2} \gg E_i. \quad (380)$$

Если электрон движется в электрическом поле, то приращение его кинетической энергии определяется разностью потенциалов поля:

$$\Delta \left(\frac{m_e u^2}{2} \right) = e(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (381)$$

Следовательно, для осуществления ионизации молекулы газа необходимо, чтобы выполнялось следующее условие:

$$\begin{aligned} e(\varphi_1 - \varphi_2) &\gg E_i, \\ \varphi_1 - \varphi_2 &\gg \frac{E_i}{e} \end{aligned} \quad (382)$$

При такой разности потенциалов электроны, сталкиваясь с молекулами газа, передают им свою энергию и при определённых условиях осуществляют их ионизацию. Так в газе появляются дополнительные электроны \bar{e}_M , способные ускоряться электрическим полем.



Ударная ионизация заключается в том, что свободно движущийся электрон, обладающий достаточной кинетической энергией, при соударении с нейтральным атомом выбивает из него один из электронов. В результате этого нейтральный атом превращается в положительный ион (который также может ионизировать газ) и, следовательно, кроме первичного, появляются новые электроны, которые дополнительно ионизируют атомы.

В результате число электронов будет лавинообразно нарастать. Такой процесс называется **электронной лавиной**. Этот вид ионизации наблюдается при сильных электрических полях.

Для количественной характеристики ионизирующей способности электронов и ионов английский физик Дж. С. Э. Таунсенд (Townsend, 1868—1957 гг.) ввёл два коэффициента объёмной ионизации α и β . **Коэффициент α** опре-

деляется как среднее число ионов одного знака, производимое электроном на единице длины своего пути. Такой же смысл имеет коэффициент β , характеризующий ионизирующую способность положительных ионов. Коэффициент ионизации электронами α значительно превосходит коэффициент ионизации положительными ионами β .

Пусть электрическое поле направлено вдоль оси Ox . На расстоянии Ox в тонкий слой dx в единицу времени входят n электронов. В этом слое dx в результате ударной ионизации молекул газа в единицу времени появляется дополнительное число электронов dn :

$$dn = \gamma n dx, \quad (383)$$

где γ — коэффициент ударной ионизации молекул газа.

После разделения переменных

$$\frac{dn}{n} = \gamma dx \quad (384)$$

и последующего интегрирования по всему объёму газа, находящемуся в электрическом поле, получаем:

$$\begin{aligned} \ln n &= \gamma x + \ln C, \\ n &= Ce^{\gamma x}. \end{aligned} \quad (385)$$

Такой экспоненциальный рост электронов ограничивается процессом их рекомбинации с положительными молекулярными ионами:



что сопровождается рекомбинационным излучением ($h\nu$). Кроме того, часть электронов с кинетической энергией $E_k < E_i$ не участвует в процессе ионизации, но при столкновении с молекулами газа переводят их в электронное возбуждённое состояние, которое дезактивируется с излучением кванта люминесценции:



Плотность тока в газах, как и в металлах, и жидкостях, определяется концентрацией носителей зарядов (в данном случае — ионов), их подвижностью и величиной зарядов.

В общем случае подвижность зависит от отношения напряжённости E электрического поля в газе к давлению p газа. При небольших значениях E/p подвижность остаётся неизменной; при значениях упорядоченных скоростей ионов, сравнимых со скоростями их теплового движения, подвижность ионов изменяется.

Подвижность данного вида ионов изменяется обратно пропорционально плотности газа; при постоянной температуре подвижность изменяется обратно пропорционально давлению (в интервале давлений от 0,1 мм рт. ст. до 60 атм). Подвижность в сильной степени зависит от чистоты газа (табл. 46).

Таблица 46. Подвижность ионов в газах (при 760 мм рт. ст. и 20 °С), $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ [38]

Газ	Положительные ионы	Отрицательные ионы
Азот (700 мм рт. ст. и 18 °С)	1,27	1,84
Аргон	1,5	1,7
Водород	6,3	8,1
Водород (700 мм рт. ст. и 18 °С)	5,91	8,26
Воздух, насыщенный парами воды	1,4	2,1
Воздух сухой	1,4	1,9
Кислород	1,3	1,8
Кислород (700 мм рт. ст. и 18 °С)	1,29	1,79
Окись углерода (700 мм рт. ст. и 18 °С)	1,10	1,14
Углекислый газ	0,8	0,8
Хлор (700 мм рт. ст. и 18 °С)	0,65	0,51

Когда ионизация газа происходит при непрерывном действии внешнего ионизатора и малом значении разности потенциалов между анодом и катодом

в газе, начинается **тихий разряд**. При повышении напряжения сила тока тихого разряда сперва увеличивается пропорционально напряжению (участок кривой OA на рис. 109), затем рост тока замедляется (участок кривой AB на рис. 109), и когда все заряженные частицы, возникшие под действием ионизатора в единицу времени, уходят за то же время на катод и на анод, усиления тока с ростом напряжения не происходит (участок BC на рис. 109). При дальнейшем росте напряжения ток снова возрастает и тихий разряд переходит в самостоятельный лавинный разряд (участок CD на рис. 109). В этом случае сила тока определяется как интенсивностью воздействия ионизатора, так и напряжённостью электрического поля в пространстве разряда.

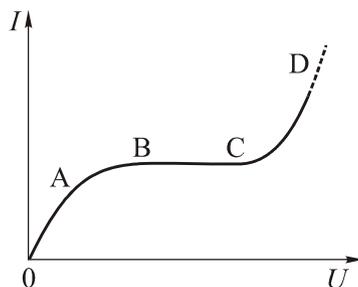


Рис. 109. Вольт-амперная характеристика тихого разряда

Переход самостоятельного разряда в самостоятельный характеризуется резким усилением электрического тока (точка D) и называется **электрическим пробоем газа**. Соответствующее напряжение U_3 называется **напряжением зажигания**. В случае однородного поля оно зависит от газа и от произведения давления газа p на расстояние между электродами d .

Разряд после лавинного пробоя принимает форму тлеющего разряда, если давление газа составляет несколько мм рт. ст. При более высоком давлении лавинное усиление разряда приводит к возникновению электрического пространственного заряда, что изменяет характер процесса пробоя. Образуется один или несколько узких проводящих каналов, исходящих от одного из электродов. Такие каналы называют **стримерами**. Время образования стримеров очень мало (около 10^{-7} с).

Удобно выделить 3 типа стационарного газового разряда (тока).

- **Таунсендовский**, или **тёмный разряд** (ток разряда не выше 10^{-6} А). Это самостоятельный ток, протекающий в однородном или слабо неоднородном поле. Плотность этого тока настолько мала, что он не сопровождается

ся заметным свечением (отсюда название); имеет место преимущественно при низком давлении газа.

- **Тлеющий разряд** (ток приблизительно от 10^{-6} до 10^{-1} А). Электрическое поле обладает наибольшей напряжённостью в ограниченной области катода. Для этого вида разряда верно равенство: $U_K \gg U_i$, где U_K — потенциал катода; U_i — потенциал ионизации газа. Возникает при низких давлениях.
- **Дуговой разряд** (ток около 10^{-1} А и выше). Электрическое поле также обладает наибольшей напряжённостью. Но для данного разряда характерно следующее неравенство: $U_K < U_i$.

8.11.2. Тлеющий разряд

Процесс прохождения электрического тока через газ, сопровождающийся излучением квантов света $h\nu$, называют тлеющим разрядом. Тлеющий разряд относят к **стационарному самостоятельному разряду**, так как он возникает без какого-либо иного воздействия на газ, кроме ускоряющего действия электрического поля на заряженные частицы.

Тлеющий разряд наблюдают при низкой температуре катода в газах при низких давлениях (~5 мм рт. ст.), находящихся в сильном (~1 000 В) электрическом поле. Он отличается сравнительно малой плотностью тока на катоде и большим (порядка сотен вольт) катодным падением U потенциала.

Тлеющий разряд начинается тогда, когда вышедшие из катода электроны разгоняются электрическим полем и при ударе с молекулами газа, заполняющими межэлектродное пространство в трубке, вызывают их возбуждение и ионизацию, т. е. появление вторичных электронов, которые, как и первичные, находясь в электрическом поле, двигаются к аноду. Положительно заряженные молекулярные ионы двигаются к катоду и выбивают из него дополнительные электроны, которые также ускоряются полем.

Рассмотрим подробнее электронно-молекулярные процессы при тлеющем самостоятельном разряде в разрядной трубке с газом (рис. 110). Для внешнего вида тлеющего разряда в длинной цилиндрической трубке при давлениях газа порядка десятых долей мм рт. ст. и выше характерно наличие ряда областей, визуально сильно отличающихся одна от другой. Происхождение этих областей объясняется особенностями элементарных процессов ионизации и возбуждения атомов и молекул.

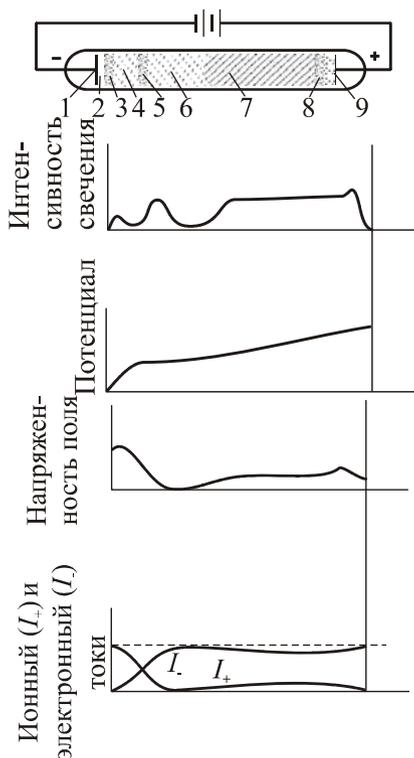


Рис. 110. Газоразрядная трубка (нормальный тлеющий самостоятельный разряд при относительно низком давлении):

1 — катод; 2 — астоново тёмное пространство; 3 — излучение электронно-возбуждённых молекул газа или астоново свечение (прикатодный слой); 4 — круково (катодное) тёмное пространство; 5 — область рекомбинационного излучения или катодное (отрицательное, тлеющее) свечение; 6 — фарадеево тёмное пространство; 7 — рекомбинационное излучение плазмы или положительный столб; 8 — анодная область; 9 — анод

1. $\frac{3}{2}kT > e\phi$ — процесс термоэмиссии (ПТЭ) электронов из катода. Однако электроны из катода тлеющего разряда испускаются главным образом не под действием температуры, а под действием ударов положительных ионов и быстрых атомов.
2. $e(U_A - U_K) < E_M^*$ — ускорение электронов \bar{e} в электрическом поле — астоново тёмное пространство (АТП).
3. $e(U_A - U_K) = E_M^* \rightarrow \bar{e}^* + M \rightarrow \bar{e} + M^*$, $M^* \rightarrow M + h\nu$ — излучение электронно-возбуждённых молекул газа (ИЭВМ) или астоново свечение.

4. $e(U_A - U_K) < E_M^*$ — ускорение e в электрическом поле — кружково (катодное) тёмное пространство (КТП). В результате ударной ионизации электронами образуются положительные ионы, обеспечивающие эмиссию электронов из катода.
5. $e(U_A - U_K) > E_M^* \rightarrow \bar{e}^* + M \rightarrow \bar{e} + M^+ + \bar{e}_M$; $M^+ + \bar{e}_M \rightarrow M^* \rightarrow M + h\nu$ — область рекомбинационного излучения (РИ) или катодное (отрицательное, тлеющее) свечение. В этой области электроны, ускоренные в катодной области, производят интенсивную ударную ионизацию. Тлеющее свечение обусловлено рекомбинацией ионов и электронов в нейтральные атомы или молекулы.
6. $e(U_A - U_K) < E_M^*$ — область диффузионного движения \bar{e} — фарадеево тёмное пространство (ФТП).
7. $e(U_A - U_K) > E_M^* \rightarrow \bar{e}^* + M \rightarrow M^+ + \bar{e}(\bar{e}_M) \rightarrow M^* \rightarrow M + h\nu$ — рекомбинационное излучение плазмы (РИП) — свечение "положительного столба" (ПС).

Почти всё падение напряжения электрического поля происходит в прикатодной области до начала тлеющего разряда (катодное падение). Это падение связано с большой концентрацией положительных ионов на границе катодных областей и области рекомбинационного излучения. В области тлеющего разряда (рекомбинационное излучение) потенциал электрического поля не изменяется:

$$\begin{aligned} \varphi &= \text{const}, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial l} &= 0, \\ E &= 0. \end{aligned} \tag{388}$$

В ФТП и в области РИП разность потенциалов электрического поля медленно возрастает.

При уменьшении расстояния между электродами длина положительного столба уменьшается до его полного исчезновения. При дальнейшем сокращении области тлеющего разряда исчезает ФТП, затем область РИ. Тлеющий разряд прекращается при достижении КТП.

Для ПС вследствие постоянной и большой концентрации электронов характерны незначительное падение потенциала в нём, свечение, вызываемое воз-

вращением возбуждённых молекул (атомов) газа в основное состояние (состояние с наименьшей возможной энергией), и большая электропроводность.

Напряжение между электродами трубки с тлеющим разрядом (напряжение горения) зависит в основном от двух параметров: произведения давления p на расстояние l между электродами и плотности тока j на катоде. Общая классификация различных форм тлеющего разряда была установлена в исследованиях советского учёного Б. Н. Клярфельда и его учеников. Она распространяется на случай сверхмалых значений pl и j , когда в пространстве между электродами отсутствует пространственный заряд и поле практически однородно. В таком, по терминологии Клярфельда, **простейшем тлеющем разряде** отсутствуют области, и газ ионизируется электронами во всём межэлектродном пространстве. При увеличении pl и j возможно существование двух форм тлеющего разряда. В **нормальном тлеющем разряде** (рис. 111) электроны эмитирует только часть поверхности катода. При этом U и j остаются постоянными, а с ростом тока эмиссия происходит со всё большей площади катода. **Плотный тлеющий разряд**, для которого характерно резкое возрастание напряжения горения с ростом тока, наблюдается при больших значениях плотности тока j .

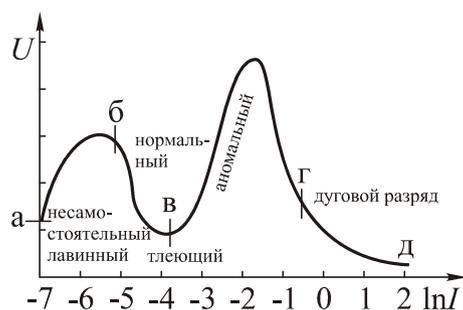


Рис. 111. Вольт-амперная характеристика разряда:

аб — несамостоятельного лавинного; *бвг* — тлеющего; *гд* — дугового

При понижении давления газа в разрядной трубке прикатодная часть разряда расширяется так, что КТП заполняет всю трубку. Свечение газа прекращается. Светится только стенка трубки, так как электроны, ускоренные электрическим полем, без столкновения с молекулами газа достигают поверхности трубки и ударяясь вызывают свечение адсорбированных молекул. Это свечение называют **катодоллюминесценцией**.

При увеличении разрядного тока обычный тлеющий разряд становится **аномальным** (рис. 111) и начинается стягивание (контракция) положительного столба. Столб отрывается от стенок сосуда, в нём начинает происходить дополнительный процесс потери заряженных частиц (рекомбинация в объёме). Предпосылкой этого является высокая плотность заряженных частиц.

Особой формой тлеющего разряда является **разряд с полым катодом** (катод представляет собой полый цилиндр или две параллельные пластины). В таком тлеющем разряде электроны, многократно колеблющиеся между стенками катода, интенсивно ионизируют газ, что приводит к большой плотности тока и яркости свечения.

8.11.3. Дуговой разряд

При дальнейшем повышении разрядного тока газ нагревается настолько, что становится возможной его термическая ионизация. Столкновения между атомами или молекулами в этом случае столь сильны, что происходит отщепление электронов. Такой разряд называется дуговым разрядом. С возрастанием тока электропроводность столба повышается, вольт-амперная характеристика дугового разряда приобретает убывающий характер. Следует отметить, что хотя он может "гореть" в широком диапазоне давлений газа и иных условий, в большинстве случаев дуговой разряд наблюдается при давлении порядка атмосферного.

В 1802 г. Петрову удалось не только повторить уже известные эксперименты, но и осуществить многие, *"о которых дотоле не имел никакого известия"*. Так, он обнаружил, что при приближении первоначально разъединённых угольных электродов, подключённых к созданной им батарее, между ними возникает электрическая дуга — дуговой разряд.

Петров показал возможность практического применения дуги для целей освещения, плавки, сварки металлов и восстановления их из руд. Он опубликовал результаты своих исследований в книге "Известие о гальвани-вольтовских опытах...", вышедшей в Санкт-Петербурге в 1803 г.

Прошло более 30 лет, прежде чем явления газового разряда исследовал Фарадей, имевший в отличие от Петрова в своём распоряжении электроизмерительные приборы и более совершенное оборудование. Целый ряд важнейших закономерностей, установленных Фарадеем, был ранее сформулирован Петровым.

Видный русский учёный-электронщик Николай Александрович Капцов (1883—1966 гг.) писал про исследования Петрова: "если бы эти исследования не были впоследствии забыты, они могли бы дать много руководящих указаний для физиков, занимавшихся исследованиями газового разряда в более поздние времена".

Дуговой разряд (**электрическая дуга, вольтова дуга**) — электрический разряд в газах, горящий практически при любых давлениях газа, превышающих 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст.; характеризуется большой плотностью тока на катоде и малым падением потенциала. Сила тока в дуге достигает огромных значений (~1 000 А). При горизонтальном расположении электродов токовый канал под действием конвективных потоков дугообразно изогнут, что и обусловило название. Характерной особенностью дугового разряда является наличие сильно раскалённого пятна-кратера на катоде — источника электронов. Температура газа в канале дугового разряда достигает 5 000—7 000 К (рис. 112), что позволяет использовать его для плавки и сварки металлов, для освещения и других целей. Электрическая дуга, возникающая при разрыве цепей высокого напряжения, — вредное явление.

Дуговую электрическую лампу изобрёл (патент от 23 марта 1876 г. на "электрическую свечу") живший во Франции русский изобретатель-электротехник Павел Николаевич Яблочков (1847—1894 гг.). В Париже "свечами Яблочкова" освещались театр Шатле, площадь Оперы и магазины Лувра. Первый в Европе электрический свет назывался "la lumière russe" — **русский свет**.

Низковольтная дуга — дуговой разряд при низких давлениях газа и термоэлектронной эмиссии с катода; устойчиво горит при малом напряжении между электродами (в парах К и Na $\approx 0,5$ В).

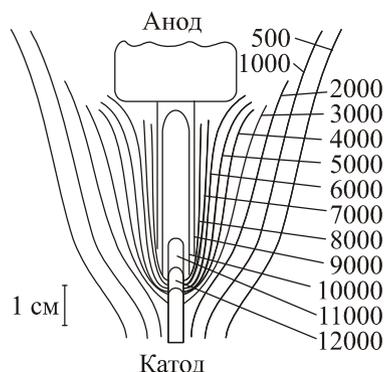


Рис. 112. Распределение температуры (в К) в различных участках электрической дуги между угольными электродами при силе тока 200 А

8.11.4. Высокочастотный безэлектродный разряд

Все рассмотренные выше разряды происходят под действием постоянного электрического напряжения. Однако газовые разряды могут протекать и под действием переменного электрического напряжения. Такие разряды имеют стационарный характер, если частота переменного напряжения достаточно высока или, наоборот, очень низка. Типичным примером может служить **высокочастотный (ВЧ) разряд**. **Стационарный высокочастотный разряд** может "гореть" даже при отсутствии электродов (**безэлектродный разряд**). Переменное электрическое поле ($\nu \sim \text{МГц}$) создаёт в определённом объёме плазму и сообщает электронам энергию, достаточную для того, чтобы производимая ими ионизация восполняла потери заряженных частиц вследствие диффузии и рекомбинации. Внешний вид и характеристики ВЧ-разрядов зависят от рода газа, его давления, частоты переменного поля и подводимой мощности. Стационарный ВЧ-разряд подобен положительному столбу тлеющего разряда.

8.11.5. Нестационарные (импульсные) разряды

Существуют также нестационарные (импульсные) разряды. Они возникают по большей части в сильно неоднородных или переменных во времени полях, например у заострённых и искривленных поверхностей проводников и электродов. Величина напряжённости поля и степень его неоднородности вблизи таких тел столь велики, что происходит ударная ионизация электронами молекул газа.

8.11.6. Коронный разряд

При коронном разряде ионизация не приводит к пробое, потому что сильная неоднородность электрического поля ($E > 500 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$), обуславливающая её, существует только в непосредственной близости от проводов и острий. Коронный разряд представляет собой многократно повторяющийся процесс "поджига", который распространяется на ограниченное расстояние от про-

водника — до области, где напряжённость поля уже недостаточна для поддержания разряда.

Одной из форм коронного разряда являются **огни святого Эльма** (звёзды **Диоскура**) — электрические разряды в атмосфере в форме светящихся кисточек, наблюдаемые иногда на острых концах возвышающихся над земной поверхностью высоких предметов (башни, мачты, одиноко стоящие деревья, острые вершины скал и т. п.). Огни святого Эльма образуются в моменты, когда напряжённость электрического поля в атмосфере у острия достигает величины порядка $500 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ и выше, что чаще всего бывает во время грозы или при её приближении, а зимой во время метелей.

8.11.7. Искровой разряд

При напряжённости электрического поля больше пробивного напряжения $E_{\text{пр}}$ в газе возникает искровой разряд. Искровой разряд сопровождается возникновением ярко светящегося разветвлённого канала, по которому проходит кратковременный импульс тока. Температура газа в искровом канале бывает очень высокой — до 10 000 К. Быстрый нагрев газа резко повышает его давление в канале, что сопровождается возникновением ударных звуковых волн. Примером естественного искрового разряда является *молния*, длина которой может достигать нескольких километров, а максимальная сила тока — нескольких сотен тысяч ампер.

Искровой разряд характеризуется прерывистой формой (даже при пользовании источниками постоянного тока). Он возникает в газе обычно при давлениях порядка атмосферного. В естественных природных условиях искровой разряд наблюдается в виде *молний*. По внешнему виду искровой разряд представляет собой пучок ярких зигзагообразных разветвляющихся тонких полосок, мгновенно пронизывающих разрядный промежуток, быстро гаснущих и постоянно сменяющих друг друга. Эти полоски называют **искровыми каналами**. Они начинаются как от положительных, так и от отрицательных электродов, а также от любой точки между ними. Каналы, развивающиеся от положительного электрода, имеют чёткие нитевидные очертания, а развивающиеся от отрицательных — диффузные края и более мелкое ветвление.

Электрическая искра возникает в том случае, если электрическое поле в газе достигает некоторой определённой величины $E_{\text{пр}}$ (**критическая напряжённость поля, напряжённость пробоя, электрическая прочность**), которая

зависит от природы газа и его состояния. Например, в сухом воздухе при атмосферном давлении $E_{\text{пр}} = 30000 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$.

Величина $E_{\text{пр}}$ увеличивается с увеличением давления. Согласно экспериментальному закону, открытому в 1889 г. немецким физиком Фридрихом Пашеном (Paschen, 1865—1947 гг.), отношение пробивной напряжённости $E_{\text{пр}}$ электрического поля к давлению сухого газа является величиной постоянной (рис. 113):

$$\frac{E_{\text{пр}}}{p} = \text{const} . \quad (389)$$

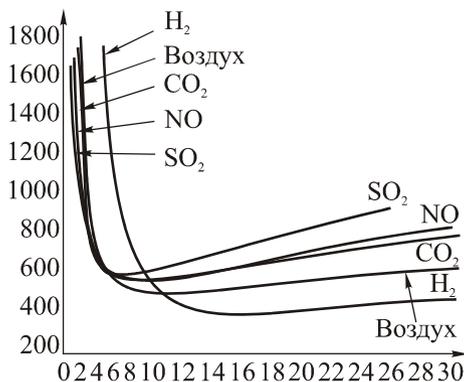


Рис. 113. Кривые Пашена для различных газов.

По оси абсцисс отложены произведения pd в мм рт. ст.,
по оси ординат — напряжение пробоя в вольтах

В результате прохождения импульса тока через канал искры в канале выделяется большое количество энергии (порядка 0,1—1 Дж на каждый сантиметр длины канала). С выделением энергии связано скачкообразное увеличение давления в окружающем газе — образование цилиндрической ударной волны, температура на фронте которой $\sim 10^4$ К. Происходит быстрое расширение канала искры, со скоростью порядка тепловой скорости атомов газа. По мере продвижения ударной волны температура на её фронте начинает падать, а сам фронт отходит от границы канала. Возникновением ударных волн объясняются звуковые эффекты, сопровождающие искровой разряд: характерное потрескивание в слабых разрядах и мощные раскаты грома в случае *молний*.

В момент существования канала, особенно при высоких давлениях, наблюдается более яркое свечение искрового разряда. Яркость свечения неоднородна, по сечению канала имеет максимум в его центре.

В настоящее время общепринятой считается так называемая **стримерная теория искрового разряда**. Качественно она объясняет основные особенности искрового разряда, хотя в количественном отношении и не может считаться завершённой. Если вблизи катода зародилась электронная лавина, то на её пути проходит ионизация и возбуждение молекул и атомов газа. Световые кванты, испускаемые возбуждёнными атомами и молекулами, распространяясь к аноду со скоростью света, сами производят ионизацию газа и дают начало первым электронным лавинам. Таким путём во всём объёме газа появляются слабо свяжющиеся скопления ионизированного газа (стримеры). В процессе своего развития отдельные электронные лавины догоняют друг друга и, сливаясь вместе, образуют хорошо проводящий мостик из стримеров. Поэтому в последующий момент времени и устремляется мощный поток электронов, образующий канал искрового разряда. Поскольку проводящий мостик образуется в результате слияния практически одновременно возникающих стримеров, время его образования много меньше времени, которое требуется отдельной электронной лавине для прохождения расстояний от катода к аноду. Наряду с **отрицательными стримерами**, т. е. стримерами, распространяющимися от катода к аноду, существуют также **положительные стримеры**, которые распространяются в противоположном направлении.

Искровой разряд проходит следующие стадии: резкое умножение числа электронов в сильно неоднородном поле близ проводника (электрода) в результате последовательных актов ионизации, начинаемых немногими, случайно возникшими свободными электронами; образование электронных лавин; переход лавин в стримеры под действием пространственного заряда, когда плотность заряженных частиц в головной части каждой лавины превысит некоторую критическую. Совместное действие пространственного заряда, ионизирующих электронов и фотонов в "головке" стримера, приводит к увеличению скорости развития разряда.

8.11.8. Несамостоятельная электропроводность газов

Рассмотрим свойства газа, помещённого в электрическое поле между электродами К (катод) и А (анод), при действии на него ультрафиолетового света, энергия кванта которого равняется $h\nu$ (рис. 114).

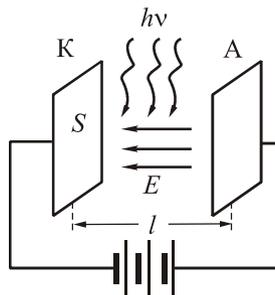


Рис. 114. Совместное действие электрического поля и ультрафиолетового света

Пусть в единице объёма газа находится n_0 молекул газа. Площадь электродов равняется S , а расстояние между электродами l . В результате одноэлектронной ионизации молекулы (M) газа:



в каждый момент времени в единице объёма появляется n_- электронов и n_+ положительно заряженных молекул:

$$n_- = n_+ = n_n, \quad (391)$$

где n_n — число пар ионов в единице объёма.

Полное число пар ионов, появившихся за время dt , равняется $N_n = n_n Sl$. Изменение этого числа может происходить в результате осуществления следующих процессов:

- при ионизации молекул газа: $dN_n = \alpha n_0 Sl dt$ (α — коэффициент ионизации);
- при рекомбинации ионов: $M^+ + \bar{e} \rightarrow M^* \rightarrow M + h\nu_0$,
 $-dN_p = \beta n_- n_+ Sl dt = \beta n_n^2 Sl dt$ (β — коэффициент рекомбинации);
- при переносе зарядов (электропроводность газа) между электродами:
 $-dN_e = \frac{jS}{e} dt$.

В условиях динамического равновесия:

$$\frac{dN_n}{dt} = \alpha n_0 Sl - \beta n_n^2 Sl - \frac{jS}{e} = \frac{d(n_n Sl)}{dt} = 0. \quad (392)$$

Следовательно, при несамостоятельном разряде в газе в условиях динамического равновесия:

$$\begin{aligned}\frac{dn}{dt} &= \alpha n_0 - \beta n^2 - \frac{j}{el} = 0, \\ \alpha n_0 &= \beta n^2 + \frac{j}{el}.\end{aligned}\tag{393}$$

Проанализируем полученный результат.

Слабое электрическое поле

В слабом электрическом поле значение j мало и, следовательно, на электродах разряжается небольшое число ионов:

$$\begin{aligned}\frac{j}{el} &\ll \beta n^2, \\ \alpha n_0 &= \beta n^2, \\ n_e &= \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} n_0.\end{aligned}\tag{394}$$



При несамостоятельном разряде в газе в слабом электрическом поле концентрация пар ионов определяется отношением коэффициентов (вероятностей) ионизации и рекомбинации и не зависит от плотности тока.

При несамостоятельном разряде в газе в слабом электрическом поле в электропроводности могут участвовать только n носителей зарядов, поэтому:

$$j = e \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} n_0 (\mu_0^- + \mu_0^+) E = \sigma E,\tag{395}$$

где μ_0^- и μ_0^+ — подвижности электронов и положительных молекулярных ионов.



В слабых электрических полях плотность тока при несамостоятельном разряде в газе пропорциональна напряжённости E поля, т. е. подчиняется закону Ома.

Сильное электрическое поле

В сильном электрическом поле значение j велико, так как все образовавшиеся в объёме Sl ионы достигают электродов, не успевая рекомбинировать:

$$\begin{aligned} \frac{j}{el} &\gg \beta n^2, \\ j &= \alpha n_0 el = \text{const}, \\ I &= \alpha n_0 eSl = I_{\text{насыщ}}. \end{aligned} \quad (396)$$



В сильном электрическом поле плотность тока при несамостоятельном разряде в газе достигает максимального значения (рис. 115). Её называют **плотностью тока насыщения**.

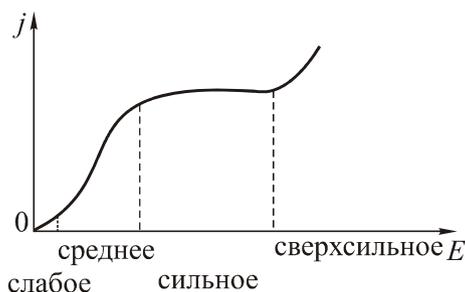


Рис. 115. Зависимость плотности тока j от напряжённости поля E при несамостоятельном разряде

Сверхсильное электрическое поле

В сверхсильных электрических полях положительные молекулярные ионы, обладая большой кинетической энергией, подходя к катоду (К), выбивают из него вторичные электроны, которые ускоряются полем, сталкиваются с молекулами газа и ионизируют их (ударная ионизация), в результате чего в газе появляются дополнительные носители заряда (электроны и ионы), нелинейно увеличивающие плотность тока j .



В сверхсильных электрических полях при несамостоятельном разряде в газе происходит лавинообразное образование носителей заряда, нелинейно от напряжённости E поля увеличивающих плотность тока.

Среднее электрическое поле

В средних электрических полях выполняется соотношение:

$$\alpha n_0 = \beta n^2 + \frac{j}{el},$$

$$j = el(\alpha n_0 - \beta n^2).$$
(397)



В среднем электрическом поле при несамостоятельном разряде в газе наблюдается плавный переход от линейной зависимости j от E к её независимости от E в области насыщения.

Контрольные вопросы

- ? В результате какого процесса газ становится электропроводным?
- ? Что называют ионизацией газа?
- ? Что называют рекомбинацией атомов?
- ? Какие заряды являются носителями тока в газах?
- ? Что называется электрическим током в газах?
- ? Что называется потенциалом ионизации?
- ? Что называется газовым разрядом?
- ? Объясните особенности самостоятельного газового разряда, начертив полную вольт-амперную характеристику газового разряда.
- ? Какой процесс называется ионизацией электронным ударом?
- ? Перечислите и опишите виды самостоятельных разрядов в газах.
- ? Что такое плазма? Каковы её особенности?

8.12. Электрические токи в атмосфере Земли

...Молния, как бы созревши,
Вдруг разорвёт облака и проносится пламенем ярким.
Быстро сверканье её, заливая окрестности светом.
Следует тяжкий удар, как будто бы, лопнув внезапно,
Рушится весь небосвод и грозит обвалиться на Землю.

Лукреций¹

Гроза прошла — ещё курьясь, лежал
Высокий дуб, перунами сражённый,
И сизый дым с ветвей его бежал.

Ф. И. Тютчев²

У него есть всё, о чём может мечтать учёный: его труды признаны и у него есть талантливые ученики... Но Капица по-прежнему неутомим в своих исследованиях, и по-прежнему безграничны его любопытство и изобретательность...

Л. Д. Ландау³

Под действием электрического поля Земли (табл. 47) в атмосфере устанавливается поток положительных ионов, т. е. ток проводимости, направленный вертикально вниз; плотность этого тока почти не зависит от высоты и в районе ясной погоды равна $(2—3) \cdot 10^{-16}$ А·см⁻². Токи противоположного направления создаются в районах с грозовой деятельностью.

Таблица 47. Электрическое поле в атмосфере Земли

Высота, км	Напряжённость, В·м ⁻¹
0,5	50
1,5	30

¹ Тит Лукреций Кар (Carus) — римский поэт и философ I в. до н. э.

² Фёдор Иванович Тютчев (1803—1873 гг.) — русский поэт, член-корреспондент Петербургской АН.

³ Лев Давидович Ландау (1908—1968 гг.) — советский физик-теоретик.

Таблица 47 (окончание)

Высота, км	Напряжённость, В·м ⁻¹
3	20
6	10
12	2,5

Плотность тока в гидросфере — 10^{-6} А·см⁻².

Плотность токов, обусловленных движением зарядов на каплях дождя, снега, града, равна:

- при спокойных дождях — 10^{-11} — 10^{-10} А·см⁻²;
- при грозовых ливнях и граде — до 10^{-8} А·см⁻².

Гроза — атмосферное явление, при котором в кучево-дождевых облаках или между облаком и земной поверхностью возникают молнии.

Молния — гигантский искровой разряд атмосферного электричества между облаками либо между облаками и земной поверхностью.

Ежедневно на Земле происходит примерно 44 000 гроз и около 8 млн вспышек молний.

Одну из первых систематизаций молний произвёл французский физик Доминик Ф. Араго (Arago, 1786—1853 гг.). Молнии делятся на **линейные** (наиболее частые) (рис. 116), шаровые (наименее изученные, иногда возникают после разряда линейной молнии) и **чёточные** (крайне редкие, кажутся состоящими из ряда ярких сферических или продолговатых тел).

Обычно молния возникает при разности потенциалов между основным отрицательно заряженным слоем и земной поверхностью примерно $3 \cdot 10^8$ В (напряжение в молнии может достигать и 10^9 В). Сила тока в молнии достигает 500 000 А (наиболее часто сила тока в молнии лежит в пределах от 20 000 до 40 000 А). Длительность молнии около 10^{-3} с, длина примерно 10 км, толщина канала до 20 см. Суммарный заряд, переносимый к земной поверхности, может достичь 10 Кл (10^{20} электронов) и более. Мощность вспышки примерно 100 МВт.

Считается, что 26 июля (6 августа) 1753 г. от шаровой молнии погиб Рихман. 7 июля 1977 г. две шаровые молнии на территории открытого кинотеатра в провинции Фуцзянь в Китае убили двоих детей. 17 августа 1978 г. группа со-

ветских альпинистов, разбивших лагерь в горах Кавказа, была атакована шаровой молнией. Огненный шар по очереди залетал в их спальные мешки. Один человек погиб, четверо получили сильнейшие ожоги. В 1980 г. в Куала-Лумпуре (Малайзия) светящийся красный шар преследовал жителей и поджигал на них одежду, а также сжёг несколько домов. Трактовок феномена **шаровой молнии** очень много. Советский физик Пётр Леонидович Капица (1894—1984 гг.) считал, что между облаками и Землёй возникает стоячая электромагнитная волна и на ней может образоваться газовый разряд, который движется по силовым линиям поля. Есть версия плазмоида, термохимических эффектов, происходящих в насыщенном водяном паре при сильном электрическом поле, и др.



Рис. 116. Линейная молния во время грозы.
Фото Ralph Wetmore—Tony Stone Worldwide

Вполне возможно, что именно молнии способствовали возникновению жизни на Земле. В начале 1950-х гг. американский биолог Стэнли Миллер (Miller, 1930—2007 гг.) показал, что разряд в "*первозданной земной атмосфере*", состоящей из паров аммиака, метана и воды, приводит к образованию аминокислоты — составной части любого белка.

Большинство лесных пожаров возникает из-за ударов молнии. В результате, с одной стороны, наносится огромный ущерб окружающей среде и человечеству, уничтожаются естественные источники кислорода, выделяется большое количество парниковых газов и т. д., а с другой стороны, в определённых районах Земли появляются новые формы растений благодаря возникшему симбиозу между растительностью и огнём ("пожарная селекция").

Таблица 48. Параметры нижней ионосферы в спокойных и возмущённых условиях

Параметр ионосферы	Спокойная ионосфера				Возмущённая ионосфера			
	день		ночь		день		ночь	
	45 км	75 км	45 км	75 км	45 км	75 км	45 км	75 км
Электронная концентрация, м^{-3}	$8 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^8$	0	10^6	10^8	$2 \cdot 10^{11}$	0	10^8
Ионная концентрация, м^{-3}	10^9	$8 \cdot 10^7$	10^9	$2 \cdot 10^8$	10^{11}	$7 \cdot 10^{10}$	10^{11}	$2 \cdot 10^{11}$
Плотность нейтральных частиц, м^{-3}	$5 \cdot 10^{22}$	$9 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{22}$	$9 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{22}$	$9 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{22}$	$9 \cdot 10^{20}$
Частота соударений электронов и нейтральных частиц, с^{-1}	$5 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^6$
Электронная проводимость, см^{-1}	$4,5 \cdot 10^{12}$	$4,7 \cdot 10^6$	—	$9,3 \cdot 10^9$	$5,6 \cdot 10^9$	$1,9 \cdot 10^3$	—	$9,3 \cdot 10^{-7}$
Ионная проводимость, см^{-1}	$2,3 \cdot 10^{-11}$	10^{-10}	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$8,8 \cdot 10^8$	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
Отношение гирочастоты электронов к частоте соударений электронов и нейтральных частиц	10^{-2}	1,75	10^{-2}	1,75	10^{-2}	1,75	10^{-2}	1,75

8.13. Газоразрядные источники света

Газоразрядные источники света — газоразрядные приборы, в которых электрическая энергия преобразуется в энергию оптического излучения при прохождении электрического тока через газы (чаще всего инертные), пары веществ (например, пары ртути) или их смеси. В соответствии с непосредственным источником излучения различают газосветные (неоновые, ртутные, натриевые, ксеноновые), люминесцентные и др. (рис. 117). Применяют главным образом для освещения, облучения и сигнализации.

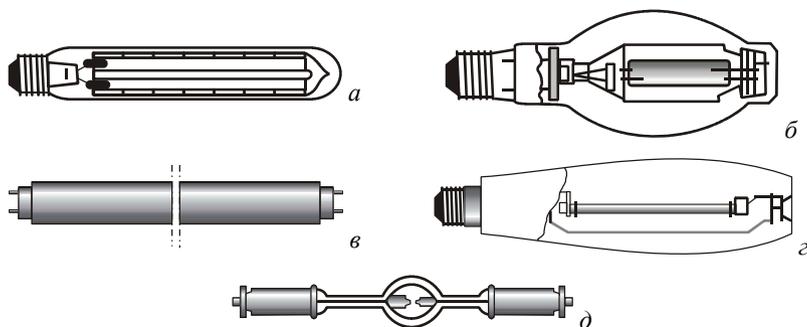


Рис. 117. Газоразрядные источники света:

- a* — натриевая лампа низкого давления; *б* — люминесцентная лампа;
- в* — ртутная лампа высокого давления с исправленной цветностью;
- г* — ксеноновая лампа сверхвысокого давления; *д* — натриевая лампа высокого давления с колбой из поликристаллического оксида алюминия

Газосветная трубка — газоразрядный источник света в виде стеклянной трубки, наполненной неонам, аргоном и другими газами с добавкой ртути. Газосветная трубка с неонам светится оранжево-красным светом, с аргоном и парами ртути — синим.

Люминесцентная лампа — газоразрядный источник света низкого давления, в котором ультрафиолетовое излучение разряда (обычно *дугового*) преобразуется с помощью люминофоров в длинноволновое (видимое) излучение. Наиболее распространённая разновидность — **ртутная люминесцентная лампа**. Она представляет собой стеклянную колбу (преимущественно цилиндрической формы) с нанесённым на внутреннюю поверхность слоем люминофора.

В торцах колбы укреплены вольфрамовые спиральные электроды. В лампу вводят каплю ртути, испаряющейся при зажигании разряда, и некоторое ко-

личество инертного газа (аргон, неон и др.), который способствует увеличению срока службы лампы и улучшению условий возбуждения атомов ртути. При подключении люминесцентной лампы к источнику переменного тока между электродами лампы возникает электрический ток (десятые доли А), возбуждающий свечение паров ртути. Давление ртутных паров обычно до 1,3 Па.

Мощность люминесцентной лампы обычно 4—200 Вт; световая отдача до 85 лм·Вт⁻¹; срок службы до 15 000—18 000 ч. Люминесцентные лампы широко применяются для освещения помещений общественных и жилых зданий, промышленных предприятий и т. п.

С точки зрения экологии большую проблему составляет утилизация отслуживших свой срок ртутных ламп — их нельзя просто выбрасывать на свалку, так как высвободившиеся при разбивании хрупкого стеклянного баллона пары ртути неминуемо приведут к серьёзному загрязнению окружающей среды сильнодействующим и трудноудаляемым ядом — ртутью.

В **неоновых индикаторных лампах** электроды сближены так, что положительный столб не образуется, а свечение ламп обусловлено рекомбинационным излучением.

Газоразрядные лампы с короткой дугой имеют значительно более высокий энергетический КПД, чем лампы накаливания, что позволяет получать большую яркость при той же мощности; во-вторых, в отличие от теплового излучения твёрдых тел, имеющего непрерывный спектр, газовый разряд даёт обычно излучение преимущественно с линейчатым спектром, характерным для того газа или пара, в котором происходит разряд. Отдельные виды газового разряда могут давать излучение с непрерывным спектром.

В **лампах ДРШ (дуговая ртутная шаровая)** давление в несколько раз выше, чем в лампе СВД¹-120А, и достигает десятков атмосфер. Поэтому их спектр хотя и линейчатый (табл. 49), но имеет сильно выраженный непрерывный фон. Спектральные линии значительно расширены. Время разгорания ламп составляет от 2 до 5 мин.

Ртутные лампы включаются в электрическую сеть только последовательно с балластным сопротивлением, ограничивающим силу тока в цепи. При работе на постоянном токе сопротивлением служит реостат, а при переменном токе — дроссель. Зажигание ламп типа ДРШ осуществляется с помощью кратковременного импульса высокого напряжения и высокой частоты, подавае-

¹ СВД — ртутная лампа сверхвысокого давления.

мого на зажигающий электрод лампы или на один из рабочих электродов, если зажигающего не имеется. Для получения такого импульса служит высокочастотный преобразователь с трансформатором.

Ртутная 200 Вт газоразрядная лампа с короткой дугой испускает УФ-излучение высокой интенсивности с длинами волн 305, 365, 405 и 436 нм. Применяется для: фотохимии, микрофильмов, оптической аппаратуры и исследования подложки (слоистой пластины).

Ртутная 1 000 Вт газоразрядная лампа с короткой дугой — самый яркий источник УФ-излучения. Это совершенный источник ультрафиолетового излучения для фотохимии, УФ-сушки, спектроскопии, освещения микроскопа, оптического контрольно-измерительного и научного применения.

Таблица 49. Спектральные линии ртутного спектра

Цвет линий	Длина волны ¹ λ , нм
Ультрафиолетовые	253,7
	296,7
	305
	312,6
	313,2
	334,1
	365,0
	366,3
Фиолетовые	404,68
	407,8
	435,83
Зелёные	495,97
	546,07

¹ Наиболее яркие линии выделены жирным шрифтом.

Таблица 49 (окончание)

Цвет линий	Длина волны ¹ λ , нм
Жёлтые	576,96
	579,07
Оранжевые	615,20
	623,20

В отличие от ртутных ламп, газовый разряд в **ксеноновых лампах сверхвысокого давления** даёт излучение с непрерывным спектром, причём длины волн интенсивных линий в ближней инфракрасной области спектра определяются ксеноном. Цветовые температуры ксеноновых ламп для излучения в видимой области спектра имеют значения приблизительно от 5 500 до 6 000 К. По спектральному составу излучение ксеноновой лампы в видимой области близко к прямому солнечному свету. Давление в лампах достигает нескольких десятков атмосфер. Ксеноновые лампы включаются в сеть и зажигаются аналогично ртутным лампам сверхвысокого давления.

Ксеноновая 200 Вт газоразрядная лампа с короткой дугой идеально подходит для медицинских и научных исследований, волоконно-оптического освещения и оптической аппаратуры.

Ксеноновая 1 000 Вт газоразрядная лампа с короткой дугой — лампа большой мощности излучает белый свет, лампа точечного источника света, используется для солнечной симуляции, кинопроекторов, прожекторов, оптической аппаратуры.

Так как давление в ртутно-кварцевых и ксеноновых лампах достигает нескольких десятков атмосфер, а температура колбы доходит до 950 °С, то при работе такие лампы должны быть надёжно закрыты кожухом. Кроме того, кожух должен предохранять глаза обслуживающего персонала от попадания прямого или рассеянного излучения, богатого ультрафиолетовыми лучами, которые вредны для глаз.

В качестве наполняющей среды для ламп низкого давления со столбом применяют преимущественно инертные газы. В специальных лампах используют водород и азот. Из инертных газов наиболее широкое применение находят

¹ Наиболее яркие линии выделены жирным шрифтом.

неон. Неоновые лампы используются для сигнального, декоративного и рекламного освещения, а также при искусственном выращивании растений. Другие инертные газы в чистом виде применяются редко. Аргон широко используется для наполнения ламп вместе с парами ртути. В этом случае газ играет вспомогательную роль, и мы имеем дело с разрядом в парах ртути.

Газосветные лампы низкого давления со столбом по форме разряда разделяются на лампы *тлеющего* и *дугового* разряда. *Лампы тлеющего разряда* с холодными катодами работают при малых токах, не превосходящих 100—200 мА, и при высоких напряжениях. *Лампы дугового разряда* с самокалящимися катодами работают при токах от 0,5 до 100 А и относительно низких рабочих напряжениях.

Неоновая лампа — газоразрядный источник света, в котором оптическое излучение возникает при электрическом разряде (в частности, тлеющем разряде) в неоне-гелиевой смеси. Имеет оранжево-красное свечение. Световая отдача от 25 лм·Вт⁻¹.

Неоновые лампы представляют собой стеклянные трубки диаметром от 10 до 30 мм и длиной от 10 см до 3 м. Наиболее употребительны диаметры от 12 до 16 мм и длины от 1,0 до 1,5 м. На концах трубки впаяны холодные электроды, выведенные к цоколям. Лампы наполняются неоном или аргоном до давления в несколько мм рт. ст. В настоящее время широко применяются газосветные трубки тлеющего разряда с различными люминофорами, которые наносятся на внутреннюю поверхность трубки. В этом случае в лампы наряду с инертным газом обычно вводится ртуть. Такие лампы представляют собой, по существу, разновидность ртутных люминесцентных ламп. Применение различных люминофоров даёт возможность получить целую гамму цветов и повысить световую отдачу ламп.

Благодаря разнообразной цветности излучения, возможности придания трубкам различной формы и простоте включения газосветные трубки широко применяются в устройствах сигнализации, для рекламного, декоративного и сигнального освещения.

Лампы тлеющего свечения представляют собой стеклянную колбу, в которую впаяны два электрода, расположенные на небольшом расстоянии друг от друга. Колба лампы наполнена инертным газом или смесью газов при давлении от нескольких миллиметров до нескольких десятков мм рт. ст. Лампы тлеющего свечения изготавливаются на малые мощности, лежащие в пределах от 0,01 до 10 Вт, и рабочие напряжения от 50 до 200 В. Ввиду малой величины даваемого светового и лучистого потока и низкой световой отдачи эти лампы непригодны для целей освещения. Их применяют в качестве индика-

торных и сигнальных ламп, указателей полярности, модуляторных ламп, осциллографов, цифровых ламп и т. п. Помимо того, свойства тлеющего свечения широко используются для изготовления различных газоразрядных приборов, например, стартеров, стабилизаторов и делителей напряжения, выпрямителей, тиратронов и т. д.

Включение ламп в сеть осуществляется последовательно с балластным сопротивлением, в качестве которого независимо от рода тока применяют исключительно активные сопротивления. Это объясняется тем, что в данном случае дополнительный расход энергии в сопротивлении не имеет значения, а активные сопротивления при тех небольших мощностях, которые в них расходуются, гораздо проще, компактнее и легче, чем дроссели. У ламп достаточно большого размера сопротивления часто встраиваются в ножку лампы, так что лампа может непосредственно включаться в сеть. В миниатюрных лампах сопротивление подключается отдельно.

При включении лампы в сеть тлеющее свечение покрывает светящейся плёнкой только электрод, соединённый с отрицательным полюсом. Поэтому при работе на постоянном токе свечением покрыт только один электрод, а при работе на переменном токе свечение попеременно с частотой сети покрывает то один, то другой электрод.

Излучение с весьма малой инерционностью следует за изменениями мощности, что даёт возможность модулировать его вплоть до частот в несколько десятков килогерц (кГц), а также использовать для регистрации быстропеременных процессов.

В области нормального тлеющего разряда при изменении силы тока яркость свечения остается неизменной, а площадь свечения и, следовательно, световой или лучистый поток изменяются пропорционально току. После того как вся поверхность отрицательного электрода оказывается покрытой тлеющим свечением, при дальнейшем увеличении тока возрастает яркость свечения. Световой или лучистый поток возрастает пропорционально яркости, поскольку поверхность свечения остается постоянной.

Цвет и спектр излучения определяются в основном родом наполняющего газа. Наиболее широко применяется для наполнения неон, дающий отчётливо видимое оранжево-красное свечение. Аргон даёт бледно-голубое свечение. Добавление ртути к неону вызывает появление синевато-белого ореола, окружающего светящуюся плёнку оранжево-красного цвета. В спектре излучения появляются линии ртути.

При наполнении ламп чистым неоном наряду с плёнкой тлеющего свечения оранжево-красного цвета, покрывающей катод, появляется синий ореол и свечение в объёме. Оно возникает в результате возбуждения метастабильных атомов неона. Для устранения ореола к неону добавляют около 25% гелия, атомы которого разрушают метастабильные атомы неона. Для целей фотографирования излучения, например, в осциллографах тлеющего разряда применяют наполнение ламп азотом, который даёт ряд полос в синефиолетовой и ближней ультрафиолетовой частях спектра, обладающих высокой активностью.

Рост требований к точности линейных измерений и необходимость создания воспроизводимого эталона метра стимулировали исследования по определению метра через длину световой волны. XXI Генеральная конференция по мерам и весам в 1960 г. приняла новое определение метра, положенное в основу системы единиц СИ: "*Метр — длина, равная 1 650 763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p^{10}$ и $5d^5$ атома криптона-86*".

ГЛАВА 9

Биоэлектричество. Электрические свойства горных пород. Принципы электроразведки

9.1. Биоэлектричество

Способность животных и растений генерировать электрические потенциалы — одно из наиболее удивительных свойств биологических систем. Какую бы часть организма или клетки мы не взяли, она обязательно несёт определённую электрическую полярность. Долгое время эту способность рассматривали как интересный биологический феномен, являющийся "побочным результатом" основных физиолого-биохимических и биофизических процессов. Однако в последние годы становится более ясным, что электрическая активность биологических объектов — это очень важная функция, которая играет существенную и весьма универсальную роль в жизнедеятельности организмов.

Ещё Аристотель сообщал своим ученикам, что электрический скат, обитающий в Средиземном море, *"заставляет цепенеть животных, которых он хочет поймать, побеждая их силой удара, живущего в его теле"*. А древнеримский врач Скрибоний Ларг (первая половина I в.) излечивал подагру стареющих римских патрициев с помощью *"освежающего"* удара электрического угря. Много позднее Вольта сопоставил удар, получаемый от электрического ската, с ударом от построенного им *вольтова столба*. Ещё позднее исследования показали, что среди примерно трёхсот известных видов электрических

рыб лишь немногие способны давать сильные импульсы. Так, двухметровый электрический скат¹ способен создать электрический импульс напряжением 50—80 В при силе тока 50 А до 150 раз в секунду. Электрические угри, живущие в Амазонке и некоторых других реках Южной Америки, способны создавать напряжение до 500 В.

И хотя с электрическими свойствами живых объектов человечество познакомилось на примере разрядов электрических рыб ещё в древнем Риме, начало их изучения обычно связывают с именем Гальвани. В 1780 г., проводя **опыты с отпрепарированными задними лапками лягушки**, он обнаружил, что, будучи подвешенными на медном крючке на балконе, они сокращались всякий раз, когда под влиянием ветра касались чугунной решётки. Этот опыт Гальвани истолковал как свидетельство существования в мышце "*животного электричества*" (рис. 118).

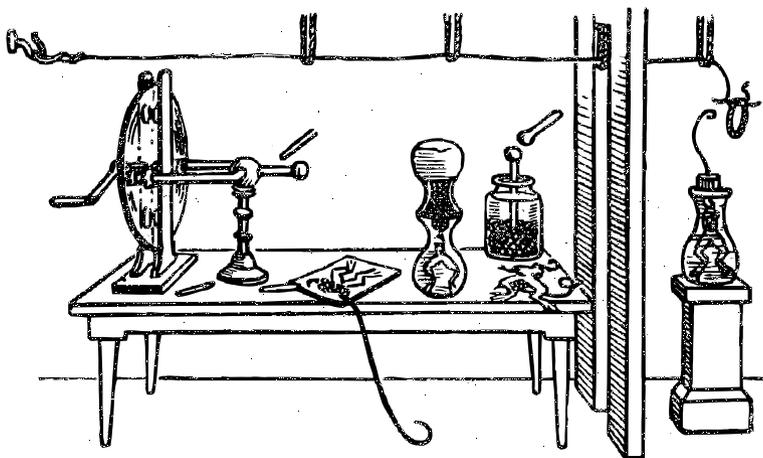


Рис. 118. Опыты Гальвани [31]



Гальвани показал, что для эффекта сокращения мышц лягушки необходимы металлы; показал, что при телах, не являющихся проводниками электричества, никакого эффекта нет; показал, что разные металлы дают разный эффект; но не обратил внимание на то, что эффект наблюдался только при наличии двух разных металлов.

¹ Torpediniformes.

Новыми опытами (опубликованы в 1797 г.) Гальвани доказал, что мышца лягушки сокращается и без прикосновения к ней металла — в результате непосредственного её соединения с нервом.

Итак, по мнению Гальвани, при соединении мышцы с нервом с помощью металлического проводника это "животное электричество" действует на нерв, что приводит к сокращению лапки лягушки. Такая интерпретация вызвала в 1792 г. возражение другого учёного — Вольта, который считал, что сокращение лапки лягушки в опытах Гальвани является результатом её раздражения электрическим током, возникающим при соединении двух разнородных металлов (медного крючка и чугунных перил балкона) с помощью биологической ткани. Спор Гальвани и Вольта длился около 30 лет и оказался очень плодотворным, побуждая соперников ставить всё новые и новые опыты. В результате Вольта удалось изобрести источник постоянного тока, а Гальвани — окончательно доказать существование биоэлектрических потенциалов (БЭП). По иронии судьбы элемент Вольта стал называться гальваническим, тогда как электрические потенциалы живых объектов, открытые Гальвани, принято измерять в вольтах.

В конце XIX — начале XX вв. появляются представления о природе БЭП. Первая достаточно строгая гипотеза была выдвинута в 1896 г. российским физиологом Василием Юрьевичем Чаговцем (1873—1941 гг.), который предложил рассматривать БЭП как диффузионные потенциалы, связанные с неравномерным распределением ионов. Основы современных представлений о механизмах генерации БЭП были заложены в 1901—1912 гг. Бернштейном, связавшим их возникновение со свойствами поверхностной мембраны клетки. Мембранная теория получила существенное развитие в 1952 г. в работах английского физиолога Алана Л. Ходжкина (Hodgkin, 1914—1998 гг.) и сотрудников, и принимается в настоящее время почти всеми электрофизиологами.

Большой интерес к изучению БЭП побудил многих исследователей использовать в качестве биологических объектов не только животных, но и другие организмы: простейших, водоросли, высшие растения. В итоге этих исследований было установлено два фундаментальных положения:

- электрическая активность свойственна не только животным, но и всем другим биологическим объектам;
- многие формы электрической активности, наблюдаемые у животных, имеют место и у других организмов.

Имеется значительное количество типов экспериментальных установок для регистрации БЭП. Однако все они включают три основные части — электроды, усилитель и регистрирующее устройство.

Большую роль в изучении БЭП сыграла разработка в 1939 г. Ходжкиным и английским физиологом Эндрю Ф. Хаксли (Huxley, род. в 1917 г.), а также К. С. Колом (Cole) и Кертисом (Curtis) микроэлектродной техники. Последняя отличается от обычной тем, что электроды имеют диаметр кончика, контактирующего с биологическим объектом, всего 0,5—1 мкм. Это позволяет с помощью особых микроманипуляторов вводить такие электроды внутрь клетки и изучать электрическую активность на клеточном уровне.

Огромный фактический материал, накопленный к настоящему времени, позволяет говорить о большом разнообразии БЭП. В основном они отличаются по двум параметрам:

- амплитуде;
- частотным характеристикам.

У амплитуды разброс величин очень высок. Если разряд электрических рыб (создаваемый не одной клеткой) может достигать 800 В, и это достаточно для того, чтобы убить или, по крайней мере, отпугнуть мелкое животное, то, например, регистрируемые с поверхности головы человека биопотенциалы мозга (электроэнцефалограмма) имеют обычно величину порядка нескольких микровольт. Не менее разнообразны и частотные характеристики БЭП. Так, например, потенциалы, отводимые от поверхности растений в покое, от поверхности кожи и др., являются практически постоянными во времени величинами. С другой стороны, имеют место очень быстрые колебания БЭП. Так, в серии нервных импульсов позвоночных длительность каждого из них может составлять всего несколько миллисекунд.

Такое разнообразие проявлений биоэлектрической активности неоднократно побуждало создать классификацию БЭП. Однако все классификации основывались обычно на чисто внешних признаках, без достаточного учета природы наблюдаемых электрических явлений. Впервые возможность создания вполне строгой классификации БЭП появилась после внедрения в практику электрофизиологического эксперимента микроэлектродной техники. Стало ясным, что электрическая активность клетки определяется, в основном, ионными процессами, происходящими на поверхностной плазматической мембране. В соответствии с этим можно различать два типа проявления электрической активности:

- **потенциалы покоя** (ПП), т. е. разности потенциалов между внутриклеточным содержимым и внешней средой (они регистрируются, когда один микроэлектрод вводится внутрь клетки, а другой находится снаружи по-

верхностной мембраны; их величина обычно составляет несколько десятков милливольт);

- **потенциалы действия** (ПД), т. е. изменения ПП при процессе возбуждения.

Под **биологическим электрогенезом (биоэлектрогенезом)** понимают комплекс механизмов, приводящих к генерации БЭП. В основе современной мембранной концепции биоэлектрогенеза лежат следующие главные положения:

- местом электрогенеза является поверхностная мембрана (на внутриклеточных мембранах тоже могут возникать разности электрических потенциалов, но электрические свойства клетки определяются преимущественно электрогенезом на поверхностной мембране);
- разность потенциалов на поверхностной мембране имеет ионную природу (а не электронную, как в металлах);
- генерация разностей потенциалов на поверхностной мембране обусловлена возникновением ионной асимметрии, т. е. неодинаковым распределением по обе её стороны катионов и анионов.

Рассмотрим вопрос о происхождении БЭП — вопрос о том, как возникает ионная асимметрия на поверхностной мембране. По современным представлениям, здесь действуют активный и пассивный механизмы. Пассивный механизм работает без затрат энергии (рис. 119).

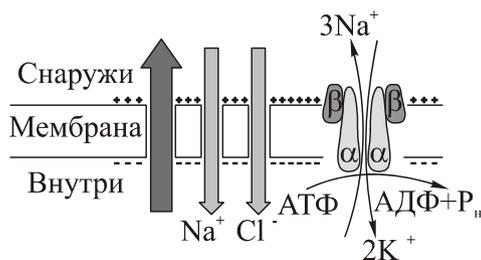


Рис. 119. Возникновение ионной асимметрии на поверхностной мембране

В его основе лежат два фактора:

- разница концентраций ионов по обе стороны мембраны;
- разная проницаемость мембраны для разных ионов.

Оба фактора приводят к тому, что некоторые ионы, двигаясь по градиенту концентрации наружу или внутрь клетки, лучше проникают через мембрану, а другие хуже. Наиболее легко проникает через мембрану в покое K^+ . Поскольку его концентрация обычно больше внутри клетки, чем снаружи, то он выходит по градиенту концентрации из клетки и заряжает наружную сторону мембраны положительно. Соответственно, внутренняя сторона мембраны оказывается заряженной отрицательно. Так как другие ионы, хотя и в меньшей степени, также могут проникать через мембрану, то возникающей мембранный потенциал будет по своей величине меньше того, который создавался бы только выходом K^+ , т. е. равновесного калиевого потенциала. Например, в аксоне кальмара мембранный потенциал, рассчитанный исходя из разности концентраций K^+ по обе стороны мембраны, составляет около -90 мВ (внутреннее содержимое заряжено отрицательно), а измеренный потенциал оказался близким к -60 мВ. Это связано с тем, что мембрана аксона проницаема не только для ионов K , но и в определенной степени для других катионов и анионов.

Кроме пассивного генерация разности потенциалов на мембране связана также с активным механизмом. Последний работает с потреблением энергии и связан с работой особых ферментов — транспортных аденозинтрифосфатаз. Они представляют своего рода молекулярные машины, обладающие удивительными свойствами. Гидролизую аденозинтрифосфат (АТФ), эти ферменты одновременно используют освобождающуюся энергию для переноса ионов через мембрану. В результате такого транспорта и создается активная компонента мембранного потенциала.

Не менее интересен и тот факт, что, несмотря на огромное разнообразие живых объектов, они имеют в основном, две электрогенные транспортные АТФазы — Na^+ , K^+ -АТФазу (преимущественно у животных) и H^+ -АТФазу (у грибов и растений). Первая выкачивает из клетки $3Na^+$ и одновременно закачивает $2K^+$, вторая выкачивает из клетки H^+ . Работа этих ферментов приводит к зарядке мембраны, а именно созданию активной компоненты мембранного потенциала со знаком "плюс" снаружи и знаком "минус" внутри.

В настоящее время транспортные АТФазы хорошо изучены. Показано, что это интегральные белки, т. е. белки, молекулы которых пронизывают мембрану. АТФазы включают две части — каталитическую, взаимодействующую с АТФ и обращенную внутрь клетки, и канальную, направленную наружу.

В процессе работы эти АТФазы ведут себя как настоящие молекулярные машины. Они совершают определённые конформационные движения (т. е. из-

менения пространственной ориентации структуры молекул), переходя из состояния E_1 в состояние E_2 и обратно. В результате этого происходит трансмембранный перенос ионов и создание активной компоненты мембранного потенциала.

Рассмотрим теперь, как ведёт себя мембранный потенциал во время возбуждения. Этот процесс происходит практически во всех животных и растительных клетках, но приобретает черты высокоспециализированной функции в нервных волокнах. Его работа была раскрыта при исследовании гигантских аксонов головоногих моллюсков, в частности, гигантских аксонов кальмара. Эти аксоны не покрыты миелиновой оболочкой (многослойным образованием, защищающим мембрану аксона от окружающей среды) и имеют очень большой диаметр (0,5—1 мм), что облегчает проведение с ними микроэлектродных исследований.

При возбуждении нервного волокна увеличивается проницаемость его мембраны для ионов Na. Поскольку ионов Na всегда больше снаружи и меньше внутри волокна, то они устремляются внутрь и вызывают деполяризацию мембраны, т. е. уменьшение её мембранного потенциала (рис. 120).

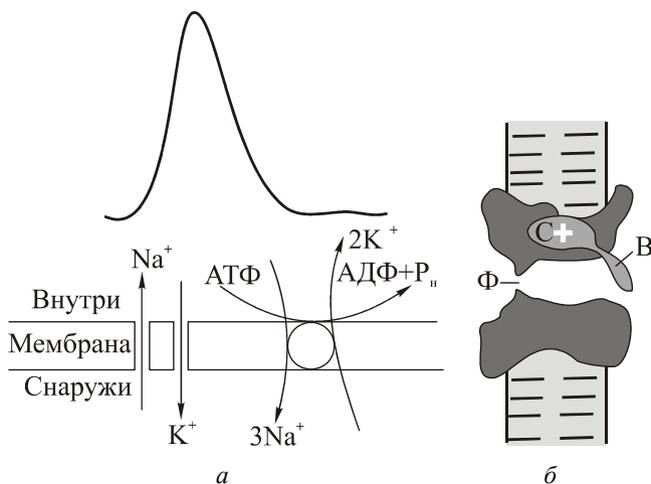


Рис. 120. Деполяризация мембраны

Возникает восходящая ветвь ПД. Процесс деполяризации ионами Na идёт до установления некоторого равновесного состояния, после чего резко увеличивается проницаемость мембраны для K^+ . В отличие от Na^+ , ионов K больше внутри волокна, чем в окружающей среде, поэтому они начинают выходить

наружу. Это приводит к реполяризации мембраны, т. е. восстановлению её исходного потенциала. Возникает нисходящая ветвь ПД. Таким образом, генерация ПД в нерве непосредственно не связана с затратами энергии и происходит за счёт уже имеющихся на мембране ионных градиентов.

Возникает вопрос: почему же при возбуждении вначале увеличивается проницаемость мембраны для Na^+ , а лишь затем для K^+ ? Это связано с работой особых белковых образований в мембране — натриевых и калиевых каналов.

Каналы — это своеобразные отверстия в мембране. Они имеют диаметр около 0,7—0,8 нм и заполнены водой. Каналы состоят из селективного фильтра и ворот. Селективный фильтр — это часть канала, которая позволяет производить отбор ионов. Например, натриевый канал пропускает преимущественно ионы Na, в то время как калиевый канал проницаем в основном для ионов K. Наиболее важная часть рассматриваемых каналов — ворота, т. е. конформирующий, изменяющий свою пространственную ориентацию участок канала, способный открывать или закрывать канал. Состояние ворот зависит от потенциала в мембране. При одних его значениях они открываются, при других становятся закрытыми. Генерация ПД как раз и возможна потому, что ворота натриевых и калиевых каналов по-разному зависят от величины мембранного потенциала. В процессе генерации ПД при деполяризации мембраны под влиянием раздражителя вначале открываются натриевые каналы и возникает входящий внутрь волокна натриевый ток. Затем в условиях более глубокой деполяризации, вызванной входящим натрием, происходит закрытие натриевых каналов и открываются калиевые каналы, что приводит к возникновению выходящего потока ионов K^+ и реполяризации мембраны.

Процесс возбуждения, связанный с генерацией ПД, наблюдается не только в нервных волокнах, но и во многих других образованиях, в том числе и в тканях растений. При этом механизм генерации ПД является по существу во всех случаях одинаковым. Отличия наблюдаются лишь в некоторых особенностях. Например, если у всех возбудимых объектов роль реполяризующего иона играет K^+ , то деполяризующий ион может быть разным. В нервных волокнах это Na^+ , в некоторых гладких мышцах Ca^{2+} , а в клетках высших растений таким ионом является Cl^- .

В сильной степени может изменяться сопряженность генерации ПД с метаболизмом. Их генерация в нервных волокнах носит пассивный характер. Такой механизм хорошо функционирует, поскольку длительность одного импульса всего несколько миллисекунд, и за единичный импульс внутрь волокна входит Na^+ и, соответственно, из него выходит K^+ в количестве около $3\text{--}4 \cdot 10^{-12}$ моль на 1 см^2 поверхности мембраны. Следовательно, генерация

одного импульса вызывает незначительное нарушение имеющегося по обе стороны мембраны градиента концентраций ионов К и Na. Этого градиента хватает на генерацию очень многих импульсов.

Другая ситуация в клетках растений. Длительность ПД здесь достигает нескольких секунд, и за это время происходит значительное нарушение существующих ионных градиентов. Поэтому ионному насосу, роль которого играет H^+ -АТФаза, приходится здесь восстанавливать ионный гомеостаз в большинстве случаев после каждого импульса.

За то время, в течение которого наука занимается изучением БЭП, накоплен огромный материал, показывающий их тесную связь почти со всеми жизненными функциями. Это легло в основу широкого применения регистрации БЭП для диагностики физиологического состояния объекта. Особенно успешно это направление развивается в медицине. Используется регистрация БЭП и в сельском хозяйстве для прогноза практически значимых качеств животных и растений.



Участие БЭП в протекании жизненных процессов весьма универсально и разнообразно.

Выше было уже сказано, что поверхностная плазматическая мембрана клетки всегда поляризована — её наружная сторона всегда заряжена положительно, а внутренняя — отрицательно. Эта разность потенциалов на мембране может составлять у клеток разных объектов -100 мВ и более (до -300 мВ). Создаваемые за счёт работы пассивных и активных механизмов, такие потенциалы покоя, наряду с АТФ, могут рассматриваться как своеобразная форма запаса энергии в клетке. Также под влиянием электрического поля на мембране может ускоряться или замедляться (в зависимости от знака заряда) движение ионов через каналы. Существенное значение имеет электрическая поляриность на мембране и для осуществления активного транспорта веществ через мембрану с помощью особых веществ — переносчиков. Возможно, что БЭП играет роль в протекании электроосмических явлений в мембране, т. е. передвижения воды под влиянием электрического поля.

Итак, использование энергии БЭП для осуществления различных типов транспорта через мембрану веществ в заряженной форме — это один из способов участия БЭП в энергизации клеточных процессов, исследуются также и другие. Также БЭП выполняют важную регуляторную роль. Это становится особенно очевидным, если принять во внимание значения напряжённостей

электрического поля на мембранах. При трансмембранной разности потенциалов, равной 0,1 В (хотя она может быть в 2—3 раза больше), и средней толщине мембраны 10 нм напряжённость электрического поля через мембрану составит не менее 10^5 В·см⁻¹. Такие огромные напряжённости оказывают сильное влияние на структурную организацию мембраны. Это влияние происходит в первую очередь благодаря тому, что молекулы или отдельные части молекул белков и липидов могут иметь *дипольный момент*. Под действием изменений электрического поля на мембране молекулы мембранных белков могут изменять свою ориентацию или конформационное состояние функционально значимых центров. В липидном матриксе происходит изменение микровязкости, а также явление *электрострикции* (электромеханического сжатия — см. разд. 5.9). Структурные изменения в липидах способны повлиять на состояние белков.

Все это приводит к тому, что изменения разности потенциалов на мембране под действием тех или иных факторов оказывают влияние на работу таких мембранных белков, как ферменты, рецепторы, каналы, переносчики веществ и т. д. Благодаря этому может осуществляться регуляторная роль БЭП в функциональной активности клетки.

Информационная роль биоэлектрических потенциалов — это очень существенный и, пожалуй, весьма широко известный аспект проблемы о функциональной значимости БЭП. Наибольшего совершенства их информационная роль достигла в нервных волокнах высших животных. Возникающие в них под влиянием различных внешних стимулов ПД распространяются с высокой скоростью (100 м·с⁻¹) и обеспечивают передачу информации от одной части организма к другой. Сам процесс распространения ПД, представляющего собой временную деполяризацию мембраны, происходит с помощью чисто электрического механизма (рис. 121).

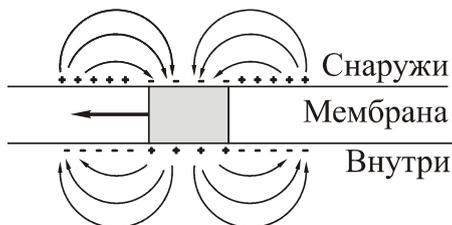


Рис. 121. Распространение потенциалов действия

От невозбуждённого участка нерва к возбуждённому протекают так называемые местные токи, которые вызывают деполяризации невозбуждённого участка и, таким образом, перемещение ПД. Описанный способ может обеспечивать распространение ПД без затухания. С определёнными особенностями он наблюдается у большинства животных.

Но не только животным свойственны генерация и распространение ПД в ответ на внешнее раздражение. Ещё в начале XX в. индийский учёный Джагдиш Ч. Бос (Bose, 1858—1937 гг.) показал, что при движении листа мимозы возникают колебания БЭП, которые сходны с таковыми в нервах. Механизм распространения ПД у высших растений изучен, и он аналогичен тому, который имеет место в нервах животных.

Также имеют значение биоэлектрические потенциалы в самоорганизации живых систем. Поскольку клетки или ткани организма имеют электрические полярности, они создают вокруг себя электрические поля (рис. 122).

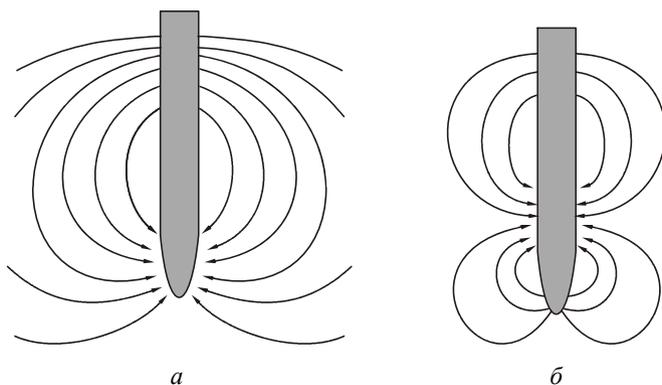


Рис. 122. Биоэлектрические поля

Существует мнение, что эти биополя представляют собой своеобразную силовую матрицу, в соответствии с которой может осуществляться рост и развитие отдельных органов и тканей животных и растений. Интересно, что электрическое поле одного объекта, например семени, может влиять на электрическое поле другого (если они находятся рядом) и таким образом обеспечивать определенное взаимодействие их физиологических процессов. Но вопрос о самоорганизации живых систем разработан в науке пока крайне слабо.



Местом электрогенеза является поверхностная мембрана, разность потенциалов на поверхностной мембране имеет ионную природу, генерация разностей потенциалов на поверхностной мембране обусловлена возникновением ионной асимметрии.

Генерация и распространение ПД свойственны не только животным, но и растениям. БЭП играют важные регуляторную, информационную и другие роли в организации живых организмов.

9.2. Электрические свойства горных пород

Горные породы — природные минеральные агрегаты, возникающие в результате геологических процессов и слагающие земную кору в виде самостоятельных геологических тел.

По происхождению различают 3 группы горных пород:

- **магматические горные породы** — изверженные горные породы, образующиеся в результате застывания и кристаллизации магмы (обычно силикатного состава);
- **осадочные горные породы** — образовавшиеся путём осаждения в водной среде минеральных и органических веществ;
- **метаморфические горные породы** — горные породы, возникшие в результате преобразования осадочных или изверженных пород с полным или значительным изменением их минерального состава, структуры и текстуры.

По поведению в электрическом поле минералы можно классифицировать (табл. 50) на хорошие проводники (в основном сульфиды, сульфосоли, самородные металлы), средние и слабые проводники (оксиды и гидроксиды) и непроводники (силикаты, карбонаты, фосфаты и некоторые др.). Однако существуют исключения, например, сфалерит фактически является средним или слабым проводником.

Таблица 50. Классификация минералов по электропроводности

Хорошие проводники	Средние и слабые проводники	Непроводники	
Антрацит	Антимонит	Алмаз	Магнезит
Арсенопирит	Боксит	Альбит	Монацит
Галенит	Бурый железняк	Анортит	Мусковит
Гематит	Висмутовый блеск	Апатит	Нефелин
Графит	Вольфрамит	Бадделеит	Оливин
Золото	Гранат (ожелезненный)	Барит	Полевой шпат
Ильменит	Гюбнерит	Бастнезит	Роговая обманка
Ковеллин	Каолинит	Берилл	Сера
Колумбит	Касситерит	Биотит	Силлиманит
Магнетит	Киноварь	Волластонит	Сподумен
Манганит	Корунд	Гиперстен	Ставролит
Молибденит	Криптофит	Гипс	Турмалин
Пирит	Лимонит	Гранат (светлый)	Флюорит
Пирролюзит	Сидерит	Диопсид	Целестин
Пирротин	Смитсонит	Кальцит	Циркон
Платина	Стибнит	Каменная соль	(слабо ожелезненный)
Рутил	Сфалерит	Карналлит	Шеелит
Серебро	Тунгстит	Кварц	Шпинель
Танталит	Фаялит	Кианит	Эпидот
Тетраэдрит	Хромит	Клейофан	
Титаномагнетит	Циркон	Ксенотим	
Халькозин	(сильно ожелезненный)		
Халькопирит			

По своим электрическим свойствам горные породы, как и другие вещества, также подразделяются на *электронные проводники (проводники I рода)*, в которых электрические заряды переносятся свободными электронами, и *ионные проводники (проводники II рода)*, в которых электрические заряды переносятся ионами, находящимися в растворах, заполняющих поры горных пород. Некоторые породы обладают смешанной электропроводностью. Удельное электрическое сопротивление пород определяется прежде всего характером и величиной электропроводности минералов, составляющих данную породу. По значению сопротивления минералы различаются следующим образом:

- **минералы очень низкого сопротивления** (до 10^{-5} Ом·м) — самородные золото, платина, серебро;
- **минералы низкого сопротивления** (от 10^{-5} до 1 Ом·м) — сульфиды (пирит, халькопирит, арсенопирит, галенит и др.), некоторые окислы (касситерит, борнит, марказит, магнетит и др.), графит и некоторые угли;
- **минералы среднего сопротивления** (от 1 до 10^5 Ом·м) — гематит, боксит, киноварь, ангидрит, шеелит и др.;
- **минералы высокого и очень высокого сопротивления** (от 10^5 до 10^{12} Ом·м), составляющие основную группу породообразующих минералов, — полевые шпаты, кварц, кальцит, слюды, нефть и др.

Минералы первых двух групп относятся в основном к электропроводящим. У них, как и у металлов, электрический ток представляет собой упорядоченное движение свободных электронов под действием электрического поля. Чем больше процентный состав хорошо проводящих минералов в породе, тем ниже её сопротивление. У большинства горных пород породообразующие минералы обладают очень высоким сопротивлением. Подобные горные породы в первом приближении можно считать состоящими из минерального скелета и естественного раствора, заполняющего поры и трещины. Их электропроводность определяется:

- электропроводностью минерального скелета, которая из-за высокого сопротивления породообразующих минералов оказывает слабое влияние на электропроводность породы в целом;
- электропроводностью свободной воды, заполняющей поры в породе и называемой **объёмной**;
- электропроводностью, вызванной наличием на зёрнах породы поверхностного, связанного слоя воды.

Таким образом, электропроводность большинства пород определяется количеством воды в породе и её минерализацией. При этом основными носителями электрических зарядов являются ионы солей, находящиеся в свободной воде, которая передвигается в породе под действием капиллярных сил и силы тяжести.

В силу различных электрохимических процессов на поверхности твёрдых частиц породы адсорбируется тонкий слой воды, названной **поверхностной** или **связанной**. Внутренняя часть поверхностного слоя образована зарядами твёрдого тела, а внешняя — ионами противоположного знака, имеющимися в воде. В результате образуется двойной электрической слой.

Двойной электрический слой образован двумя близкими друг к другу слоями электрических зарядов противоположного знака, но одинаковой поверхностной плотности, поэтому электрически нейтрален. Обычно возникает на границе раздела двух фаз, например твёрдого электрода и жидкости в электролите, но может образоваться и внутри одной фазы, например в газобразной плазме. Строение слоя существенно влияет на механизм и кинетику электрохимических реакций (например, электролиза), на электрокинетические явления.

По характеру закрепления ионов поверхностную воду принято подразделять на прочносвязанную и рыхлосвязанную. Благодаря двойному электрическому слою вода в горной породе становится неоднородной по электрическим свойствам. В электрическом поле ионы поверхностной воды поляризуются, вследствие этого происходит передача электрических зарядов даже при отсутствии свободных ионов.

Горную породу в качестве проводника электрического тока можно рассматривать как агрегат, состоящий из твёрдого минерального скелета, жидкости и газов. На удельное сопротивление агрегата влияют:

- удельное сопротивление минералов, слагающих твёрдую часть породы (её скелет);
- удельное сопротивление жидкостей и газов, заполняющих поры;
- влажность породы;
- пористость породы;
- структура породы, форма и взаимное расположение её пор;
- процессы, проходящие на контакте поровой жидкости и минерального скелета.

Основные пороодообразующие минералы не проводят электрический ток, поэтому сопротивление громадного большинства осадочных, метаморфических и изверженных пород определяется всеми перечисленными факторами, кроме минерального состава.

С увеличением водонасыщенности порового пространства сопротивление породы уменьшается. Водонасыщенностью, в частности, объясняется то, что ниже уровня подземных вод, где заполнение пор водой максимально, оно меньше, чем выше уровня. При этом из-за преобладания свободной воды наибольшие отличия сопротивлений отмечаются в крупнозернистом песке, гальке, сильнотрещиноватых скальных породах. И, наоборот, в связи с большим количеством прочносвязанной воды у глинистых пород сопротивление выше и ниже уровня подземных вод отличается незначительно.

Сопротивление пород зависит от электропроводности подземной воды. При малых концентрациях солей, с которыми чаще всего приходится иметь дело в природных условиях, сопротивление воды можно считать величиной, обратно пропорциональной концентрации солей и мало зависящей от состава растворённых солей.

С достаточной для практики точностью сопротивление воды можно определить, предполагая, что концентрация солей обусловлена только одной какой-либо солью, играющей основную роль в данной гидрохимической провинции. Очень часто этой солью служит NaCl. Расчёт сопротивления подземной воды в случае доминирующего влияния NaCl можно вести по следующей эмпирической формуле:

$$\rho = \frac{8,4}{M}, \quad (398)$$

где M — минерализация (в г·л⁻¹).

Строение токопроводящих путей, характер пор и трещин, их ориентировка, т. е. особенности, которые в петрографии определяются понятиями "структура" и "текстура", не только изменяют сопротивление породы, но и приводят к электрической анизотропии — разной электропроводности вдоль и вкрест (поперёк) слоистости. В первую очередь анизотропия проявляется почти во всех глинистых осадочных горных породах и сланцах, которые состоят из тонких или мощных пропластков различного сопротивления. Такая порода будет лучше проводить электрический ток по напластованиям, чем вкрест. У метаморфических пород также наблюдается бóльшая электропроводность по простиранию. Трещиноватые скальные породы представляют собой среды, в которых более благоприятное направление распространения тока будет

совпадать с простиранием трещин, что и приводит к их анизотропии. При отсутствии закономерной трещиноватости, что имеет место в толщах пород, затронутых выветриванием, нельзя говорить и об определённой анизотропии. Наиболее высокими сопротивлениями (свыше 200—300 Ом·м) отличаются скальные (изверженные, метаморфические и осадочные) породы. При этом у изверженных они достигают 1 000, а иногда 10 000 Ом·м. На величину сопротивления скальных пород решающее влияние оказывают такие факторы, как трещиноватость и выветривание. Трещиноватость скальных пород ниже уровня подземных вод, т. е. в условиях полной влагонасыщенности приводит к снижению сопротивления. В зависимости от степени трещиноватости и выветривания, а также от минерализации подземных вод оно может снизиться в десятки раз по сравнению со значениями, которые характерны для тех же, но монолитных пород. Если трещины заполнены продуктами химического и физического выветривания или переотложенными глинами, сопротивление также уменьшается в десятки и даже сотни раз по сравнению с ненарушенными породами. При воздушном заполнении трещин оно несколько выше, чем у ненарушенных. Сопротивление рыхлых осадочных пород практически всецело определяется гидрогеологическими условиями. Так, сухие пески могут иметь удельное сопротивление ρ , равное десяткам тысяч омметров, тогда как в условиях полного влагонасыщения оно снижается до десятков, а в случае сильноминерализованных вод — до единиц омметров.

Изверженные породы характеризуются наиболее высокими значениями удельных сопротивлений. Это вполне согласуется с тем, что именно данной группе пород свойственна очень малая пористость по сравнению с остальными горными породами. Удельное сопротивление плотных изверженных пород измеряется тысячами и иногда десятками тысяч омметров.

Сопротивление трещиноватых изверженных пород в том случае, когда трещины служат путями циркуляции подземных вод, ниже сопротивления пород в массивном залегании (сопротивление сильнотрещиноватых пород достигает сотен омметров).

Метаморфические породы по удельному сопротивлению занимают промежуточное положение между осадочными и изверженными породами. Пористость и влажность метаморфических пород зависят главным образом от степени их метаморфизации, поэтому удельное сопротивление пород тем выше, чем больше степень их метаморфизации. Например, удельное сопротивление сильнометаморфизованных гнейсов измеряется тысячами омметров, т. е. оно близко к сопротивлению гранитов; сопротивление же глинистых сланцев при

достаточном их увлажнении может измеряться всего лишь несколькими десятками омметров.

Среди метаморфических пород малым удельным сопротивлением выделяются графитизированные и углефицированные породы, главным образом сланцы. Сопротивление этих пород понижается за счёт наличия электронно-проводящего графита и сильнометаморфизованного расплывлённого углистого материала. При достаточно высоком содержании графита сопротивление графитизированных сланцев может измеряться десятками долями омметра. Обычно оно колеблется от единиц до нескольких десятков омметров.

Околорудные и приконтактовые изменения горных пород, сопровождающиеся вторичной минерализацией и изменением пористости, могут существенно сказаться на величине их удельного сопротивления. Например, окварцевание рудовмещающих пород обычно ведёт к увеличению их удельного сопротивления. Имеются данные, свидетельствующие о повышении в зонах околорудных изменений степени анизотропии горных пород.

Для метаморфических пород вследствие динамических воздействий, которым они подвергались, характерна сложная текстура, при которой частицы породы, а следовательно, и поры вытянуты по направлению сланцеватости. В связи с этим сопротивление породы в направлении сланцеватости становится меньше, чем вкрест её. Таким образом, метаморфическим породам часто свойственна электрическая анизотропия, которую характеризуют **коэффициентом анизотропии** λ_p (табл. 51):

$$\lambda_p = \frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}}, \quad (399)$$

где ρ_{\perp} — удельное сопротивление поперёк напластования; ρ_{\parallel} — удельное сопротивление напластования.

Таблица 51. Коэффициенты анизотропии λ_p удельного электрического сопротивления пород Норильского района

Порода	Коэффициент анизотропии λ_p
Аргиллиты	1,10
Базальты	1,09
Габбро-долериты дифференцированные	1,08

Таблица 51 (окончание)

Порода	Коэффициент анизотропии λ_p
Габбро-долериты недифференцированные	1,24
Долериты	1,17
Доломиты	1,04
Известняки	1,50
Мергели	1,06
Песчаники	1,12
Туфобрекчии	1,39
Туфы, туффиты	1,09

Таблица 52. Электрические свойства земной коры

Тип земной поверхности	Доля занятой земной поверхности	Средняя толщина слоя, км	Проводимость, $\text{см}\cdot\text{м}^{-1}$	Толщина скинслоя на частоте 8 Гц, км
Морская вода	71	0—3	3—5	0,08—0,1
Пресная вода	—	—	10^{-1} — 10^{-3}	0,56—5,6
Осадочные и кристаллические горные породы	24	0—35	10^{-2} — 10^{-5}	1,8—56
Ледники, снег	5	0—1,5	10^{-4} — 10^{-6}	17,8—178
Мерзлота	—	0,5	10^{-4} — 10^{-5}	17,8—56

Таблица 53. Удельные электрические сопротивления некоторых грунтов, породообразующих и рудных веществ

Вещество	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м
Ангидрид	10^2 — 10^5
Базальт	$2\cdot 10^4$

Таблица 53 (продолжение)

Вещество	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м
Габбро и диабазы	$5 \cdot 10^3$ — 10^4
Галенит	10^{-5} — 10^{-3}
Гематит	10^4 — 10^8
Глина, содержащая солёную воду	0,5—10
Гнейс	$2 \cdot 10^4$ — $3,4 \cdot 10^4$
Гранит	$3 \cdot 10^2$
Гранитоиды	10^4 — $2 \cdot 10^4$
Графитовые сланцы	1— 10^2
Диабаз	20— $2 \cdot 10^4$
Диорит	$5 \cdot 10^4$
Известняк	$6 \cdot 10^{-5}$ — $5 \cdot 10^2$
Каменная соль	30— 10^5
Кварц	10^{12} — 10^{14}
Кварцевые песчаники	$5 \cdot 10^3$ — 10^4
Кварцит	10^6
Конгломерат	25— $1,15 \cdot 10^4$
Лимонит	10^6 — 10^8
Мергель	0,5—70
Моренные отложения	10^2 — $3 \cdot 10^3$
Мрамор	10^2 — 10^5
Песок	0,5—70
Песок, насыщенный пресной водой	10—60
Песок, насыщенный солёной водой	0,2—4

Таблица 53 (окончание)

Вещество	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м
Песчаник	$30—10^5$
Пирит	$10^{-4}—10^{-1}$
Пирит-пирротиновые руды	$1—10^2$
Пирротин	$10^{-5}—10^{-4}$
Плагиоклаз	$10^9—10^{12}$
Плагиопорфиры	$5 \cdot 10^3—10^4$
Полевой шпат	$10^{11}—10^{12}$
Сидерит	$10^3—10^4$
Сланец кристаллический	$2 \cdot 10^4$
Сланцы глинистые	$4 \cdot 10^{-4}—9 \cdot 10^2$
Суглинок	$10—4,5 \cdot 10^2$
Ультраосновные породы	$10^3—4 \cdot 10^3$
Халькопирит	$10^{-3}—10^{-1}$

9.3. Диэлектрическая проницаемость горных пород

Диэлектрическая проницаемость ϵ (см. разд. 1.4) характеризует способность вещества изменять электрическое поле вследствие явления *поляризации*, т. е. упорядоченной ориентации связанных электрических зарядов. В горных породах такие заряды имеются в свободной воде, в окружающей твёрдые частицы поверхностной воде и в самих твёрдых частицах (электроны в атомах, кристаллах и т. п.).

Как известно, из широко распространённых веществ наибольшей диэлектрической проницаемостью обладает вода (см. табл. 1, 54). Поэтому при пропус-

кании тока вектор поляризации, или электрический момент единицы объёма горных пород, определяется вектором поляризации электролита, насыщающего породу, и вектором поляризации самой породы.

Таблица 54. Диэлектрическая проницаемость некоторых грунтов при 20 °С

Название грунта	Частота поляризующего тока ν , Гц	Диэлектрическая проницаемость ϵ
Ангидрид	—	6—7
Базальт	—	6—12
Вулканический туф	—	3,8—4,5
Габбро	низкая	6
Гнейс	низкая	6—15
Гранит	$50—5 \cdot 10^7$	6—10,5
Диабаз	$50—5 \cdot 10^7$	7—28
Диорит	—	8—9
Доломит	—	7,3—9
Известняк	—	8—12
Кварцит	—	4,3—7
Мел	—	8—9
Мрамор	$5 \cdot 10^5—5 \cdot 10^7$	8,8—3,5
Песок кварцевый (влажность 0÷44%)	$10^6—10^8$	4—28
Песчаник	$10^2—10^7$	4—40
Сиенит	—	7—14
Сланец слюдяной	—	16—17
Сланец хлоритовый	—	6—8
Трахит	—	8—9

Влажность w горной породы существенно влияет на величину её диэлектрической проницаемости ϵ (рис. 123).

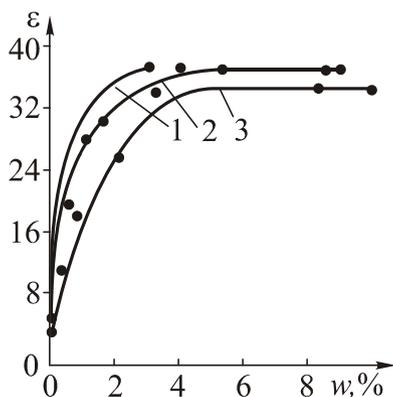


Рис. 123. Зависимость диэлектрической проницаемости от влажности (по Э. И. Пархоменко): 1 — доломит; 2 — мергель; 3 — алевролит

Величиной поляризационной восприимчивости (ПВ) характеризуется вызванная поляризация породы, которая наблюдается при пропускании постоянного или переменного тока инфранизкой частоты (до 10 Гц). В этом случае поляризуемостью электролита можно пренебречь, а величина диэлектрической проницаемости породы не играет роли. С повышением частоты тока, вследствие инерционности явлений вызванной поляризации, значение ПВ резко убывает и уже при частоте 100 Гц равно нулю.

В целом относительная диэлектрическая проницаемость у различных пород изменяется от 2—3 до 30—40. Минимальными значениями ϵ характеризуются сухие сильно пористые осадочные породы, максимальными — те же породы, но полностью водонасыщенные. Поскольку величина ϵ породобразующих минералов изменяется от 4 до 11, а у воды она максимальна и равна 80—81, то основным фактором, определяющим значение ϵ пород, является её водонасыщенность. Последняя же в свою очередь зависит от пористости, трещиноватости.

Диэлектрическая постоянная горных пород существенно сказывается на характере электромагнитных полей в Земле лишь в том случае, когда частота поля превышает десятки, а в некоторых случаях и тысячи килогерц. В связи с этим параметр ϵ играет роль лишь в тех методах электроразведки, в которых изучаются поля радиоволновых частот.

9.4. Поляризуемость пород

Если какой-либо объём горной породы или руды оказывается в постоянном электрическом поле, то под влиянием этого поля породы или руды поляризуются.

Процесс поляризации ионно-проводящих горных пород заключается в деформации под влиянием поляризующего поля двойных электрических слоёв, образующихся на границе твёрдой и жидкой фаз. Горные породы и руды, обладающие электронной проводимостью, поляризуются за счёт образования двойных электрических слоёв, возникающих на контакте сред с электронной и ионной проводимостями, если через этот контакт протекает электрический ток.

Внешне процессы поляризации горных пород и руд проявляются в том, что первичное (поляризующее) электрическое поле оказывается искажённым в результате наложения на него вторичного поля, создаваемого поляризованными участками среды. После того как первичное поле перестаёт существовать, вторичное поле постепенно исчезает вследствие разрядки двойных слоёв на контакте электронных и ионных проводников или по мере упругого восстановления электрического равновесия двойных слоёв на контакте жидкой и твёрдой фаз.

Интенсивность процесса поляризации горных пород и руд принято характеризовать параметром η , называемым **поляризуемостью среды**. Коэффициент η — величина безразмерная и выражается в процентах.

Поляризуемость пород и руд, содержащих электронно-проводящие компоненты, в большой степени зависит от площади поверхности раздела между электронными и ионными проводниками, приходящейся на единицу объёма. В связи с этим породы, содержащие рассеянные вкрапления электронных проводников, в том числе вкрапленные и прожилково-вкрапленные руды, обладают большой поляризуемостью. Весьма интенсивно поляризуются графитизированные и углефицированные породы.

Поляризуемость пород и руд, содержащих электронно-проводящие включения, возрастает с повышением влажности и уменьшением минерализации растворов. Весьма интересна в практическом отношении зависимость поляризации вкрапленных руд от процентного содержания вкрапленников — с увеличением объёмного содержания вкрапленников поляризация должна возрастать.

Поляризуемость пород, содержащих электронные проводники, колеблется от единиц до десятков процентов.

Поляризуемость ионно-проводящих горных пород в целом значительно меньше поляризуемости пород, содержащих электронные проводники, и не превышает нескольких процентов. В данном случае η зависит главным образом от влажности и концентрации солей во внутривлажной влаге, а также от гранулометрического состава породы. С повышением влажности и минерализации поровой влаги поляризуемость породы уменьшается.

Среди ионно-проводящих пород минимальной поляризуемостью обладают глины и пески, насыщенные минерализованными водами (доли процента и, реже, единицы процентов). Максимальная поляризуемость (до 3—4%) характерна для массивных кристаллических пород. Как отмечалось выше, во время пропускания тока через породу она поляризуется. Медленно устанавливающиеся виды поляризации приводят к изменению напряжённости поля в среде не только при пропускании тока, но и к появлению вторичных потенциалов после его отключения. Подобные потенциалы называют **вызванными**. Их природа обусловлена различными электрохимическими процессами.

Интенсивность потенциалов вызванной поляризации принято выражать также через поляризуемость среды η , равную отношению разности потенциалов вызванной поляризации, измеренной через 0,5 с после отключения питающего тока, к разности потенциалов первичного поля.

Вызванная поляризация связана с процессами, проходящими в породах на контактах твёрдой и жидкой фаз. Она максимальна, если породы сложены электропроводящими минералами, и значительно меньше у ионопроводящих пород.

Величина η у различных пород изменяется от 0,1 до 30—40% и определяется следующими геолого-гидрогеологическими факторами:

- минеральным составом;
- текстурно-структурными особенностями породы;
- влажностью;
- минерализацией подземных вод.

Если порода или руда сложены электропроводящими минералами низкого сопротивления (сульфиды, графит и др.), то величина η достигает 10÷40% и мало зависит от минерального состава.

Поляризуемость определяется как процентным содержанием электропроводящих минералов, так и площадью соприкосновения их с ионными проводниками, на которой происходят электрохимические реакции. С увеличением влажности поляризуемость пород, содержащих рудные минералы, возрастает.

Из пород, не содержащих электропроводящие минералы, наибольшие η (до 3—6%) у массивных кристаллических и некоторых песчано-глинистых, наименьшие η ($< 1\%$) — у скальных осадочных и песчано-глинистых, насыщенных минерализованными водами. Вызванная поляризация песчано-глинистых отложений зависит от количества глинистых (мелкодисперсных) частиц, достигая максимума при содержании глины 3—10%. С увеличением влажности до 10—30% поляризуемость таких пород сначала растёт, а при дальнейшем увлажнении — падает. Характерно, что в определённых геолого-гидрогеологических условиях величина поляризуемости пород остаётся достаточно постоянной.

Кроме природных факторов на величину параметра η оказывают влияние такие условия измерений, как плотность поляризующего тока и длительность его пропускания, вид лабораторной или полевой установки, с помощью которой проводятся работы. Поэтому для сопоставления результатов измерений следует выполнять их при сходных условиях.

9.5. Принципы электроразведки

Горные породы в зависимости от их состава, структуры и условий залегания обладают различными электрическими свойствами — удельным сопротивлением, диэлектрической проницаемостью, поляризуемостью и др. Таким образом, реальный геологический разрез можно рассматривать как часть пространства, заполненную средами с различными электрическими свойствами. Поэтому каждому геологическому разрезу, представляющему реальную совокупность отдельных геологических образований (пластов, интрузивных и рудных тел, жил, тектонических зон и т. д.), выделяемых по собственно геологическим признакам — литологическим, стратиграфическим, структурным и др., всегда соответствует геофизический эквивалент — **геоэлектрический разрез**. На этом разрезе отдельные его элементы (горизонты и локальные тела) характеризуются значениями электромагнитных параметров, отражающих соответствующие электрические свойства пород и руд. Геоэлектриче-

ские разрезы, как и геологические, характеризуются также мощностью, глубинами залегания, углами падения и другими геометрическими параметрами слагающих их тел и горизонтов.

Непосредственной задачей, решаемой с помощью электроразведки, является определение геоэлектрического разреза исследуемого района. Имея сведения о геоэлектрическом разрезе, можно перейти к решению основной задачи — построению геологического разреза. Для этого необходимо знать электрические свойства горных пород и их связь с геологическими факторами: литологическим составом, условиями залегания, возрастом пород и т. п.

Способ изучения геоэлектрического разреза, принятый в электроразведке, заключается в том, что на земной поверхности в горных выработках или скважинах наблюдают естественные или искусственно созданные электрические поля. Характеризующие эти поля величины — напряжённость и потенциал — зависят от строения геоэлектрического разреза. Изучив поле в доступных для исследования точках, можно с той или иной степенью точности составить представление о строении геоэлектрического разреза.

Для любой породы электрические свойства являются объективным количественным отражением их минерального и петрографического состава, структуры и геологической истории образования, условий залегания и гидрогеологической обстановки, а также зависят от частоты поля.

Каждый электрический параметр характеризует породу с определённой точки зрения и служит основой для применения одного или нескольких методов электрической разведки.

Определение электрических свойств пород можно производить путём их измерений на образцах, в скважинах, горных выработках, на обнажениях, а также при выполнении полевых электроразведочных работ.

Электропроводность горной породы (или обратная ей величина — удельное сопротивление) является важной характеристикой свойств вещества, находящегося в недрах Земли. В отличие от плотности, которая изменяется в Земле в узких пределах, интервал изменения удельной электропроводности очень широк: 10^3 — 10^{-7} Ом⁻¹·м⁻¹. Электропроводность горной породы зависит от минерального состава, фазового состояния, пористости, трещиноватости, влагонасыщенности, температуры и давления. И к настоящему времени на основании лабораторных исследований образцов горных пород установлены основные закономерности и получены количественные оценки влияния перечисленных факторов на величину электропроводности.

Электроразведка (электрическая, или точнее, электромагнитная разведка) объединяет физические методы исследования геосфер Земли, поисков и разведки полезных ископаемых, основанные на изучении электромагнитных полей, существующих в Земле в силу естественных космических, атмосферных физико-химических процессов или созданных искусственно [74].



Электрическая разведка (электроразведка) — комплекс геофизических методов разведки, основанных на различии в электрической проводимости горных пород и руд.

Электроразведка используется при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых, при решении задач, связанных с изучением геологического строения верхней части земной коры, а также в гидрогеологических и инженерно-геологических изысканиях. При электроразведке изучают естественные и искусственные электрические (электромагнитные) поля, возникающие в горных породах под воздействием источников постоянного и переменного тока. Это наиболее старый из методов геофизики.

Первые опыты по электроразведке относятся к 1829—1830 гг., когда на медных рудниках Корнуолла (Cornwall, Англия) Р. В. Фоксом (Fox) наблюдались естественные электрические поля, а Фостер установил наличие связи между двумя месторождениями путём пропускания тока.

Электроразведка как прикладная ветвь геофизики сформировалась в начале XX в. В 1903 г. в России в Санкт-Петербурге вышла монография Е. И. Рагозина "О применении электричества к исследованию рудных залежей". Большую роль в становлении электроразведки сыграли работы французского учёного К. Шлюмберже (Schlumberger), который в 1910—1912 гг. предложил методы электрического зондирования и профилирования постоянным током (методы сопротивлений) и успешно опробовал их в различных геологических условиях во Франции, Румынии, Канаде, США и других странах. В конце 1920-х гг. братьями М. и К. Шлюмберже во Франции впервые были предложены и реализованы методы геофизических исследований скважин.

В России первые электроразведочные работы связаны с именами выдающихся учёных-физиков, профессоров Ленинградского государственного университета Виктора Робертовича Бурсиана¹ (1886—1945 гг.) и Алексея Алексеевича Петровского (1873—1942 гг.). В 1924—1925 гг. под их руководством

¹ С 1933 г. декан физического факультета ЛГУ, а с 1934 г. — директор НИФИ при ЛГУ.

были выполнены съёмки естественного электрического поля и эквипотенциальных линий (в поле постоянного и переменного токов) на рудных месторождениях Алтая, Урала, Казахстана и в других районах.

Основной физической характеристикой горных пород, которая измеряется при исследованиях электроразведочным методом, является *удельное электрическое сопротивление*.

Другой способ определения — магнитотеллурический метод, основанный на использовании естественного электромагнитного поля. Подробнее о магнитотеллурическом методе — *см. том "Магнетизм и электромагнитные явления" данного курса*.

В настоящее время новые методы электроразведки имеют значительную актуальность при поисках кимберлитовых трубок. Это обусловлено открытием в последние годы практически немагнитных высокоалмазных трубок, не выделяющихся при помощи *магниторазведки*.

Наблюдения за электрическими свойствами горных пород позволяют предсказывать землетрясения. Одним из возможных механизмов электризации горных пород при их деформировании и разрушении может быть *пьезоэффект* (*см. разд. 1.5*) кварцосодержащих пород. Однако механоэлектрические явления наблюдаются и в горных породах, не обладающих пьезоэлектрическими свойствами.

Электризация возникает при неоднородном поле напряжений в образце, причём появление электрического поля и его изменения отражают наличие динамических процессов в очаге готовящегося разрушения независимо от характера развития механических напряжений в массиве горных пород.

Наблюдения за вариациями естественных электрических полей широко и весьма успешно используются для изучения напряжённого состояния массивов в горных выработках. С помощью этого метода определяют расположение и размеры нарушенных зон массива, и их развитие. При этом появление в некоторые моменты времени в массиве структурно нарушенных участков чётко отмечается по локальным изменениям электрического потенциала, что позволяет оценивать опасность возникновения горных ударов. Установленные общие закономерности и диапазон изменений потенциала в пределах зоны опорного давления применительно к различным породам позволили разработать автоматизированную систему оповещения об опасных проявлениях горного давления.

Явления, возникающие в геологических средах в результате механо-электрических преобразований, происходящих при воздействии на них упругих

полей, известны в геофизике давно. Некоторые из них, как, например, *пьезоэффект* (см. разд. 5.9) и электромагнитное излучение (ЭМИ), используются в рудной геофизике и при электромагнитном мониторинге процессов, происходящих внутри Земли. Однако из-за того, что пьезоявления свойственны лишь определённому типу горных пород, а ЭМИ носит нелинейный характер и предполагает достаточно высокий энергетический уровень воздействия, область их применения в значительной степени ограничена. Наиболее распространённым сейсмoeлектрическим явлением, присущим практически всем горным породам, является преобразование энергии упругих колебаний в энергию электромагнитного поля, имеющего преимущественно электрокинетическую природу и обусловленного наличием двойных электрических слоёв на границе твёрдой и жидкой фаз горной породы (**сейсмoeлектрический эффект второго рода**). Это явление было открыто А. Г. Ивановым в 1930-е гг.

9.6. Классификация методов структурной электроразведки

Электроразведка отличается от других геофизических методов множеством (более пятидесяти) способов разведки. Это объясняется тем, что в электроразведке используются естественные поля космической, атмосферной, электрохимической природы; искусственные поля с различными способами их создания и измерения (гальваническими, или контактными; индуктивными или бесконтактными, и дистанционными); гармонические широкого диапазона частот; импульсные поля разной длительности. Кроме того, используются несколько независимых друг от друга пород, изучаются амплитуды электрических и магнитных составляющих поля, а также их фаз.

Естественные методы основаны на изучении электрических полей, существующих в природе. К ним относят:

- метод естественного поля (МЕП);
- метод самопроизвольной поляризации (ПС);
- метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ);
- метод переменного естественного электрического поля (ПЕЭП) и др.

Искусственные методы основаны на использовании искусственно возбуждаемого электромагнитного поля. К ним относят:

- электрическое профилирование;
- вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ);
- зондирование по методу становления поля (ЗС);
- метод заряда (МЗ);
- георадарную съёмку и др.

По технологиям применения методы электроразведки принято подразделять на:

- зондирования, которые служат для расчленения горизонтально (или полого) залегающих слоистых разрезов;
- профилирования, предназначенные для изучения крутослоистых разрезов или выявления локальных объектов;
- подземные, объединяющие методы для выявления неоднородностей между горными выработками и земной поверхностью.

Важной характеристикой в электроразведке является глубинность. Изменение глубинности достигается изменением мощности источников и способов создания поля.

9.7. Электрическое профилирование. Вертикальное электрическое зондирование

Этот метод электроразведки реализуется следующим способом. На питающие электроды АВ (хорошо заземлённые) подаётся напряжение с батареи (либо с электрогенератора) и измеряется сила тока I в этой линии. На приёмных заземлениях MN измеряется разность потенциалов U (рис. 124). Вычисляется **кажущееся сопротивление** R_K по формуле:

$$R_K = K \frac{U}{I}, \quad (400)$$

где K — коэффициент установки.

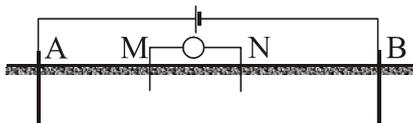


Рис. 124. Схема метода электрического профилирования (четырёхэлектродная установка)

Эта система перемещается без изменения расстояния между электродами вдоль некоторой линии (профиля). Значения кажущегося сопротивления выносят на карту. По изменениям этого параметра судят о геологическом строении территории. Глубина, к которой относят эти значения, определяется расстоянием между электродами АВ.

Если в однородной среде с удельным сопротивлением ρ_K находится какое-либо плохо проводящее геологическое образование (например, пласт каменного угля среди осадочных пород), то распределение тока, поступающего в землю через электроды А и В, будет отличаться от такового для однородной среды (рис. 125). Ток будет "отжиматься" к поверхности, что повлечёт за собой увеличение разности потенциалов между приёмными электродами и, следовательно, увеличение ρ_K . Наличие в геологическом разрезе хорошо проводящего объекта (например, рудной залежи) приводит к концентрации тока в этом объекте, т. е. к уменьшению плотности тока в области приёмных электродов и, таким образом, к уменьшению ρ_K .

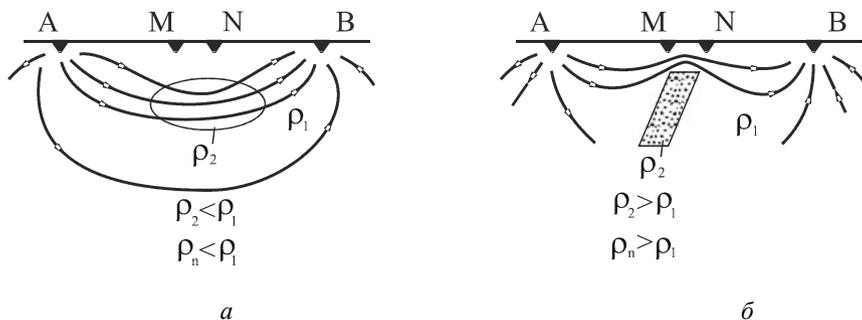


Рис. 125. Влияние неоднородности геологического разреза на кажущееся сопротивление:

a — плохо проводящий пласт; *б* — хорошо проводящее тело

Основными областями применения электропрофилирования являются следующие:

- геологическое картирование;
- выявление и прослеживание разрывных нарушений;
- поиски и разведка рудных и нерудных полезных ископаемых;
- решение инженерно-геологических задач;
- изучение районов вечной мерзлоты.

Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) — это модификация метода сопротивления, с помощью которой можно изучить геоэлектрический разрез по вертикали. При этом методе проведения работ измеряется кажущееся сопротивление установками с разной глубиной исследования путём увеличения разноса, т. е. расстояния между питающими электродами или между питающими и приёмными линиями.

В зависимости от характера решаемых геологических задач установки для работы методами сопротивлений (т. е. совокупность питающих и измерительных заземлений) различаются числом заземлений и их взаимным расположением. По числу заземлений различают четырёхточечные, трёхточечные и двухточечные установки. Установки, у которых измерительные заземления сближены настолько, что разность потенциалов между ними, отнесённая к расстоянию, практически равна напряжённости поля, носят название **предельных**. Как правило, применяют низкочастотные источники тока.

Чаще всего ВЭЗ выполняется симметричной четырёхэлектродной установкой (см. рис. 124). Расстояние между электродами MN обычно остаётся постоянным, а расстояния между питающими электродами (разносы) постепенно увеличиваются в геометрической прогрессии с коэффициентом прогрессии 1,3—1,5. После выполнения ВЭЗ на специальных бланках с двойным логарифмическим масштабом вычерчиваются графики зависимости R_K от $AB/2$.

9.8. Электрический каротаж

Геофизические исследования скважин (**каротаж**¹) впервые были предложены и реализованы на практике в конце 1920-х гг. братьями Шлюмберже во Франции.

¹ От франц. carottage.

В зависимости от того, какие физические свойства горных пород изучаются при исследовании скважин, различают методы каротажа:

- электрический;
- радиоактивный;
- акустический;
- термический и др.

Электрокаротаж — метод электроразведки, применяемый при геофизических исследованиях в скважинах.

Среди промыслово-геофизических методов электрический каротаж возник раньше других. Этот метод является также главным по своему значению в деле изучения геологического разреза скважин. Без электрического каротажа не бурится сегодня ни одна нефтяная или газовая скважина. Информация, получаемая по данным электрокаротажных измерений, является основным геологическим документом, по которому судят о наличии и запасах ряда полезных ископаемых, в первую очередь нефти и газа.

При электрическом каротаже измеряют удельное электрическое сопротивление пород, пересечённых скважиной, и электрическое поле естественных потенциалов, самопроизвольно возникающих в скважине.

Приведём описание некоторых методов электрического каротажа.

Каротаж стандартный (КС). Наблюдения подобны электрическому профилированию. Зонд обычно содержит три электрода. Четвёртый электрод заземляется на поверхности. Измеряется кажущееся сопротивление по формуле

$R_K = K \frac{U}{I}$, где K — коэффициент установки, зависящий от взаимного расположения электродов зонда.

Боковое каротажное зондирование (БКЗ). Осуществляется поочерёдным или одновременным измерением 5-ю или 6-ю зондами различной длины.

Метод потенциала скважины (ПС). Используется один из измерительных электродов зонда КС, другой электрод находится на поверхности. Измеряется разность потенциалов. Кривая изменения напряжения соответствует изменению естественных потенциалов вдоль скважины.

Скважинные исследования **методом естественного поля (ЕП)** или **поля самопроизвольного (каротаж ПС)** сводятся к измерению постоянных естественных потенциалов, возникающих у пластов с разной *электрохимической активностью*. Естественные потенциалы (потенциалы собственной поляри-

зации) возникают при окислительно-восстановительных, диффузионно-адсорбционных и фильтрационных процессах, протекающих в различных горных породах. Зондом для измерения собственных потенциалов служат свинцовые приёмные электроды. Работы в методе ПС чаще выполняются способом потенциала, т. е. установкой, состоящей из одного неподвижного приёмного электрода, заземлённого вблизи устья скважины, и второго электрода, перемещаемого по скважине. Иногда, особенно при наличии электрических помех, запись ПС ведётся **способом градиента потенциала**. В этом случае оба приёмных электрода передвигаются по скважине, а расстояние между ними остаётся постоянным (1—2 м).

В результате работ получают графики естественных потенциалов, измеряемые в милливольтгах. По аномалиям на диаграммах ПС выделяются пласты с разной *электрохимической активностью*. Однозначная литологическая интерпретация диаграмм ПС затруднена, так как естественное электрическое поле зависит от многих факторов. Чаще всего против глинистых пород наблюдаются положительные аномалии потенциала ПС, а около пористых проницаемых пластов — отрицательные. Интенсивными аномалиями положительного и отрицательного знака выделяются сульфидные залежи, пласты антрацита, графита. Слабыми аномалиями (единицы милливольт) отличаются массивные, плотные, плохо проницаемые песчаники, известняки, изверженные породы.

Скважинные исследования методом ПС служат для расчленения геологических разрезов и корреляции по соседним скважинам отдельных пластов, выявления плохо проницаемых сланцев, глин и хорошо проницаемых песков, пористых известняков, выделения сульфидных, полиметаллических руд, угля, графита, оценки пористости и проницаемости пород.

Микрокаротаж — детальное изучение геологического разреза в буровой скважине путём измерения *электрического сопротивления* горных пород при расстояниях между электродами около 2,5 см. Микрокаротаж позволяет детально изучать геологические разрезы, выделять проницаемые пласты и оценивать их пористость.

9.9. Метод заряда

Одним из успешно применяющихся методов на постоянном токе является метод заряда (МЗ). В основном он используется для поисков объектов, обла-

дающих высокой электропроводностью по сравнению с вмещающими горными породами (сульфидные и полиметаллические руды). МЗ имеет две основные модификации: электрическую и магнитную. Рассмотрим электрическую модификацию МЗ (измеряется только электрическая составляющая поля заряженного тела).

Методом заряда (методом заряженного тела) изучаются искусственно создаваемые электромагнитные поля и выявляются в их структуре аномальные отклонения, обусловленные наличием в исследуемом полупространстве проводящих включений, являющихся одновременно объектами заряда. Поле может быть создано постоянным или низкочастотным переменным током. Изучение структуры поля осуществляется различными способами измерения его электрической компоненты.

Общий вид четырёхэлектродной установки, используемой в МЗ, представлен на рис. 126.

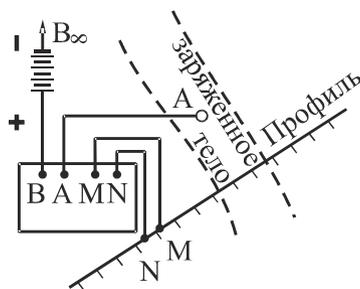


Рис. 126. Установка для съёмки постоянного электрического поля [83]

Искусственные постоянные электрические поля создают с помощью батарей, аккумуляторов, генераторов, подключаемых к "питающим" электродам-заземлителям (А, В), через которые в землю пропускают ток I . С помощью двух других "приёмных" электродов-заземлителей (М, N) и милливольтметра измеряют разность потенциалов ΔU . Как правило, электрод А помещают в рудное тело, вскрытое скважиной, а электрод В относят на достаточно большое расстояние (до 30 км), чтобы его полем можно было пренебречь. Электроды М и N перемещают по профилям, измеряя потенциал электрического поля или его градиент. Таким образом, поле электрода А можно представить как поле заряженного объекта, в предельном случае, когда тело достаточно удалено от точки наблюдения, его поле можно рассматривать как поле точечного источника (рис. 127).

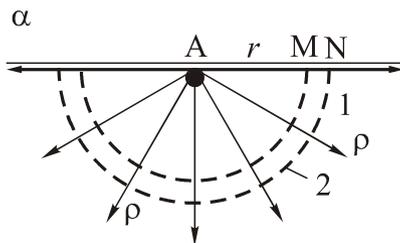


Рис. 127. Поле точечного источника над однородной изотропной средой на границе земля-воздух: 1 — токовые линии; 2 — эквипотенциальные линии [74]

Нормальное поле точечного источника (рис. 127), т. е. зависимость ΔU от I , расстояний между пунктами возбуждения и измерения, удельного электрического сопротивления однородного полупространства ρ , может быть определено с помощью закона Ома:

$$\Delta U = IR = \frac{I\rho\Delta l}{S}, \quad (401)$$

где R — сопротивление линейного проводника; Δl и S — его длина и площадь поперечного сечения.

В однородной среде ток I от точечного источника стекает во все стороны равномерно. Эквипотенциальные поверхности, т. е. поверхности, на которых электрический потенциал U постоянен, должны быть перпендикулярны к токовым линиям, а значит, иметь вид полусфер с центром в точке A . Разность потенциалов ΔU между двумя точками M и N или между эквипотенциальными поверхностями с радиусами AM и AN , проходящими через эти две точки, может быть определена по формуле (401), где I — весь ток, проходящий через указанные полусферы.

Длина "проводника" равна расстоянию между соседними эквипотенциальными поверхностями $\Delta l = MN$, а поперечное сечение S — поверхности полусферы с радиусом AO , т. е. $S = 2\pi(AO)^2$. При больших AM и AN по сравнению с MN :

$$(AO)^2 \approx AM \cdot AN, \quad (402)$$

$$\Delta U = \rho I \frac{MN}{2\pi \cdot AM \cdot AN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right). \quad (403)$$

Полученная формула даёт возможность определить разность потенциалов, если известны ток, удельное сопротивление породы и расстояния между точками наблюдения и источником. И наоборот, измерив ΔU и I и определив расстояния между электродами, можно рассчитать удельное электрическое сопротивление горных пород.

При $AN \rightarrow \infty$ получаем формулу для расчёта потенциала точечного источника U , т. е. разность потенциалов между точкой измерения и бесконечностью (при $AM = r$):

$$U = \frac{I\rho}{2\pi r}. \quad (404)$$

В теории электроразведки доказано, что электрод любой формы можно рассматривать как точечный, если его поле изучают на расстояниях, в 5 раз и более превышающих длину заземлённой части электрода. Поэтому получаемые формулы расчёта для точечного источника применимы в практической электроразведке.

Источник электрического поля заземляется через скважину или горную выработку непосредственно в локальном геологическом объекте, размеры которого и положение в пространстве необходимо определить. Предполагается, что проводимость пород или руд, слагающих этот объект, существенно больше проводимости вмещающей среды [83].

П Р И Л О Ж Е Н И Я

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Справочные данные

Таблица III. Фундаментальные физические постоянные [9, 71, 85]

Величина	Обозначение	Значение ^{1, 2}
Газовая (универсальная) постоянная	R	8,314510(70) Дж·К ⁻¹ ·моль ⁻¹
Масса покоя электрона	m_e	9,1093897(54)·10⁻³¹ кг
Постоянная Планка	h	6,6260755(40)·10⁻³⁴ Дж·с
Постоянная Планка универсальная	\hbar	1,0546·10 ⁻³⁴ Дж·с
Постоянная фон Клитцинга (квантовое сопротивление Холла)	R_k	2,58128070·10 ⁴ Ом
Скорость света в вакууме	c_0	2,99792458·10 ⁸ м·с ⁻¹
Температура, соответствующая 1 эВ	T	11606 К
Удельный заряд электрона	$\frac{e}{m}$	1,76·10 ¹¹ Кл·кг ⁻¹
Число (постоянная) Фарадея	F	9,6485309(29)·10⁴ Кл·моль ⁻¹
Электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума)	ϵ_0	8,854187816·10⁻¹² Ф·м ⁻¹

¹ В скобках в последних значащих цифрах указано стандартное отклонение.

² Значения, выделенные жирным шрифтом, рекомендованы группой КОДАТА по фундаментальным константам в 1986 г. [85].

Таблица П1 (окончание)

Величина	Обозначение	Значение ^{1,2}
Электронвольт	эВ	$1,60218 \cdot 10^{-19}$ Дж
Элементарный заряд (заряд электрона)	e	$1,60217733(49) \cdot 10^{-19}$ Кл

Интернет-ресурсы

-  <http://physics.nist.gov/cuu/Constants>
-  <http://scienceworld.wolfram.com/physics>
-  <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

Таблица П2. Основные формулы электричества в системе единиц СИ и гауссовой системе единиц

Наименование	Система СИ	Гауссова система
Закон Кулона в диэлектрике	$F = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$	$F = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$
Напряжённость электрического поля	$E \equiv \frac{F}{q}$	
Напряжённость поля точечного заряда в диэлектрике	$E = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon} \cdot \frac{q}{r^2}$	$E = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{q}{r^2}$
Напряжённость поля вблизи поверхности проводника в диэлектрике	$E = \frac{1}{\epsilon \cdot \epsilon_0} \cdot \sigma$	$E = \frac{1}{\epsilon} \cdot 4\pi \cdot \sigma$
Поток напряжённости электрического поля через поверхность	$\Phi_E \equiv \sum E_n \cdot \Delta S$	

¹ В скобках в последних значащих цифрах указано стандартное отклонение.² Значения, выделенные жирным шрифтом, рекомендованы группой КОДАТА по фундаментальным константам в 1986 г. [85].

Таблица П2 (окончание)

Наименование	Система СИ	Гауссова система
Теорема Гаусса	$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot q$	$\Phi_E = 4\pi \cdot q$
Потенциал электрического поля	$\varphi \equiv \frac{A}{q}$	
Потенциал поля точечного заряда в диэлектрике	$\varphi = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon} \cdot \frac{q}{r}$	$\varphi = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{q}{r}$
Связь между напряжённостью и потенциалом электрического поля	$E_l = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}$	
Ёмкость	$C \equiv \frac{q}{U}$	
Ёмкость плоского конденсатора с диэлектриком	$C = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{S}{d}$	$C = \frac{1}{4\pi} \cdot \epsilon \cdot \frac{S}{d}$
Энергия системы зарядов	$E_{\Pi} = \frac{1}{2} \sum_i q_i \varphi_i$	
Энергия конденсатора	$E_{\Pi} = \frac{1}{2} C \cdot U^2$	
Плотность энергии электрического поля	$w_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot E^2$	$w_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot E^2$
Сила тока	$I \equiv \frac{dq}{dt}$	
Закон Ома	$I = \frac{U}{R}$	
Закон Джоуля–Ленца	$Q = I^2 \cdot R \cdot t$	

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Словарь терминов, используемых в электричестве и электротехнике¹

- **Автоионизация (Ионизация полевая) {Autoionization}**. Процесс ионизации атомов в сильных электрических полях.
- **Аккумулятор кислотный {Acidic accumulator}**. Электрический аккумулятор с кислотным электролитом.
- **Аккумулятор щелочной {Alkaline accumulator}**. Электрический аккумулятор с щелочным электролитом.
- **Аккумулятор электрический {Accumulator}**. Устройство (обычно в виде гальванического элемента) для накопления электрической энергии.
- **Активность ионов {Ions activity}**. Величина, характеризующая свойства ионов в растворе. Значения активности ионов и коэффициентов активности ионов очень важны для расчётов химических равновесий в природных водах: карбонатного, сульфидного, фосфатного и др. Активность ионов выражает ту реальную (активную) концентрацию ионов в растворе, которая создаётся при суммарном влиянии неполной диссоциации моле-

¹ Разные толкования отделяются арабскими цифрами, близкие по смыслу варианты — точкой с запятой, синонимичные варианты — запятой. Переводы на английский/американский язык даны в фигурных скобках. Для экономии места взаимозаменяемые части синонимичных вариантов перевода могут быть заключены в круглые скобки. Факультативная часть термина может быть в тех же целях заключена в квадратные скобки. В словаре частично использованы материалы из: Брюханов А. В., Пустовалов Г. Е., Рыдник В. И. Толковый физический словарь. Основные термины. — М.: Рус. яз., 1988.

кул, взаимного притяжения разнозаряженных ионов, гидратации и других эффектов. Активность ионов электролита при бесконечном разбавлении равна его концентрации.

- **Ампéр {Ampere}**. Единица силы электрического тока в СИ.
- **Ампермéтр {Ammeter}**. Прибор для измерения силы электрического тока; в электрическую цепь включается последовательно с нагрузкой. Шкала амперметра градуируется в мкА, mA, A или кА. В магнитоэлектрическом амперметре магнитное поле, определяемое формой и размерами рамки и протекающим по ней током (который подлежит измерению), взаимодействуя с полем магнита, создаёт вращающий момент; последнему противодействует момент пружины, зависящий от её механических свойств, и рамка поворачивается на угол, при котором оба момента уравновешиваются.
- **Анио́н {Anion}**. Отрицательно заряженный ион (в растворе или расплаве).
- **Ано́д {Anode}**. 1. Электрод, соединённый с положительным полюсом источника постоянного тока. 2. Положительный полюс гальванического элемента или батареи. 3. Положительный полюс электролитической ванны. 4. Положительный электрод электрической дуги. 5. Положительный электрод электровакуумной лампы.
- **Анти сегнетоэ́лектрик {Antiferroelectric}**. Диэлектрический кристалл, который, не являясь сегнетоэлектриком, обладает фазовым переходом с заметной аномалией температурной зависимости диэлектрической проницаемости и гистерезисом в сильных электрических полях.
- **Атмосфе́рики {Sferics, Atmospheric radio noise}**. Электрические импульсы, создаваемые радиоволнами, которые излучаются при разрядах молний.
- **Ба́рьер потенциа́льный {Potential barrier}**. Пространственно ограниченная область высокой потенциальной энергии частицы в силовом поле, по обе стороны которой потенциальная энергия более или менее резко спадает.
- **Ба́тарéя аккумуля́торная {Storage battery}**. Несколько отдельных, последовательно соединённых электрических аккумуляторов, объединённых в едином корпусе. Термин ввёл Б. Франклин.
- **Ба́тарéя конденса́торная {Capacitor bank}**. Батарея, составленная из электрических конденсаторов, соединённых последовательно или параллельно.

- **Батарéя со́лнечная** {**Solar battery**}. Несколько отдельных последовательно соединённых фотоэлектрических генераторов, объединённых в одном корпусе.
- **Батарéя электрическая** {**Battery**}. Батарея, состоящая из источников электрического тока, соединённых последовательно или параллельно.
- **Био** {**Biot**}. Основная единица силы электрического тока в системе единиц СГСБ, размер которой устанавливается на основании закона Ампера при условии, что магнитная проницаемость является безразмерной величиной, равной 1 в случае вакуума.
- **Ватт** {**Watt**}. Единица мощности в СИ.
- **Ваттмётр** {**Wattmeter**}. Прибор для измерения активной мощности в электрических цепях.
- **Весы крутильные** {**Torsion balance**}. Прибор для измерения сил по углу закручивания упругой нити или спиральной пружины, пропорциональному моменту этих сил.
- **Вéтер электрический** {**Electric wind**}. Истечение электрических зарядов с заострённых предметов при высокой напряжённости электрического поля.
- **Вольт** {**Volt**}. Единица электрического напряжения в СИ.
- **Вольтмётр** {**Voltmeter**}. Прибор для измерения электрического напряжения.
- **Восприимчивость диэлектрическая** {**Dielectric susceptibility**}. Характеристика диэлектрика, показывающая его способность поляризоваться в электрическом поле.
- **Газ электрoнный** {**Electron gas**}. Совокупность квазисвободных электронов в металле.
- **Гальванóметр** {**Galvanometer**}. Прибор для измерения очень малых величин электрического напряжения, силы тока и количества электричества.
- **Гальваноплáстика** {**Galvanoplastics**}. Способ получения металлических копий с помощью электролиза.
- **Гальваностéгия** {**Galvanostegy**}. Способ покрытия предметов слоем металла при помощи электролиза.
- **Гальванотéхника** {**Galvanotechnics**}. Техника осаждения металлов на поверхности металлических и неметаллических изделий при помощи электролиза.

- **Генерáтор кварцевый {Crystal oscillator}**. Источник электрических колебаний высокой частоты, в котором используется пьезоэлектрический эффект.
- **Генерáтор ламповый {Valve (Vacuum-tube) oscillator}**. Источник электромагнитных волн, в котором используется электронная лампа.
- **Генерáтор электростатический {Van de Graaf (Electrostatic [belt]) generator}**. Устройство для создания высокого постоянного электрического напряжения с помощью механического переноса электрических зарядов.
- **Гистерéзис {Hysteresis}**. Неоднозначная зависимость физической величины, характеризующей состояние тела, от физической величины, характеризующей внешние условия.
- **Гистерéзис диэлектрический {Dielectric hysteresis}**. Неоднозначная зависимость диэлектрической поляризации сегнетоэлектрика от напряжённости внешнего электрического поля.
- **Грамм-эквивалéнт {Gram-equivalent}**. Число граммов химического элемента, равное весу химического эквивалента. В реакциях замещения равен частному от деления атомного веса элемента на его валентность, или молекулярного веса соли на основность кислоты или кислотность основания. В окислительно-восстановительных реакциях грамм-эквивалент находят делением атомного веса элемента или молекулярного веса окислителя или восстановителя на число переходящих электронов.
- **Дебáй {Debye}**. внесистемная единица электрического дипольного момента.
- **Деионизáция {Deionization}**. Исчезновение свободных носителей заряда из объёма, занимаемого веществом.
- **Деполяризáция гальванического элемéнта {Electrical depolarization}**. Поддержание электрического напряжения на зажимах химического источника электрического тока при его работе путём включения в состав элемента различных химических веществ.
- **Джóуль {Joule}**. Единица работы и энергии в СИ.
- **Диód {Diode}**. Электронный вакуумный или полупроводниковый прибор, пропускающий электрический ток только одного направления и имеющий два контакта для включения в электрическую цепь.
- **Дипóль электрический {Electric dipole}**. Система двух разноимённых по модулю точечных зарядов, расстояние между которыми значительно меньше расстояния до рассматриваемых точек поля.

- **Диспéрсия пространственная {Spatial dispersion}**. Зависимость тензора диэлектрической проницаемости среды от волнового вектора, приводящая, например, к вращению плоскости поляризации.
- **Диссоциация электролитическая {Electrolytic dissociation}**. Полный или частичный распад на ионы молекул кислот, щелочей и солей при их растворении.
- **Диффузия амбиполярная {Ambipolar diffusion}**. Совместная диффузия в одном направлении противоположно заряженных частиц, происходящая в плазме или в электролите.
- **Диэлектрик {Dielectric}**. Вещество, плохо проводящее электрический ток.
- **Домены сегнетоэлектрические {Ferroelectric domains}**. Области однородной самопроизвольной электрической поляризации в сегнетоэлектриках.
- **Дрейф заряженных частиц {Drift[ing] of charged particles}**. Относительно медленное направленное перемещение заряженных частиц, налагающееся на их хаотическое движение.
- **Дуга электрическая {[Electric] arc}**. Вид самостоятельного разряда в газе, в котором разряд сосредоточен в узком ярко светящемся плазменном шнуре.
- **Ёмкость электрическая {Capacitance}**. Характеристика способности проводника накапливать электрический заряд, равная отношению величины заряда на проводнике к потенциалу проводника.
- **Ёмкость электрическая взаимная {Mutual capacitance}**. Характеристика двух проводников, определяемая отношением величины заряда, перенесённого с одного проводника на другой, к изменению разности потенциалов между проводниками, вызванному этим переносом.
- **Закон Джбуля—Лёнца {Joule—Lenz's law}**. Количество теплоты, выделяемое в проводнике при прохождении постоянного электрического тока, прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока через проводник.
- **Закон Кулона {Coulomb's law}**. Закон, определяющий силу взаимодействия между двумя точечными электрическими зарядами, находящимися в вакууме.
- **Закон Ома {Ohm's law}**. Закон, устанавливающий связь между силой электрического тока в проводнике и напряжением между двумя фиксированными точками (сечениями) этого проводника.

- **Закон сохранения электрического заряда** {**Charge conservation law**}. Алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы остаётся неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри данной системы.
- **Заряд пространственный (объёмный)** {**Space charge**}. Электрический заряд, рассредоточенный в некотором объёме.
- **Заряд точечный** {**Point charge**}. Заряд, сосредоточенный на теле, линейные размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми он взаимодействует. Понятие точечного заряда является физической абстракцией.
- **Заряд электрический** {**Electric charge**}. 1. Источник электрического поля, связанный с материальным носителем. 2. Величина, характеризующая способность тел и частиц к электромагнитным взаимодействиям. Термин ввёл Б. Франклин.
- **Заряд электрический индуцированный** {**Induced electric charge**}. Электрический заряд, возникающий в части нейтрального проводника в результате разделения имеющихся в нём положительных и отрицательных электрических зарядов.
- **Заряд электрический элементарный** {**Elementary charge**}. Минимальный электрический заряд, которому кратны все электрические заряды тел.
- **Заряд электрона удельный** {**Specific electron charge**}. Отношение электрического заряда электрона к его массе.
- **Зарядка аккумулятора электрического** {**Charging of accumulator**}. Зарядка путём пропускания через аккумулятор электрического тока в направлении, обратном рабочему току.
- **Зонд электрический** {**Electric probe**}. Электрод, вводимый в среду для определения характеристик электрического поля, заряда и тока в различных точках пространства.
- **Импульс электрический** {**Electrical pulse**}. Кратковременные изменения электрического напряжения или силы тока в виде скачка, либо в виде некоторого числа колебаний, следующих друг за другом.
- **Индукция электрическая** {**Electric induction**}. Векторная величина, используемая для описания электрического поля в присутствии диэлектриков; характеризуется тем, что её поток через замкнутую поверхность определяется только свободными зарядами, находящимися внутри этой поверхности.

- **Индукция электростатическая** {**Electrostatic induction**}. Наведение электрических зарядов в проводнике или диэлектрике, помещённых в постоянное электрическое поле.
- **Инжекция носителей заряда** {**Carrier injection**}. Проникновение избыточных носителей заряда в полупроводник или диэлектрик под действием электрического поля.
- **Ион** {**Ion**}. Заряженная частица, образовавшаяся из атома или группы атомов в результате присоединения или утраты одного или нескольких электронов. Термин, происходящий от греческого слова "путешественник", впервые по предложению У. Уивелла ввёл М. Фарадей.
- **Ионизация** {**Ionization**}. Образование ионов из нейтральных атомов или молекул. Происходит в растворах под влиянием химических процессов между растворённым веществом и растворителем. Ионизация газов происходит под влиянием некоторых физических причин.
- **Ионизация диссоциативная** {**Dissociative ionization**}. Ионизация при распаде молекул в результате диссоциации.
- **Ионизация поверхностная** {**Surface ionization**}. Термическая десорбция положительных или отрицательных ионов с поверхности твёрдых тел.
- **Ионизация термическая** {**Thermal ionization**}. Ионизация за счёт кинетической энергии сталкивающихся частиц при высоких температурах.
- **Ионизация ударная** {**Collision ionization**}. Ионизация при столкновении атома или молекулы с другой частицей.
- **Искра электрическая** {**Electric spark**}. Электрический разряд, при котором после пробоя напряжение на разрядном промежутке очень быстро падает ниже величины погасания разряда.
- **Источник тока** {**Current source**}. Устройство, преобразующее различные виды энергии в электрическую энергию.
- **Канал** {**Channel**}. Электрическая цепь, служащая для передачи и обнаружения определённой группы сигналов среди всех возможных.
- **Каналирование заряженных частиц** {**Channeling of charged particles**}. Движение заряженных частиц вдоль "каналов", образованных пересечением атомных плоскостей в кристалле.
- **Катион** {**Cation**}. Ион, заряженный положительно.
- **Катод** {**Cathode**}. 1. Отрицательный электрод, служащий источником электронов. 2. Электрод, соединённый с отрицательным полюсом источ-

ника постоянного тока. 3. Отрицательный полюс гальванического элемента или батареи.

- **Квазинейтральность плазмы** {**Quasi-neutrality of plasma**}. Практическое равенство плотностей положительных ионов и электронов в составе плазмы.
- **Кенотрон** {**Kenotron**}. Вакуумная двухэлектродная лампа, служащая для выпрямления переменного тока.
- **Класс энергопотребления** {**Energy consumption class**}. В зависимости от количества потребляемой энергии электроприборам присваиваются классы. Классы распределяются от А до G. При этом класс А является наиболее экономичным в энергопотреблении. Класс А был расширен классом А+ и классом А++, так как благодаря новым технологиям многие электроприборы стали ещё более экономичными. Так класс энергопотребления А+ — это на 30% больше экономии энергии по сравнению с классом В и на 50% больше по сравнению с классом С.
- **Коллэктор** {**Collector**}. В электровакуумных приборах — электрод, служащий для собирания зарядов, приносимых электронным или ионным пучком.
- **Конденсатор [электрический]** {**Capacitor**}. Устройство, которое применяется в качестве сосредоточенной электрической ёмкости. Термин ввёл Б. Франклин.
- **Контакт электрический** {**Electric contact**}. Поверхность соприкосновения составных частей электрической цепи, обладающая электропроводностью, или приспособление, обеспечивающее такое соприкосновение.
- **Контур электрический** {**Loop**}. Любой замкнутый путь, проходящий по ветвям электрической цепи.
- **Кратность ионизации** {**Degree of ionization**}. Абсолютное значение отношения электрического заряда иона к заряду электрона.
- **Кулон** {**Coulomb**}. Единица количества электричества или электрического заряда в СИ.
- **Лавина электронная** {**Electron avalanche**}. Быстрое самопроизвольное возрастание числа электронов, участвующих в электрическом разряде.
- **Лампа волны бегущей (ЛБВ)** {**Traveling wave valve (Traveling wave tube, TWT)**}. Электровакуумный прибор для усиления и генерации электромагнитных колебаний сверхвысокой частоты, действие которого ос-

новано на взаимодействии потока электронов с бегущей электромагнитной волной.

- **Лáмпа волны обратнóй (ЛЮВ) {Backward wave valve (Backward wave tube, BWT)}**. Разновидность лампы бегущей волны, в которой групповая скорость электромагнитной волны направлена в сторону, противоположную её фазовой скорости и скорости потока электронов.
- **Лáмпа кварцевая {Quartz lamp}**. Газоразрядный источник света с парами ртути и кварцевыми стенками колбы, спектр которого содержит ультрафиолетовое излучение.
- **Лáмпа люминесцэнтная {Luminescent lamp}**. Источник света, испускающий излучение, спектральный состав которого обусловлен свечением люминофора под воздействием света, испускаемого при электрическом газовом разряде.
- **Лáмпа нака́ливания {Incandescent lamp}**. Источник света, у которого свет излучает тугоплавкий проводник, заключённый в стеклянную колбу.
- **Лáмпа электрóнная {Vacuum valve, Vacuum tube}**. Прибор, в котором поток электронов, движущийся в высоком вакууме, управляется электрическим полем, создаваемым специальными электродами.
- **Линза электростатическая {Electrostatic lens}**. Устройство для фокусировки пучков заряженных частиц с помощью электростатического поля.
- **Линии индúкции пóля электрического {Lines of electric flux}**. Кривые, касательная к которым в каждой точке совпадает с направлением вектора индукции электрического поля.
- **Линии напряжённости пóля электростатического (Линии силовые пóля электростатического) {Lines of electric forces}**. Линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора электростатической напряжённости. Линиям напряжённости приписывается направление, совпадающее с направлением вектора напряжённости.
- **Лучи канáловые (анóдные) {Anode rays, Canal rays}**. Пучок свободно движущихся положительных ионов.
- **Лучи катóдные {Cathode rays}**. Пучок электронов, движущихся от катода при тлеющем разряде в вакуумной трубке.
- **Мóлния {Lightning}**. Чрезвычайно сильный электрический разряд между облаками или между облаком и землёй.

- **Мóблния линейная** {**Streak lightning**}. Гигантский электрический искровой разряд в атмосфере.
- **Мóблния шарováя** {**Ball lightning; Fireball**}. Светящийся сфероид, обладающий большой удельной энергией и образующийся нередко вслед за ударом линейной молнии.
- **Момéнт дипóльный моле́кулы** {**Electric dipole moment of molecule**}. Характеризует электрические свойства молекулы — $\boldsymbol{\mu} \equiv \sum q_i \mathbf{r}_i$, где q_i — заряды составляющих молекулу частиц, \mathbf{r}_i — их радиус-векторы относительно произвольно выбранного начала координат.
- **Момéнт дипóльный электрический** {**Electric dipole moment**}. Вектор, характеризующий электрический диполь, равный произведению заряда диполя на его плечо и направленный вдоль оси от отрицательного заряда к положительному.
- **Момéнт квадрупóльный электрический** {**Quadropole momentum**}. Мера отклонения распределения электрического заряда от сферически симметричного.
- **Мост измерительный** {**Electrical bridge**}. Электрический прибор для измерения сопротивлений, ёмкостей и индуктивностей и других электрических величин методом сравнения их с образцовой мерой.
- **Нагрéв омический** {**Ohmic heating**}. Нагревание проводника протекающим через него электрическим током.
- **Напряжéние ано́дное** {**Anode voltage, Plate voltage**}. Электрическое напряжение, приложенное между анодом и катодом электронной лампы.
- **Напряжение зажига́ния** {**Firing voltage**}. Электрическое напряжение, при котором несамостоятельный газовый разряд переходит в самостоятельный.
- **Напряжéние запира́ния ла́мпы** {**Cut-off voltage**}. Сеточное напряжение, при котором полностью прекращается анодный ток.
- **Напряжéние пробивно́е** {**Breakdown voltage**}. Разность потенциалов между обкладками конденсатора, при котором происходит пробой.
- **Напряжéние се́точное** {**Grid voltage, Grid potential**}. Электрическое напряжение, приложенное между сеткой и катодом электронной лампы.
- **Напряжéние электрическое** {**Voltage**}. Разность потенциалов двух точек, т. е. отношение работы по переносу электрического заряда из одной точки в другую к величине этого заряда.

- **Напряжённость поля электростатического {Electric intensity}**. Отношение силы, с которой электрическое поле действует на положительный электрический заряд, помещённый в данную точку поля, к величине этого заряда.
- **Носители заряда (Носители тока) {Charge carriers}**. Общее название подвижных частиц, несущих электрический заряд и способных обеспечивать прохождение электрического тока через вещество.
- **Обмотка {Winding}**. Система проводников в электрической машине, трансформаторе и т. д., по которой протекают токи, создающие магнитные поля. Термин ввёл Б. Франклин.
- **Ом {Ohm}**. Единица электрического сопротивления в СИ.
- **Омметр {Ohmmeter}**. Прибор для измерения активных электрических сопротивлений.
- **Падение потенциала катодное {Cathode voltage drop}**. Изменение электрического потенциала на длине катодного тёмного пространства.
- **Параэлектрик {Paraelectric}**. неполярная фаза сегнетоэлектрика, возникающая выше температуры фазового перехода.
- **Перезарядка ионов {Ion charge exchange}**. Взаимодействие положительно заряженных ионов с нейтральными атомами, молекулами или поверхностью твёрдого тела, при котором происходит обмен электронами между взаимодействующими частицами.
- **Перенапряжение {Overvoltage}**. Повышение электрического напряжения, представляющее опасность для изоляции электрической установки.
- **Перенапряжение электрохимическое {Electrochemical overvoltage}**. Разность значений электродных потенциалов при равновесии и при пропуске внешнего тока через электрод при условии неизменности состава приэлектродного слоя электролита.
- **Петля гистерезиса {Hysteresis characteristic; Hysteresis loop}**. Графическое изображение зависимости физической величины, характеризующей состояние тела, от физической величины, характеризующей внешние условия, при периодическом изменении последней, когда состояние тела неоднозначно зависит от внешних условий.
- **Пироэлектрик {Pyroelectric}**. Кристаллический диэлектрик, обладающий самопроизвольной поляризацией.
- **Пироэлектричество {Pyroelectricity}**. Возникновение электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов при их нагревании или охлаждении.

- **Пла́зма {Plasma}**. Частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности положительных и отрицательных электрических зарядов практически одинаковы.
- **Пла́зма газоразрядная {Gas-discharge plasma}**. Плазма, существующая в газовом разряде.
- **Пла́зма твёрдых тел {Solid-state plasma}**. Условный термин, обозначающий совокупность подвижных заряженных частиц в твёрдых проводниках, когда их свойства близки к свойствам газоразрядной плазмы.
- **Пло́тность заряда ли́нейная {Linear charge density}**. Заряд, приходящийся на единицу длины.
- **Пло́тность заряда объёмная {Volume charge density}**. Заряд, приходящийся на единицу объёма.
- **Пло́тность заряда по́верхностная {Electric charge surface density}**. Заряд, приходящийся на единицу поверхности.
- **Пло́тность то́ка {Current density}**. Величина, определяемая силой тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного направлению тока.
- **Пло́тность эне́ргии {Energy density}**. Отношение энергии, заключённой внутри некоторого объёма среды или поля, к величине этого объёма.
- **Пло́тность эне́ргии объёмная по́ля электростатического {Volume electrostatic field energy density}**. Энергия электростатического поля в единице объёма.
- **По́верхности эквипотенциальные {Equipotential surfaces}**. Поверхности, во всех точках которых потенциал имеет одно и то же значение.
- **По́верхность разрыва {Discontinuity surface; Surface of discontinuity}**. Поверхность в электропроводящей среде, на которой происходит скачок значений электромагнитных величин, характеризующих среду.
- **Подвижность носителей заряда {Carrier mobility}**. Отношение средней скорости направленного движения носителей зарядов, вызванного электрическим полем, к напряжённости этого поля.
- **По́ле вéкторное {Vector field}**. Физическое поле, описываемое функцией, которая в каждой точке пространства является вектором.
- **По́ле кристаллическое {Crystalline field}**. Электрическое поле, существующее внутри кристаллов.

- **По́ле потенциа́льное {Potential field}**. Поле, в котором работа, совершаемая действующими силами при перемещении тела из одного положения в другое, не зависит от того, по какой траектории это перемещение произошло, а зависит только от начального и конечного положения тела.
- **По́ле си́ловое {Field of force}**. Область пространства, в которой действуют силы на внесённые в неё тела.
- **По́ле элеќтрическое {Electric field}**. Физическое поле, созданное электрическими зарядами или переменным магнитным полем.
- **По́ле элеќтромагнитное {Electromagnetic field}**. Силовое поле, посредством которого осуществляются электромагнитные взаимодействия.
- **По́ле элеќтростатическое {Electrostatic field}**. Поле, которое создаётся неподвижными электрическими зарядами.
- **Полумета́лл {Semimetal}**. Твёрдое тело, характеризующееся кристаллической решёткой как у атомного кристалла и электронной проводимостью в 10^2 — 10^3 раз ниже, чем у металлического кристалла.
- **Полупроводник {Semiconductor}**. Вещество, характеризующееся значением электропроводности, промежуточным между металлами и диэлектриками и возрастающим при увеличении температуры.
- **Полупроводник вырожденный {Degenerated semiconductor}**. Полупроводник с большой концентрацией носителей тока.
- **Полупроводник компенсированный {Compensated semiconductor}**. Полупроводник, содержащий одновременно и доноры, и акцепторы.
- **Полупроводник примесный {Extrinsic semiconductor}**. Полупроводник с искусственно введёнными примесями.
- **Полупроводник со́бственный {Intrinsic semiconductor}**. Химически чистый полупроводник.
- **Полупроводник *n*-типа {Electron semiconductor}**. Полупроводник, обладающий электронной проводимостью.
- **Полупроводник *p*-типа {Hole semiconductor}**. Полупроводник, обладающий дырочной проводимостью.
- **По́люс исто́чника то́ка {Terminal}**. Проводник, с помощью которого источник электрического тока соединяется с электрической цепью.
- **Поляриза́ция диэ́лектриков {Dielectric polarization}**. 1. Процесс ориентации диполей или появления под действием электрического поля ори-

ентированных по полю диполей. 2. Характеристика электрического состояния диэлектрика, определяемая отношением суммарного дипольного электрического момента частиц, находящихся в некотором объёме вещества, к величине этого объёма.

- **Поляриза́ция диэ́лектриков ио́нная {Ionic dielectric polarization}**. Смещение подрешётки положительных ионов вдоль поля, а отрицательных — против поля, приводящее к возникновению дипольных моментов.
- **Поляриза́ция диэ́лектриков ориента́ционная дипо́льная {Orientation dipole dielectric polarization}**. Ориентация дипольных моментов полярных молекул по полю.
- **Поляриза́ция диэ́лектриков спонтáнная {Spontaneous polarization}**. Самопроизвольное возникновение сегнетоэлектрических доменов в сегнетоэлектриках.
- **Поляриза́ция диэ́лектриков электрóнная (деформа́ционная) {Electronic (deformation) dielectric polarization}**. Возникновение у атомов неполярных молекул индуцированного дипольного момента за счёт деформации электронных орбит.
- **Поляриза́ция концентра́ционная {Concentration polarization}**. Электродная поляризация, вызванная отклонением концентраций веществ вблизи поверхности электродов от их концентраций в объёме электролита.
- **Поляриза́ция электрóдная {Electrode polarization}**. Разность значений потенциалов погружённых в электролит электродов при равновесии и при пропускании через электролит внешнего электрического тока.
- **Поляризо́ванность диэ́лектрика {Dielectric polarization}**. Дипольный момент единицы объёма диэлектрика.
- **Поляризу́емость {Polarizability}**. Способность атомов, молекул и ионов приобретать электрический дипольный момент в электрическом поле.
- **Поляро́н {Polaron}**. Электрон, движущийся по кристаллу вместе с вызываемой им волной деформации кристаллической решётки.
- **Поря́док бли́зкий и да́льний {Short-range and long-range order}**. Упорядоченность в расположении структурных частиц вещества (атомов, молекул, ионов), в ориентации их магнитных и дипольных электрических моментов и т. п.
- **Постоя́нная электри́ческая (Постоя́нная диэлектри́ческая ва́куума) {Permittivity of vacuum; Dielectric constant; Dielectric permittivity}**.

Входящий в ряд формул электродинамики коэффициент пропорциональности, величина которого обусловлена выбором системы единиц.

- **Потенциál возбуждения {Excitation potential}**. Разность электрических потенциалов, ускоряющая электрон до энергии, при которой он может вызвать при столкновении с атомом или молекулой их переход в данное возбуждённое состояние.
- **Потенциál диффузиóнный {Ionization potential}**. Разность электрических потенциалов, возникающая в месте контакта двух растворов разного химического состава.
- **Потенциál зажигáния {Firing potential}**. Наименьшая разность электрических потенциалов между электродами в газе, необходимая для возникновения самостоятельного разряда.
- **Потенциál ионизáции {Ionization potential}**. Разность электрических потенциалов, ускоряющая электрон до энергии, равной работе ионизации.
- **Потенциál мембрáнный {Membrane potential}**. Разность электрических потенциалов между двумя электролитами, разделёнными проницаемой для ионов мембраной.
- **Потенциál электрический {Electric potential}**. Скалярная энергетическая характеристика электростатического поля; один из потенциалов электромагнитного поля.
- **Потенциál электрóдный {Electrode potential}**. Разность электрических потенциалов между электродом и находящимся с ним в контакте электролитом.
- **Потенциál электрохимический {Electrochemical potential}**. Аналог химического потенциала для систем, содержащих заряженные частицы.
- **Потенциóметр {Potentiometer}**. Прибор для определения электродвижущей силы и электрического напряжения компенсационным методом.
- **Потенциомéтрия {Potentiometry}**. Метод электрохимического исследования, основанный на определении зависимости между равновесным электродным потенциалом и термодинамической активностью компонентов, участвующих в электрохимической реакции.
- **Потéри диэлектрические {Dielectric losses}**. Часть энергии переменного электрического поля в диэлектрике, переходящая в теплоту.
- **Потéри ионизациóнные {Ionization losses}**. Потери энергии заряженными частицами при прохождении через вещество на ионизацию и возбуждение атомов вещества.

- **Пото́к вектора че́рез пове́рхность** {**Vector field flux**}. Интегральная характеристика векторного поля, равная сумме произведений площадей элементарных участков, на которые разбита поверхность, на нормальные составляющие вектора к этим участкам.
- **Пото́к смеще́ния** {**Displacement flux**}. Поток вектора электрической индукции через некоторую поверхность.
- **Прави́ла Ки́рхго́фа** {**Kirchhoff rules**}. Методы расчёта сложных электрических и магнитных цепей.
- **Преобразова́тель термоэлектро́нный** {**Thermionic converter**}. Устройство для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую на основе явления термоэлектронной эмиссии.
- **Принцип суперпози́ции по́лей электростатических** {**Electrostatic fields superposition principle**}. Напряжённость результирующего поля, создаваемого системой зарядов, равна геометрической сумме напряжённостей полей, создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности.
- **Пробой ва́куумный** {**Vacuum breakdown**}. Возникновение самостоятельного разряда при высокой разности потенциалов между электродами при таком вакууме, при котором средний свободный пробег электронов намного больше межэлектродного расстояния.
- **Пробой диэ́лектрика** {**Dielectric breakdown**}. Электрический разряд через слой диэлектрика в конденсаторе.
- **Пробой лавинный** {**Avalanche breakdown**}. Электрический разряд в газе, в котором возникающие при ионизации электроны сами производят дальнейшую ионизацию.
- **Пробой электрический** {**Electrical breakdon**}. Общее название процессов, приводящих к резкому возрастанию электрического тока в среде, исходно не электропроводной.
- **Проводимость ио́нная** {**Ionic conduction**}. Электропроводность, обусловленная движением ионов.
- **Проводимость суперио́нная** {**Superionic conductivity**}. Очень высокая электропроводность, сравнимая с электропроводностью жидких электролитов, имеющая место в ионных кристаллах с такой разупорядоченной структурой, в которой ионы какого-либо сорта могут занимать несколько разных положений в элементарной ячейке и легко мигрировать между ними и по всей решётке.

- **Проводимость электрическая (Электропроводность) {Electrical conduction}**. Способность тела пропускать электрический ток под действием электрического поля.
- **Проводимость электри́нная {Conductivity}**. Электропроводность, обусловленная движением электронов.
- **Проводник {Conductor}**. Материал, способный пропускать электрический ток. Термин ввёл Б. Франклин.
- **Проводник второ́го ро́да {Ion conductor}**. Проводник, в котором прохождение электрического тока сопровождается химическими процессами, а сам ток обусловлен движением положительных и отрицательных ионов.
- **Проводник пе́рвого ро́да {Electron conductor}**. Проводник, в котором прохождение электрического тока не сопровождается химическими процессами, а ток обусловлен движением электронов.
- **Проводник суперио́нный {Superionic conductor}**. Проводник, обладающий суперионной проводимостью.
- **Проводник уединённый {Isolated conductor}**. Проводник, который удалён от других проводников, тел и зарядов.
- **Промежу́ток разрядный {Discharge gap}**. Межэлектродное пространство в газе, в котором происходит электрический разряд.
- **Проница́емость диэлектрическая {Dielectric constant}**. Безразмерная величина, характеризующая свойства диэлектриков, в статическом случае показывающая, во сколько раз увеличивается ёмкость конденсатора, между обкладками которого был вакуум, если пространство между обкладками целиком заполнить однородным диэлектриком.
- **Проница́емость ла́мпы электри́нной {Reciprocal of amplification factor}**. Величина, обратная коэффициенту усиления.
- **Простра́нство те́мное като́дное {Dark cathode space}**. Тёмное пространство вблизи катода при тлеющем разряде, наблюдаемое при низких давлениях газа.
- **Простра́нство фа́радеёво {Faraday dark space}**. Тёмное пространство, образующееся вслед за тлеющим свечением при тлеющем разряде в условиях низкого давления газа.
- **Прóчность электри́ческая {Electric strength}**. Значение напряжённости однородного электрического поля, свыше которого происходит пробой вещества.

- **Пьезопреобразователь** {**Piezoelectric transducer**}. Устройство, преобразующее механические колебания в электрические благодаря пьезоэлектрическому эффекту.
- **Пьезоэлектрик** {**Piezoelectric**}. Вещество, обнаруживающее явление пьезоэлектричества.
- **Пьезоэлектричество** {**Piezoelectricity**}. Возникновение поляризации диэлектрика под действием механических напряжений.
- **Пятно катодное** {**Cathode spot**}. Светящееся пятно на поверхности катода, возникающее при переходе тлеющего разряда в дуговой разряд.
- **Работа выхода** {**Work function**}. Энергия, затрачиваемая на удаление электрона из твёрдого тела или из жидкости в вакуум.
- **Работа ионизации** {**Work of ionization**}. Энергия, затрачиваемая на удаление электрона из атома или молекулы на расстояние, где взаимодействием его с положительно заряженным атомом или молекулой можно пренебречь.
- **Равновесие ионизационное** {**Ionization equilibrium**}. Равновесное состояние газа при высоких температурах, когда столкновения частиц газа сопровождаются их ионизацией.
- **Радиус экранирования дебаевский** {**Debye shielding distance**}. Расстояние, на которое распространяется в плазме или в электролите действие электрического поля отдельного электрического заряда.
- **Разность потенциалов** {**Potential difference**}. Отношение работы, совершаемой силами потенциального силового поля, действующими на источник поля, при перемещении этого источника между двумя точками поля, к величине, характеризующей источник.
- **Разность потенциалов контактная** {**Contact potential difference**}. Разность электрических потенциалов, возникающих между контактирующими разнородными проводниками в условиях термодинамического равновесия.
- **Разряд высокочастотный** {**High-frequency discharge**}. Электрический разряд в газе под действием высокочастотного электрического поля.
- **Разряд газовый** {**Gas discharge**}. Процесс прохождения электрического тока через газ.
- **Разряд [газовый] самостоятельный** {**Self-maintained gas discharge**}. Разряд в газе, сохраняющийся после прекращения действия внешнего ионизатора.

- **Разряд дуговой** {**Arc discharge**}. Самостоятельный газовый разряд с большой плотностью тока, при котором основную роль в ионизации играют электроны, возникшие вследствие термоэлектронной эмиссии с разогретого самим разрядом катода, а газ находится в состоянии плазмы.
- **Разряд искровой** {**Spark discharge**}. Неустановившийся газовый разряд, быстро прекращающийся после электрического пробоя разрядного промежутка вследствие уменьшения напряжения, вызванного самим разрядом, и возникающий повторно после нового достижения напряжения пробоя.
- **Разряд кистевой** {**Spray discharge**}. Разновидность коронного разряда, сопровождающегося появлением искр вблизи острия.
- **Разряд коронный (Корона электрическая)** {**Corona discharge**}. Высоковольтный самостоятельный газовый разряд, возникающий в резко неоднородном электрическом поле вблизи электродов с большой кривизной поверхности (остриё, проволока).
- **Разряд лавинный** {**Avalanche discharge**}. Электрический разряд в газе, в котором возникающие при ионизации электроны сами производят дальнейшую ионизацию.
- **Разряд несамостоятельный** {**Non-self-maintained discharge**}. Газовый разряд, существующий при ионизации газа внешним ионизатором.
- **Разряд самостягивающийся** {**Pinching discharge**}. Газовый разряд, в котором сечение токового канала уменьшается под действием порождаемого им самим магнитного поля.
- **Разряд тёмный** {**Dark discharge**}. Самостоятельный газовый разряд при низких давлениях и очень малых токах.
- **Разряд тлеющий** {**Glow discharge**}. Самостоятельный газовый разряд при низкой температуре катода, сравнительно малой плотности тока и пониженном по сравнению с атмосферным давлении газа.
- **Разряд электрический** {**Electric discharge**}. Прохождение электрического тока через вещество, сопровождающееся изменением состояния вещества. Термин ввёл Б. Франклин.
- **Разрядник** {**Discharger**}. Газоразрядный прибор для замыкания и размыкания электрической цепи.
- **Распыление катодное** {**Cathode sputtering**}. Разрушение твёрдых тел при бомбардировке их поверхности атомами, ионами и нейтронами.

- **Резистор {Resistor}**. Электротехническое устройство, обеспечивающее заданное активное сопротивление электрической цепи.
- **Рекомбинация {Recombination}**. Исчезновение носителей заряда в результате столкновений носителей заряда противоположного знака.
- **Рекомбинация ион-электронная {Ion-electron recombination}**. Элементарный акт воссоединения положительного иона со свободным электроном с образованием нейтрального атома или молекулы.
- **Реостат {Rheostat}**. Устройство для регулирования тока и напряжения в электрической цепи путём изменения его сопротивления.
- **Самосжатие разряда {Self-compression of discharge}**. Уменьшение поперечных размеров канала электрического разряда в газе, наблюдаемое при больших плотностях тока разряда.
- **Сверхрешётка {Superlattice}**. Многослойная твердотельная структура, в которой на электроны помимо периодического потенциала кристаллической решётки действует дополнительный искусственно создаваемый потенциал с периодом, намного превышающим постоянную решётки.
- **Свечение анодное {Anode glow}**. Светящаяся область в анодной области газоразрядной трубки при тлеющем разряде.
- **Свечение отрицательное {Negative glow}**. Светящаяся область вблизи катода газоразрядной трубки при тлеющем разряде.
- **Сегнетоэластик {Ferroelastic}**. Монокристаллический сегнетоэлектрик, в котором различные сегнетоэлектрические домены имеют разную самопроизвольную деформацию кристаллической решётки.
- **Сегнетоэлектрики {Ferroelectrics}**. Диэлектрики, обладающие в определённом интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризованностью в отсутствие внешнего электрического поля.
- **Сила термоэлектродвижущая {Thermo-electromotive force}**. Электродвижущая сила, возникающая в электрической цепи, составленной из разнородных проводников, контакты между которыми имеют различную температуру.
- **Сила тока электрического {Strength of current}**. Физическая величина, характеризующая электрический ток и равная отношению абсолютного значения электрического заряда, который проходит за малый интервал времени через рассматриваемую поверхность (например, поперечное сечение электрической цепи), к этому интервалу времени (единица в СИ — ампер, А).

- **Сила электродвижущая (ЭДС) {Electromotive force, e.m.f.}**. Физическая величина, определяемая работой, совершаемой сторонними силами при перемещении положительного единичного заряда.
- **Силы сторóнные {Extraneous forces}**. Силы, действующие на носители заряда в проводниках и имеющие неэлектрическую природу.
- **Сименс {Siemens}**. Единица электропроводности в СИ.
- **Систéма единиц га́уссова (симметричная) {Gaussian system of units}**. Абсолютная система единиц электрических и магнитных величин с основными единицами сантиметр, грамм и секунда, в которой диэлектрическая и магнитная проницаемости являются безразмерными величинами, в случае вакуума равными 1.
- **Систéма единиц МКСА {mksa system}**. Система единиц Джорджи, в которой в качестве основной электродинамической единицы принят ампер.
- **Систéма единиц МКСAn {mksan system}**. Нерационализованная система единиц МКСА.
- **Систéма единиц МКСAr {mksar system}**. Рационализованная система единиц МКСА.
- **Систéма единиц рационали́зованная {Rationalized system}**. Система единиц, в которой установление уравнений, служащих для получения производных единиц, осуществляется на основе уравнений Максвелла, записанных так, что они не содержат коэффициентов вида 4π .
- **Систéма единиц СГСБ {cgsb system}**. Система единиц механических и электродинамических величин, в которой в качестве основных единиц приняты сантиметр, грамм, секунда и био.
- **Систéма единиц СГСМ (магнитная, электромагнитная) {cgs electromagnetic system}**. Абсолютная система единиц, в которой единицы электродинамических величин являются производными и определяются при помощи закона Кулона, причём магнитная проницаемость считается безразмерной величиной, в случае вакуума равной 1.
- **Систéма единиц СГСФ {cgsf system}**. Система единиц механических и электродинамических величин, в которой в качестве основных единиц приняты сантиметр, грамм, секунда и франклин.
- **Систéма единиц СГСЭ {cgs electric system}**. Абсолютная система единиц, в которой единицы электродинамических величин являются производными и определяются при помощи закона Кулона, причём диэлектри-

ческая проницаемость считается безразмерной величиной, в случае вакуума равной 1.

- **Система единиц СГС ϵ_0** {**cgs ϵ_0 system**}. Система единиц механических и электродинамических величин, в которой в качестве основных единиц приняты сантиметр, грамм, секунда и диэлектрическая проницаемость вакуума.
- **Система замкнутая электрическая** {**Closed electrical system**}. Система, не обменивающаяся зарядами с внешними телами.
- **Скачок потенциала межфазный** {**Interphase potential jump**}. Разность потенциалов на границе раздела фаз.
- **Слой электрический двойной** {**Electrical double layer**}. Совокупность электрических зарядов противоположных знаков, распределённых вдоль границы соприкосновения двух фаз.
- **Сопротивление электрическое** {**Electrical resistance**}. Величина, характеризующая противодействие, которое оказывает электрическая цепь движущимся в ней электрическим зарядам. Термин введён В. В. Петровым.
- **Ток постоянный** {**Direct current, d.c., DC**}. Ток, сила тока и направление которого не изменяются со временем.
- **Ток электрический** {**Electric current**}. Упорядоченное (направленное) движение [носителей] электрических зарядов.
- **Узел цепи электрической** {**Node of an electric circuit**}. Любая точка разветвления электрической цепи, в которой сходится не менее трёх проводников тока.
- **Участок цепи неоднородный** {**Non-homogeneous section of an electrical circuit**}. Участок цепи с источником тока, т. е. участок, на котором действуют сторонние силы.
- **Участок цепи однородный** {**Homogeneous section of an electrical circuit**}. Участок цепи без источников тока, т. е. участок, на котором не действуют сторонние силы.
- **Цепь электрическая** {**Electric circuit**}. Цепь, состоящая из различных устройств, потребляющих и создающих электрический ток, соединённых между собой при помощи электропроводки.
- **Электролиз** {**Electrolysis**}. Совокупность химических процессов, протекающих на электродах при прохождении электрического тока через растворы и расплавы электролитов.

- **Электролит кислотный {Acidic electrolyte}**. Электролит, состоящий из раствора серной кислоты в дистиллированной воде.
- **Электролит щелочной {Alkaline electrolyte}**. Электролит, состоящий из раствора едкого кали в дистиллированной воде.
- **Электролиты {Electrolytes}**. Проводники второго рода — растворы кислот, щелочей и солей, в которых происходит распад молекул на ионы; вещества, проводящие в растворённом или расплавленном состоянии электрический ток.
- **Электрометаллургия {Electrometallurgy}**. Отрасль техники, занимающаяся восстановлением металлов из их окислов и получением сплавов различного состава с использованием электрической энергии как источника теплоты.
- **Электроочистка {Electrical purification}**. Очистка газов с помощью электрофильтров.
- **Электрофорез {Electrophoresis}**. Движение взвешенных дисперсных частиц (например, коллоидных) в жидкой и газообразной среде под действием внешнего электрического поля.
- **Электрохимия {Electrochemistry}**. Отдел физической химии, занимающийся изучением электрических воздействий на физико-химические системы и явлений возникновения электрической энергии при химических процессах.
- **Элемент гальванический {Galvanic cell}**. Химический источник тока.
- **Энергия {Energy, Power}**. Универсальная мера различных форм движения и взаимодействия. Термин в научный обиход ввёл в 1852 г. У. Ранкин.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Краткая хронология истории электричества и электротехники

Дата	Событие	Автор(ы)
585 до н. э.	Описаны электрические свойства янтаря	Фалес Милетский
Первая половина I в.	Лечение подагры с помощью "освежающего" удара электрического угря	Скрибоний Ларг
1551	Разделение электрических и магнитных явлений. Заложены основы электростатики	Дж. Кардано
1600		У. Гильберт
1660-е	Создана электрическая машина	О. Герике
1675	Проводятся первые электрические опыты	И. Ньютон, Р. Бойль
1700	Исследуется электрическая искра	Уолл
1705		Ф. Хауксби
1716		И. Ньютон
1729	Открыто явление электропроводимости	С. Грей
1731—1732	Создана первая теория электрических явлений	Ш. Дюфе
1732	Первые научные сведения об электретном состоянии	С. Грей
1733—1734	Открыт закон взаимодействия электрических зарядов	Ш. Дюфе

(продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
1740-е	Создан первый электроизмерительный прибор	Г. В. Рихман (Россия)
1745	Создание первого электрического конденсатора (лейденская банка)	Э. Г. Клейст
		Кюнеус и П. Мушенбрук
Середина XVIII в.	Повышенный интерес к явлениям природного электричества. Множество опытов и исследований этой проблемы	Ж. Нолле, Б. Франклин и др.
1747	Изобретение электроскопа	Ж. Нолле
1747	Бенджамин Франклин в Америке и Уильям Ватсон (William Watson) в Англии независимо приходят к выводу, что все вещества обладают электрической "жидкостью", которая не может быть ни создана, ни уничтожена. Вскоре после этого оба сформулировали закон сохранения заряда	Б. Франклин, У. Ватсон
1750	Доказана общность атмосферного и искусственного электричества	Б. Франклин
1752—1753		М. В. Ломоносов и Г. В. Рихман (Россия)
1751	Первая публикация по электричеству в России	Г. В. Рихман (Россия)
1756	Открытие пирозлектричества	Ф. У. Т. Эпинус (Россия)
до 1753	Сформулирован основной закон электростатики — закон Кулона	Г. В. Рихман (Россия)
1759		Ф. У. Т. Эпинус (Россия)
1771—1773		Г. Кавендиш
1785		Ш. О. Кулон

(продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
VII в. до н. э.	Создан громоотвод	Нума Помпилий
VII в.		французские крестьяне
1754		П. Дивиш
1760		Б. Франклин
1678	Сокращение мышц при соединении их металлом с нервами или спинным мозгом лягушки, что позволило Л. Гальвани открыть существование электрического тока	Шваммердам
1756		М. Кальдани
1780		Л. Гальвани
1752	Сконструирован первый химический источник постоянного тока — "вольтов столб" (электрическая батарея)	И. Г. Зульцер
1799—1800		А. Вольта
1781	Изобретение чувствительного электроскопа с соломинками	А. Вольта
1783	Создание электрического конденсатора	А. Вольта
1784	Созданы крутильные весы	Ш. О. Кулон
1797—1798		Г. Кавендиш
1791	Опубликован "Трактат о силах электричества при мышечном движении"	Л. Гальвани
1800	Открытие теплового действия тока	
1800	Осуществлён электролиз воды	У. Николсон
1802—1807	Создан крупнейший для своего времени вольт-столб (электрическая батарея). Открыто явление электрической дуги	В. В. Петров (Россия)
1808—1810		Г. Дэви
1803	Опубликовано "Известие о гальвани-вольтовых опытах, которые производил профессор физики Василий Петров, посредством огромной наипаче батареи, состоявшей иногда из 4 200 медных и цинковых кружков. . .". Введён термин "сопротивление проводника"	В. В. Петров (Россия)

(продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
1800-е	Проводятся многочисленные попытки оживления с помощью электрического тока	Запотти
		Л. Гальвани
		Д. Ж. Ларрей
		Ж. Альдини
	Ур	
1805	Предложены гипотезы диссоциации	И. Д. Гротгус
XIX в.		Р. Ю. Э. Клаузиус
1914		Л. В. Писаржевский (Россия)
1819—1820	Открыто действие электрического тока на магнитную стрелку (магнитное действие тока)	Х. К. Эрстед
1820	Открытие механического взаимодействия токов	А.-М. Ампер
1820	Открыт закон, определяющий напряжённость магнитного поля прямого тока (закон Био—Савара)	Ж. Био и Ф. Савар
1821	Установлена зависимость сопротивления проводника от его длины, поперечного сечения и температуры	Г. Дэви
1821	Открыто термоэлектричество (эффект Зеебека)	Т. Зеебек
1820-е	Созданы первые гальванометры	
1824	Введён термин "пироэлектричество"	Д. Брюстер
1802	Открыт основной закон электрической цепи — закон Ома	В. В. Петров (Россия)
до 1825		Г. Кавендиш
1820-е		Г. Дэви
1825—1827		Г. С. Ом

(продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
1827	Введение терминов "электродвижущая сила", "падение напряжения", "проводимость"	Г. С. Ом
1857		Г. Р. Кирхгоф
1828	Опубликован "Опыт применения математического анализа к теориям электричества и магнетизма". Введено понятие "потенциала"	Дж. Грин
1828—1831	Сформулирована теорема Остроградского—Гаусса	М. В. Остроградский (Россия)
1828—1845		Дж. Грин
1830		К. Ф. Гаусс
1831	Построен первый электродвигатель	Дж. Генри
		С. даль Negro
09.10.1832	Первая публичная демонстрация электромагнитного телеграфа	П. Л. Шиллинг (Россия)
1832	Создана абсолютная система электрических и магнитных единиц	К. Гаусс, В. Вебер
1832	Предложен проект телеграфного аппарата	С. Морзе
1833	Создан первый телеграф в Германии	В. Вебер
1833	Построена простейшая телеграфная линия	К. Гаусс и В. Вебер
1833—1834	Установлены основные законы электролиза	М. Фарадей
1834	Введено понятие о силовых линиях (идея поля)	М. Фарадей
1834	Предложена оригинальная конструкция практически применимого электродвигателя	Б. С. Якоби (Россия)
1834—1840	"О силах, действующих обратно пропорционально квадрату расстояния" — основы теории потенциала	К. Гаусс
1835	Экспериментально доказано уменьшение сопротивления металлов при охлаждении	Э. Х. Ленц (Россия)

(продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
1836—1840	Создан медно-цинковый гальванический элемент	Дж. Ф. Даниель
		Б. С. Якоби (Россия)
04.09.1837	Демонстрация электромагнитного телеграфного аппарата	С. Морзе
1837	Обнаружено влияние диэлектриков на взаимодействие электрических зарядов	М. Фарадей
25.09.1838	На Неве состоялись испытания первой в мире лодки, движимой электричеством	Б. С. Якоби (Россия)
1838	Изобретена гальванотехника	Б. С. Якоби (Россия)
1839	Открыт фотогальванический эффект	А. Э. Беккерель
1841	Установлен закон теплового действия тока (закон Джоуля—Ленца)	Дж. П. Джоуль
1842		Э. Х. Ленц (Россия)
1842	Установлен колебательный характер разряда конденсатора	Дж. Генри
1842	Создан первый электромобиль	
1843	Осуществлена экспериментальная проверка закона сохранения электрического заряда	М. Фарадей
1844	Мостовой метод электрических измерений	Ч. Уитстон
1845	Открыты закономерности в распределении электрического тока в разветвлённой цепи	Г. Кирхгоф
1840—1850	Синхронно-синфазный телеграфный аппарат	Б. С. Якоби (Россия)
1847		Э. В. Сименс
1840-е	Развитие гальванопластики	Э. В. Сименс
12.01.1850	Первый опыт электрического освещения на улице — зажётся электрический фонарь на башне Адмиралтейства в Санкт-Петербурге	Россия

(продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
1853	Закон Видемана—Франца	Г. Г. Видеман и К. Франц
1854	Первая пригодная для практического применения лампа накаливания	Г. Гебель
1856	Определено отношение заряда конденсатора в электростатических и магнитных единицах	В. Э. Вебер, Ф. Кольрауш
1858	Создан телеграфный аппарат Уитстона	Ч. Уитстон
1859	Первый кислотный свинцовый аккумулятор	Г. Планте
1859	Измерение диэлектрической проницаемости многих веществ	Э. В. Сименс
1860	Построен электродвигатель постоянного тока с вращающимся кольцевым якорем (кольцевой электродвигатель) и изобретена динамомашинa	А. Починотти
1860	Ртутный эталон сопротивления	Э. В. Сименс
1860—1865	Создание теории электромагнитного поля	Дж. Максвелл
1863	Принцип обратимости электрических машин и идея возможности использования электрических генераторов постоянного тока для электролитического получения металлов (электролиза) и передачи электрической энергии	А. Починотти
1863	Первая линия метрополитена	Лондон, Великобритания
1864—1865	Вывод системы основных уравнений электромагнитных полей	Дж. Максвелл
1866	Вступили в эксплуатацию две трансатлантические кабельные линии между Англией и США	
30.11.1867	Принят в эксплуатацию Одесский маяк — первый электрический маяк в России	Россия
1869	Завершена постройка индоевропейского телеграфа между Лондоном и Калькуттой	Великобритания

(продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
1872	Изобретён электрический счётчик	У. Томсон
1872—1874	Изобретение угольной лампы накаливания	А. Н. Лодыгин (Россия)
1873	Применение электричества для освещения петербургских улиц	А. Н. Лодыгин (Россия)
1873	Открыт внутренний фотоэффект (фотопроводимость)	У. Смит
1874	Высказана мысль о дискретности электрического заряда и вычислена его величина (опубликовано в 1881 г.)	Дж. Стоней
1874	Установлено возрастание проводимости электролитов с ростом температуры	Ф. Кольрауш
29.01.1875	Первый опыт освещения магазина электрическими лампами Лодыгина	А. Н. Лодыгин (Россия)
23.03.1876	Получен патент на "электрическую свечу" — новый дуговой источник света без регулятора — первый практически пригодный источник электрического освещения (свеча Яблочкова). Осуществлена электропередача для освещения	П. Н. Яблочков (Россия)
1876	Изготовлен селеновый фотоэлемент	В. Адамс, Р. Дэй
25.03.1879	В Петербурге на Литейном мосту загорелись электрические фонари. Он стал первым российским мостом с электрическим освещением	Россия
1879	Изобретение лампы накаливания вакуумного типа с угольной нитью долговечной конструкции, удобной для промышленного изготовления	Т. -А. Эдисон
1879	Первая в мире опытная электрическая городская железная дорога — трамвай (на берлинской промышленной выставке)	Э. В. Сименс

(продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
1879	Открыто гальваномагнитное явление (эффект Холла)	Э. Холл
1880	Открытие пьезоэлектрического эффекта	П. Кюри и Ж. Кюри
1880	Введено понятие гистерезиса	Э. Варбург
15.09— 05.10.1881	На I Международном конгрессе электриков в Париже приняты основные международные единицы измерений (ампер, вольт, ом, джоуль и др.)	
1881	Идея об атомарном строении электричества	Г. Л. Ф. Гельмгольц
25.09.1882	Опытная передача электроэнергии на расстояние (линия Мисбах—Мюнхен протяжённостью 57 км)	М. Депре
1882	Первая электростанция для освещения улиц	Т. Эдисон
1882	Способ электрической сварки металлов — "электрогефест"	Н. Н. Бенардос
22.12.1882	Помощник Эдисона Эдвард Джонсон придумал ёлочную электрогирлянду	Э. Джонсон
1883	Создан первый фотоэлемент на основе селена, покрытого золотом	Ч. Фриттс
11.01.1884	Невский проспект от Адмиралтейства до Аничкова моста впервые освещён постоянными электрическими фонарями	Россия
1884	Открыто явление термоионной эмиссии (эффект Эдисона)	Т. Эдисон
1886	Открыты каналовые лучи	Э. Гольдштейн
11.10.1887	Запатентована электрическая машина для подсчёта голосов на выборах	Т. Эдисон

(продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
1888—1889	Связь между подвижностью ионов и коэффициента диффузии электролитов, теория электродвижущих сил гальванических элементов	В. Ф. Г. Нернст
1889	Закон Пашена	Ф. Пашен
1891	Для постулированной единицы электрического заряда предложено название "электрон"	Дж. Стоней
1892	Введён термин "электрет"	О. Хевисайд
1892	Созданы основы классической электронной теории	Х. Лоренц
1894	Открыто явление электрострикции	В. Ф. Г. Нернст
1894	Описаны необычные диэлектрические свойства сегнетовой соли	Поккельсон
1896	Предложена теория биоэлектрических потенциалов	В. Ю. Чаговец (Россия)
1901—1912		Бернштейн
1952		А. Л. Ходжкин
1897	Открыта автоэлектронная эмиссия	Р. У. Вуд
1897	Открыт электрон	Дж. Дж. Томсон и Э. Вихерт
1900	Теория электронного газа в металлах	П. Друде
1900	Созданы основы классической теории металлов	П. Друде и Дж. Дж. Томсон
1901	Установлена зависимость плотности тока термоэлектронной эмиссии от температуры поверхности металла	О. Ричардсон
1901	Создана теория несамостоятельного газового разряда	Дж. Таусенд

(продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
13.04.1902	Во дворе фабрики "Фрезе и К ^о " в Петербурге проведены испытания первого в России троллейбуса ("электрического автомобиля"), изготовленного фирмой "Фрезе" по проекту графа Шуленбурга. Масса машины составляла 819 кг. Доклад о ней вошёл в программу Второго всероссийского электротехнического съезда в том же году	П. А. Фрезе, С. И. Шуленбург (Россия)
1902	Установлено отклонение каналовых лучей в электрическом и магнитном полях	В. Вин
1903	Опубликована монография "О применении электричества к исследованию рудных залежей"	Е. И. Рагозин (Россия)
1903	Установлен закон для плотности тока насыщения термоэлектронной эмиссии в зависимости от температуры	О. Ричардсон
1903—1909	Созданы вольфрамовые лампы с нитевидными телами накала	
10.1904	Создан диод	Дж. Флеминг
1905	Фотоэффект объяснён на основе гипотезы квантов	А. Эйнштейн
27.06.1906	В Лондоне в соответствии с резолюцией Международного электротехнического конгресса (сентябрь 1904 г.) основана Международная электротехническая комиссия (МЭК)	
1906—1907	Изобретён триод	Л. Форест
29.09.1907	В Петербурге торжественно открыто регулярное трамвайное движение (по земле). Первый маршрут протянулся от Адмиралтейства до угла 8-й линии и Большого проспекта Васильевского острова. Его обслуживали десять купленных в Англии трамваев	Г. Графтио

(продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
1907	Гипотеза о существовании в ферромагнетиках внутреннего магнитного поля и областей намагниченности	П. Э. Вейс
1909—1913	Исследования электрических разрядов в газах и изучение термоэлектронной эмиссии	И. Ленгмюр
1909—1916	Определение заряда электрона	Р. Милликен
1910—1912	Методы электрического зондирования и профилирования постоянным током (методы сопротивлений)	К. Шлюмберже
1911	Открыто явление сверхпроводимости металлов	Х. Камерлинг-Оннес
20.03.1912	Дано разрешение на установку первой в Петербурге световой рекламы. Она была установлена на крыше дома № 23 по Невскому проспекту. <i>"Световой экран состоял из 1 760 ламп с металлической нитью по 10 свечей каждая"</i>	Россия
1912	Развита теория колебаний кристаллической решётки	Д. Дебай, М. Борн, Т. Карман
06.1913	Началось строительство первой в России электрифицированной пригородной скоростной железной дороги Петербург—Ораниенбаум (Ораниенбаумской электрифицированной линии — ОРАНЭЛ). В связи с началом войны дорога была проложена только до посёлка Стрельна, позже эта линия вошла в трамвайную сеть города	Россия
1913	Лампа накаливания со спиралевидной нитью накала и нейтральным газом	И. Ленгмюр
1913	Установлена формула для плотности эмиссионного тока (закон для термоионного тока)	И. Ленгмюр
1913	Использование триода для генерации	А. Мейсснер

(продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
1913	Первые электрические холодильники	
1913	Идея опыта для определения природы носителей заряда в металлах	Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси (Россия)
1916		Х. А. Лоренц
05.08.1914	В Кливленде установлены первые в мире электрические светофоры	США
1914—1916	Прецизионное измерение заряда электрона	Р. Э. Милликен
1915	Детальное исследование пирозлектриков	В. Аккерман
1915	Первая микроскопическая теория пирозлектричества	С. А. Богуславский (Россия)
1916	Эксперимент для определения природы носителей заряда в металлах	Т. Стюарт и Р. Толмен
1919	Мощные радиолампы с водяным охлаждением	М. А. Бонч-Бруевич (Россия)
1919	Начало изучения электретов	Ёгути
1920	Выведена формула, определяющая степень термической ионизации в газе	М. Саха
1920-е	Геофизические исследования скважин	бр. Шлюмберже
1920-е	Стали широко продаваться фены для сушки волос	
1921	Открытие сегнетоэлектрических свойств сегнетовой соли	Дж. Валашек
1924	Преодоление "катастрофы с теплоёмкостью", теория блуждающих электронов в металле	Я. И. Френкель
1924—1925	Съёмки естественного электрического поля и эквипотенциальных линий (в поле постоянного и переменного токов) на рудных месторождениях Алтая, Урала, Казахстана и в других районах	В. Р. Бурсиан и А. А. Петровский (СССР)

(продолжение)

Дата	Событие	Автор(ы)
1926	Построена теория вырожденного электронного газа	Э. Ферми
1926	Создан электрический тостер для хлеба	
1928	Разработана первая квантостатистическая теория электронного газа в металлах	А. Зоммерфельд
1928—1929	Электроразведочные работы методом вертикального электрического зондирования с целью поисков нефтяных месторождений в районе Баку и Грозного	Л. М. Альпин, В. Н. Дахнов, С. Г. Комаров, А. С. Семёнов (СССР)
1930—1934	Детальное исследование диэлектрических свойств сегнетовой соли	И. В. Курчатов, П. П. Кобеко (СССР)
1932	Доказана электронная природа электрического пробоя	А. Хиппель
1930-е	Открытие сейсмоэлектрического эффекта второго рода	А. Г. Иванов (СССР)
1937	Первые работы по получению и исследованию фотоэлектретов	Г. С. Наджаков (СССР)
1939	Разработка микроэлектронной техники	А. Л. Ходжкин, А. Ф. Хпксли
1939	Изготовлен первый электронный компьютер	Дж. Атанасов
1940-е	Открыты сегнетоэлектрические свойства дигидрофосфата калия	Г. Буш и П. Шерер
		К. Кол, Дж. Кертис
1943	Разработан электроискровой способ обработки металлов	Б. Р. и Н. И. Лазаренко (СССР)
1944—1945	Открыты сегнетоэлектрические свойства титаната бария	Б. М. Вул и И. М. Гольдман (СССР)

(окончание)

Дата	Событие	Автор(ы)
1945—1946	В США создана первая ЭВМ — компьютер ENIAC	Дж. Мочли, Дж. Эккерт младший
1945	Разработана термодинамическая теория сегнетоэлектрических явлений	В. Л. Гинзбург (СССР)
1948	Создан транзистор	Дж. Бардин, У. Браттейн, У. Шокли
1956	Показана возможность существования связанных пар электронов в металле	А. Купер
1950-е	Гипотеза возникновения жизни на Земле под действием электрического разряда	С. Миллер
1959	Созданы галогенные лампы накаливания	
1960-е	Началось применение интегральных микросхем	
1967	Появилась компьютерная клавиатура	
17.11.1971	Создана компьютерная мышь (патент № 3541541)	Дуглас Энгельбарт (США)
1971	Началось применение микропроцессора	Фирма Intel
1986	Открытие высокотемпературной сверхпроводимости	А. Мюллер, Г. Беднорц
07.2006	Первый в мире пилотируемый самолёт, работающий на обычных сухих электрических батареях	Токийский технологический институт при участии компании Panasonic

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Краткие биографические справки

Ампёр, Андре-Мари (Ampère, André Marie, 1775—1836 гг.) — французский физик, один из основоположников электродинамики. В 1814 г. независимо сформулировал закон Авогадро, а позднее также разработал волновую теорию теплоты. Предложил правило Ампера, изобрёл соленоид, в 1820 г. открыл механическое взаимодействие токов и установил закон Ампера; построил первую теорию магнетизма.

Араго, Доминик Франсуа (Arago, Dominique François Jean, 1786—1853 гг.) — французский учёный и политический деятель. Исследовал поляризацию света, открыл намагничивающее действие электрического тока и т. н. магнетизм вращения, установил связь полярных сияний с магнитными бурями. Автор трудов по астрономии, истории науки.

Аристотель (Ἀριστοτέλης, 384—322 гг. до н. э.) — древнегреческий философ. Учился у Платона; автор "Первой философии" (позднее названной метафизикой), содержащей учение об основных принципах бытия; колебался между материализмом и идеализмом.

Аррениус, Сванте Август (Arrhenius, Svante, 1859—1927 гг.) — шведский физикохимик, известен исследованиями образования ионов в растворах различных соединений. Один из основоположников физической химии, иностранный член-корреспондент Петербургской АН (с 1903 г.) и иностранный почётный член АН СССР (с 1925 г.). Автор теории электролитической диссоциации. Автор трудов по химической кинетике (уравнение Аррениуса), а также по астрономии, астрофизике и биологии. Лауреат Нобелевской премии (1903 г.).

Би́б, Жан Батист (Biot, Jean-Baptiste, 1774—1862 гг.) — французский физик; основные труды по изучению поляризации света (закон Био), магнитного поля электрического тока (закон Био—Савара, 1820 г.), акустики.

Бойль, Роберт (Boyle, the Hon. Robert, 1627—1691 гг.) — английский (ирландский) химик и физик. Установил, что наэлектризованное тело не только притягивает ненаэлектризованное, но и, в свою очередь, притягивается последним. Показал, что электрические взаимодействия наблюдаются и в вакууме.

Бос, Джагдиш Чандра (Bose, Sir Jagadis Chandra, 1858—1937 гг.) — индийский физик, биофизик и физиолог растений.

Брю́стер, Дейвид (Brewster, Sir David, 1781—1868 гг.) — шотландский физик; исследовал поляризацию света. В 1815 г. установил закон Брюстера, открыл круговую поляризацию.

Вавилов, Сергей Иванович (1891—1951 гг.) — советский физик, основатель советской научной школы физической оптики. Автор фундаментальных трудов по физической оптике, по люминесценции и её практическому применению. Под руководством Вавилова открыто излучение Черенкова—Вавилова.

Ве́бер, Вильгельм Эдуард (Weber, Wilhelm Eduard, 1804—1891 гг.) — немецкий физик; автор трудов по электричеству и магнетизму. В 1826 г. окончил университет в Галле. С 1827 г. преподавал там же (с 1828 г. профессор). В 1831—1837 гг. профессор Гёттингенского университета, в 1843—1849 гг. профессор Лейпцигского университета, с 1849 г. вновь Гёттингенского университета. Вместе с К. Ф. Гауссом разработал абсолютную систему электрических и магнитных единиц. Теоретически вывел закон взаимодействия движущихся зарядов, впервые введя зависимость не только от величины и знака зарядов, но и от относительной скорости их перемещения, однако теория, на которую он опирался, допускала существование сил, мгновенно действующих на расстоянии, и игнорировала роль среды в передаче взаимодействия. Вебер был одним из авторов гипотезы о прерывности электрического заряда и электрического строения вещества. В 1856 г. совместно с Кольраушем определил отношение заряда конденсатора в электростатических и магнитных единицах и впервые обнаружил, что оно численно равно скорости света. Совместно с Гауссом участвовал в разработке методов и аппаратуры для геомагнитных измерений, а также в 1833 г. построил первый в Германии телеграф.

Вейс, Пьер Эрнест (Weiss, 1865—1940 гг.) — французский физик. В 1907 г. высказал гипотезу о существовании в ферромагнетиках внутреннего магнит-

ного поля и областей намагниченности, установил закон Кюри—Вейса, открыл магнетокалорический эффект.

Вестон, Эдвард (Weston, Edward, 1850—1936 г.) — англо-американский инженер. Изобрёл элемент Вестона.

Видеман, Густав Генрих (Wiedemann, G.H., 1826—1899 г.) — немецкий физик; один из авторов закона Видемана—Франца (1853 г.). В 1858 г. открыл эффект Видемана.

Во́льта, Алессандро (Volta, Count Alessandro, 1745—1827 г.) — итальянский физик и физиолог, один из основоположников учения об электричестве. В 1775 г. Вольта изобрёл электрофор — устройство, будучи заряженным трением, могло передавать заряд на другие предметы. До этого он также открыл и выделил болотный газ, изобрёл вородную лампу и эвдиометр, применяемый при газовом анализе. В 1799—1800 гг. создал первый химический источник тока — "вольтов столб"; открыл контактную разность потенциалов. Он использовал пластинки из меди и цинка, разделённые дисками из картона, пропитанного соевым раствором. Он продемонстрировал своё изобретение Наполеону, который был настолько впечатлён, что назначил его графом и Сенатором от Ломбардии (район в Северной Италии).

Вуд, Роберт Уильямс (Wood, Robert Williams, 1868—1955 г.) — американский физик-экспериментатор, иностранный почётный член АН СССР (с 1930 г.). Автор трудов по физической оптике. Открыл и исследовал резонансное излучение паров Na и Hg, и развил методы спектроскопии. Заложил основы УФ- и ИК-фотографии.

Вул, Бенцион Моисеевич (1903—1985 г.) — советский физик; автор трудов по физике диэлектриков и полупроводников, квантовой электронике.

Галиле́й, Галилео (Galilei, Galileo, 1564—1642 г.) — итальянский физик, механик и астроном, один из основателей точного естествознания. Боролся против схоластики, считал основой познания опыт и подчёркивал особое значение использования математики. Заложил основы современной механики: выдвинул идею об относительности движения, установил законы инерции, свободного падения и движения тел по наклонной плоскости, сложения движений; открыл изохронность колебаний маятника; первым исследовал прочность балок. В 1609 г. сделал свой первый телескоп с 20-кратным увеличением, а затем с 32-кратным увеличением и открыл кратеры на Луне, 4 крупнейших спутника Юпитера, фазы у Венеры, пятна на Солнце. Активно защищал гелиоцентрическую систему мира Коперника, за что был подвергнут суду инквизиции (1633 г.), вынудившей его отречься от учения Коперника.

ка. До конца жизни Галилей считался "узником инквизиции" и принужден был жить на своей вилле Арчетри близ Флоренции. В 1992 г. папа Иоанн Павел II объявил решение суда инквизиции ошибочным и реабилитировал Галилея.

Гальвѳани, Луиджи (Galvani, Luigi, 1737—1798 гг.) — итальянский анатом и физиолог, один из основателей учения об электричестве, основоположник экспериментальной электрофизиологии. Первым исследовал электрические явления при мышечном сокращении ("животное электричество"); обнаружил возникновение разности потенциалов при контакте металла с электролитом.

Га́усс, Карл Фридрих (Gauß, Johann Karl Friedrich, 1777—1855 гг.) — немецкий учёный. Автор трудов по алгебре, теории чисел, дифференциальной геометрии, математической физике, теории электричества и магнетизма, геодезии и многих разделов астрономии. С 1795 по 1798 гг. учился в Гёттингенском университете. В 1799 г. получил доцентуру в Брауншвейге, в 1807 г. — кафедру математики и астрономии в Гёттингенском университете, с которой была также связана должность директора Гёттингенской астрономической обсерватории. В 1820—1830 гг. Гаусс организовал измерение дуги меридиана Гёттинген—Альтона. Изучение формы земной поверхности потребовало углублённого общего геометрического метода для исследования поверхностей. Выдвинутые Гауссом в этой области идеи получили выражение в сочинении "Общие изыскания о кривых поверхностях" (1827 г.). Гаусс предложил рассматривать те свойства поверхности, которые не зависят от изгибов поверхности, не изменяющих длин линий на ней. Вместе с Вебером Гаусс создал абсолютную систему электромагнитных единиц. Небольшое сочинение "О силах, действующих обратно пропорционально квадрату расстояния" (1834—1840 гг.) содержит основы теории потенциала. В 1842—1847 гг. создал основы высшей геодезии ("Исследования о предметах высшей геодезии").

Гельмго́льц, Герман Людвиг Фердинанд (Helmholtz, Hermann Ludwig Ferdinand von, 1821—1894 гг.) — немецкий учёный. В 1847 г. впервые математически обосновал закон сохранения энергии, показав его всеобщий характер, разработал термодинамическую теорию химических процессов, ввёл понятия свободной и связанной энергий. Работы Гельмгольца по электромагнетизму, оптике и акустике большей частью связаны с его физиологическими исследованиями. Гельмгольц обнаружил явление колебательного разряда лейденской банки — факт, сыгравший существенную роль в развитии теории электромагнетизма. Именно по предложению Гельмгольца Г. Герц произвёл

опыты с электромагнитными волнами. В 1881 г. выдвинул идею об атомарном строении электричества.

Гёрике, Отто фон, Л. (Guericke, Otto von, 1602—1686 гг.) — бургомистр немецкого города Магдебурга. Создал одну из первых электрических машин — вращающийся шар из серы, натираемый руками, и обнаружил явление электрического отталкивания, а также электрическое свечение.

Герц, Генрих Рудольф (Hertz, Heinrich, 1857—1894 гг.) — немецкий физик, один из основоположников электродинамики. В 1886—1889 гг. экспериментально доказал существование электромагнитных волн (используя вибратор Герца) и установил тождественность основных свойств электромагнитных и световых волн; придал уравнениям Максвелла симметричную форму; в 1887 г. открыл внешний фотоэффект; построил механику, свободную от понятия силы.

Гиббс, Джозайя Уиллард (Gibbs, Joseph Williard, 1839—1903 гг.) — американский физик-теоретик, один из создателей термодинамики и статистической механики. Разработал теорию термодинамических потенциалов, открыл общее условие равновесия гетерогенных систем — правило фаз, вывел уравнения Гиббса—Гельмгольца, Гиббса—Дюгема, адсорбционное уравнение Гиббса, установил фундаментальный закон статистической физики — распределение Гиббса, предложил графическое изображение состояния трёхкомпонентной системы (треугольник Гиббса), заложил основы термодинамики поверхностных явлений и электрохимических процессов, ввёл понятие адсорбции.

Гильберт, Уильям (Gilbert, William, 1544—1603 гг.) — английский физик, придворный врач королевы Елизаветы и один из крупнейших естествоиспытателей своей эпохи. Итогом его многолетних исследований явился труд, опубликованный в Лондоне в 1600 г. под названием "О магните, магнитных телах и большом магните — Земле. Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов". Гильберт впервые употребил слова: "электрика", "электрический", "электричество". Гильберт первым в Англии выступил с критикой учения Аристотеля и в защиту учения Н. Коперника. Через 3 года после выхода своей книги Гильберт умер от чумы.

Гинзбург, Виталий Лазаревич (1916—2009 гг.) — российский физик-теоретик; автор около 500 научных работ и монографий по распространению радиоволн, астрофизике, происхождению космических лучей, излучению Черенкова—Вавилова, сверхпроводимости, физике плазмы, термоядерным реакциям, кристаллооптике, сегнетоэлектричеству и др. Член 9 академий наук. Сталинская премия I степени за участие в создании термоядерного оружия.

Лауреат Нобелевской премии по физике (2003 г., совместно с Абрикосовым и Леггеттом) за теорию сверхпроводников и сверхтекучей жидкости.

Грин, Джордж (Green, G., 1793—1841 гг.) — английский математик. Самостоятельно изучал математику и лишь в 1837 г. окончил Кембриджский университет. В сочинении "Опыт применения математического анализа к теориям электричества и магнетизма" (1828 г.) ввёл понятие "потенциала" и развил теорию электричества и магнетизма, опираясь на найденное им соотношение между интегралом по объёму и интегралом по поверхности, ограничивающей объём. Эта работа оставалась неизвестной до её переиздания в 1845 г. В 1839 г. выполнил важную работу об отражении и преломлении света в кристаллических средах, в которой также вывел основные уравнения теории упругости.

Грётгус, Кристиан Иоганн Дитрих (Теодор) фон (Grothus (Grotthuss), Theodore, 1785—1822 гг.) — прибалтийский физик и химик. В 1805 г. сформулировал первую теорию электролиза, а в 1818 г. закон Гротгуса, согласно которому фотохимические реакции могут быть вызваны только той частью падающего света, которая поглощается реагирующей системой.

Даниэль, Джон Фредерик (Danielle, John Frederic, 1790—1845 гг.) — английский физик и химик. Создал гальванический элемент Даниеля.

Дебай, Петер Йозеф Вильгельм (Debye, Peter, 1884—1966 гг.) — физик, иностранный член-корреспондент РАН (с 1924 г.), иностранный член АН СССР (с 1925 г.). Родился в Нидерландах, учился и работал в Германии, с 1940 г. в США. Фундаментальные труды по квантовой теории твёрдых тел (модель твёрдого тела Дебая, температура Дебая, закон теплоёмкости Дебая). Автор дипольной теории диэлектриков. Разработал рентгеновский метод исследования поликристаллических материалов (метод Дебая—Шеррера). Нобелевская премия (1936 г.).

Джоуль, Джеймс Прескотт (Joule, James Prescott, 1818—1889 гг.) — английский физик. Экспериментально обосновал закон сохранения энергии, определил механический эквивалент теплоты, установил закон Джоуля—Ленца, открыл совместно с У. Томсоном эффект Джоуля—Томсона.

Дивиш, Прокоп (Diviš, P., 1698—1765 гг.) — чешский физик. С 1736 г. священник в с. Пршиметице. С помощью усовершенствованной им электрической машины трения исследовал электростатические явления. В 1754 г. построил первый в Европе заземлённый громоотвод. Применял на практике разработанный им метод электротерапии.

Дру́де, Пауль (Drude, Paul, 1863—1906 гг.) — немецкий физик, один из создателей классической электронной теории металлов, труды по физической оптике. Обнаружил и объяснил аномальную дисперсию диэлектрической проницаемости.

Дэви (Дейви), Гемфри (Хамфри) (Davy, Sir Humphry, 1778—1829 гг.) — английский химик и физик, один из основателей электрохимии. Получил электролизом водород и кислород из воды, K, Na, Ca, Sr, Ba, Mg и Li, описал электрическую дугу, предложил водородную теорию кислот, открыл обезболивающее действие гемioxида азота, изобрёл безопасную рудничную лампу.

Дюфе́, Шарль Франсуа (du Fay, Charles François de Cisternay, 1698—1739 гг.) — французский физик. В 1733—1734 гг. открыл существование двух родов электричества и установил, что одноимённо заряженные тела отталкиваются, а разноимённо — притягиваются. Наблюдал электрические искры от наэлектризованного человеческого тела. Сконструировал первый прототип электроскопа. Впервые попытался измерить магнитную силу с помощью намагниченной стрелки, укрепленной посредством пружины (магнитометр).

Зоммерфельд, Арнольд (Arnold Sommerfeld, 1868—1951 гг.) — немецкий физик и математик. В 1916 г. уточнил модель атома Бора и создал теорию тонкой структуры спектра водорода, в 1928 г. заложил основы квантовой теории металлов, в 1931 г. дал теорию тормозного излучения электронов. Автор трудов по математической физике.

Ибффе, Абрам Фёдорович (1880—1960 гг.) — советский физик, один из создателей советской физической школы, пионер исследования полупроводников, организатор и первый директор Физико-технического института, Института полупроводников АН СССР и Физико-агрономического института, инициатор создания физико-технических институтов в Харькове, Днепропетровске, Свердловске, Томске.

Кавендиш, Генри (Cavendish, Henry, 1731—1810 гг.) — английский физик и химик. С помощью изобретённых им крутильных весов подтвердил закон всемирного тяготения, определил массу Земли, установил закон взаимодействия электрических зарядов.

Капица, Пётр Леонидович (1894—1984 гг.) — советский физик. Один из основателей физики низких температур и физики сильных магнитных полей. Родился в Кронштадте в семье генерал-лейтенанта Леонида Петровича Капицы. Лауреат Нобелевской премии по физике (1978 г.).

Кельвин (Kelvin) / **Томсон**, Ульям (Thomson, William, 1824—1907 гг.) — английский физик и изобретатель. Томсон родился в Белфасте, Ирландия, а в 1832 г. семья переехала в Глазго, Шотландия. Юный Томсон поступил в университет в возрасте десяти лет. Он опубликовал свыше 650 научных работ по термодинамике, электрическим и магнитным явлениям, гидродинамике, теории упругости, математике и др. и запатентовал около 70 изобретений. Дал одну из формулировок второго начала термодинамики, предложил абсолютную шкалу температур (шкала Кельвина). Установил зависимость периода колебаний контура от его ёмкости и индуктивности. Изобрёл многие электроизмерительные приборы, усовершенствовал ряд мореходных инструментов. Сконструировал квадрантный и абсолютный электрометры и другие физические приборы; усовершенствовал зеркальный гальванометр, магнитный компас и т. д. Член (1851 г.) и президент (1890—1895 гг.) Лондонского королевского общества, иностранный член-корреспондент (1877 г.) и иностранный почётный член (1896 г.) Петербургской АН. В 1892 г. за научные заслуги получил титул барона Кельвина. Его участие в проекте по прокладке телеграфного трансатлантического подводного кабеля послужило основой большого личного состояния.

Кирхгоф, Густав Роберт (Kirchhoff, Gustav Robert, 1824—1887 гг.) — немецкий физик. Установил правила для электрических цепей, в 1859 г. совместно с Бунзеном заложил основы спектрального анализа, в 1860 г. открыл цезий, в 1861 г. — рубидий, ввёл понятие абсолютно чёрного тела и открыл закон излучения.

Кла́узиус, Рудольф Юлиус Эммануэль (Clausius, Rudolf Julius Emmanuel, 1822—1888 гг.) — немецкий физик. Один из основателей термодинамики и молекулярно-кинетической теории теплоты. Развил термодинамическую теорию термоэлектричества (1853 г.) и др. Иностраный член Лондонского королевского общества (с 1868 г.), член-корреспондент Парижской АН (с 1865 г.).

Клод, Жорж (1870—1960 гг.) — французский инженер-химик, создатель неоновой лампы.

Кобёко, Павел Павлович (1897—1954 гг.) — советский физик. Одним из первых исследовал аморфные тела (низко- и высокомолекулярные); автор трудов по диэлектрикам, в том числе по сегнетоэлектрикам.

Крукс, Уильям (Crookes, Sir William, 1832—1919 гг.) — английский физик и химик. В 1879 г. ввёл понятие о четвёртом состоянии вещества, в 1903 г. открыл эффект сцинтилляций, создал спинтарископ Крукса и радиометр

(1873 г.), выдвинул идеи эволюции химических элементов и изотопии, показал возможность и описал принципы радиосвязи (1892 г.).

Куло́н, Шарль Огюстен (Coulomb, Charles-Augustin de, 1736—1806 гг.) — французский инженер и физик. Один из основателей электротехники; исследовал деформацию кручения нитей, установил её законы; в 1784 г. изобрёл крутильные весы, в 1785 г. открыл закон Кулона; установил законы сухого трения.

Курча́тов, Игорь Васильевич (1903—1960 гг.) — советский физик. В 1925—1942 гг. работал в ФТИ в Ленинграде, исследовал сегнетоэлектрики, под руководством Курчатова открыто спонтанное деление ядер урана (1940 г.), созданы первый в Европе ядерный реактор (1946 г.), первая в СССР атомная бомба (1949 г.), первые в мире термоядерная бомба (1953 г.) и АЭС (1954 г.).

Кюри, Жак (Curie, Paul-Jacques, 1855—1941 гг.) — французский физик, открывший совместно с братом Пьером в 1881 г. пьезоэлектричество в кристаллах. В 1883 г. сотрудничество братьев прекратилось, так как Жак покинул Париж, чтобы стать профессором минералогии университета Монпелье.

Кюри, Пьер (Curie, Pierre, 1859—1906 гг.) — французский физик и химик, один из создателей учения о радиоактивности. Получил домашнее образование (его учил отец). До того как в 1895 г. женился на М. Склодовской, сделал несколько важных открытий (в 1880 г. открыл и исследовал пьезоэлектричество, создал крутильные весы с точностью 0,01 мг, провёл исследования по симметрии кристаллов). Он также открыл, что магнитная восприимчивость парамагнитных материалов обратно пропорциональна абсолютной температуре (закон Кюри—Вейса) и что существует критическая температура, выше которой магнитные свойства пропадают (температура Кюри). Совместно с женой в 1898 г. открыл полоний и радий, исследовал радиоактивное излучение, ввёл термин "радиоактивность". В 1906 г. он погиб в автоаварии в Париже в возрасте 46 лет. Лауреат Нобелевской премии (1903 г., совместно со Склодовской-Кюри и Беккерелем).

Ланжеве́н, Поль (Langevin, Paul, 1872—1946 гг.) — французский физик. Исследовал ионизацию газов; в 1903—1905 гг. создал на основе электронных представлений статистическую теорию диа- и парамагнетизма; внёс вклад в развитие теории относительности и релятивистскую электродинамику; использовал пьезокварц для генерации ультразвука, первым применил ультразвук для подводной сигнализации и обнаружения подводных лодок.

Лэнгмюр, Ирвинг (Langmuir, Irving, 1881—1957 гг.) — американский физик и физикохимик. Автор трудов по электрическим разрядам в газах, термоэлек-

тронной эмиссии, вакуумной технике и др. Исследования Ленгмюра (начиная с 1909 г.) электрических разрядов в газах и изучение термоэлектронной эмиссии были использованы при конструировании газонаполненных электроламп накаливания и электронных ламп в радиотехнике. Ленгмюр в 1913 г. предложил формулу для плотности эмиссионного тока. В 1924 г. исследовал термическую ионизацию газов и паров соприкасающимися с ними металлическими поверхностями. В 1911 г. Ленгмюр получил атомарный водород и разработал процесс сварки металлов в его пламени. Нобелевская премия (1932 г.) за открытия в области поверхностных явлений в химии.

Ленц, Эмилий Христианович (1804—1865 гг.) — российский физик и электротехник. С 1863 г. ректор Петербургского университета, в 1833 г. установил правило Ленца, в 1842 г. экспериментально обосновал закон Джоуля—Ленца, совместно с Якоби дал методы расчёта электромагнитов, открыл обратимость электрических машин, написал труды по геофизике.

Лифшиц, Евгений Михайлович (1915—1985 гг.) — советский физик-теоретик, академик АН СССР (с 1979 г.). Основные труды по ферромагнетизму, межмолекулярным взаимодействиям, релятивистской космологии. Автор (совм. с Ландау) классического курса теоретической физики. Лауреат Государственной (1954 г.) и Ленинской (1962 г.) премий.

Лодыгин, Александр Николаевич (1847—1923 гг.) — русский электротехник. В 1872 г. изобрёл угольную лампу накаливания (патент 1874 г.), один из основателей электротермии.

Ломоно́сов, Михаил Васильевич (1711—1765 гг.) — русский учёный. В 19 лет ушёл учиться (с 1731 г. в Славяно-греко-латинской академии в Москве, с 1735 г. в Академическом университете в Санкт-Петербурге, в 1736—1741 гг. в Германии). С 1742 г. адъюнкт, с 1745 г. академик Петербургской АН. Исследования Ломоносова относятся к математике, физике, химии, наукам о Земле, астрономии, автор первой теории атмосферного электричества.

Лóренц, Хендрик Антон (Lorentz, Hendrik Antoon, 1853—1928 гг.) — голландский физик, автор трудов по теоретической физике; создал классическую электронную теорию, с помощью которой объяснил многие электрические и оптические явления, в том числе эффект Зеемана; разработал электродинамику движущихся сред, вывел преобразования Лоренца, близко подошёл к созданию теории относительности. Лауреат Нобелевской премии (1902 г., совместно с Зееманом).

Ма́ксвелл, Джеймс Клерк (Maxwell, James Clerk, 1831—1879 гг.) — английский (шотландский) физик, создатель классической электродинамики, один

из основоположников статистической физики. Создал теорию электромагнитного поля (уравнения Максвелла), ввёл понятие о токе смещения, предсказал существование электромагнитных волн, выдвинул идею электромагнитной природы света. Установил статистическое распределение, названное его именем. Исследовал вязкость, диффузию и теплопроводность газов. Показал, что кольца Сатурна состоят из отдельных тел. Автор трудов по цветному зрению и колориметрии (диск Максвелла), оптике (эффект Максвелла), теории упругости (теорема Максвелла, диаграмма Максвелла—Кремоны), термодинамике, истории физики и др. О роли Максвелла в развитии науки превосходно сказал Фейнман: *"В истории человечества (если посмотреть на неё, скажем, через десять тысяч лет) самым значительным событием XIX столетия, несомненно, будет открытие Максвеллом законов электродинамики. На фоне этого важного научного открытия гражданская война в Америке в том же десятилетии будет выглядеть провинциальным происшествием"*.

Мандельшта́м, Леонид Исаакович (1879—1944 гг.) — российский физик, один из основателей научной школы по радиофизике в СССР. В 1928 г. совместно с Ландсбергом открыл комбинационное рассеяние света, совместно с Папалекси выполнил основополагающие исследования по нелинейным колебаниям, разработал метод параметрического возбуждения электрических колебаний, предложил радиоинтерференционный метод; автор трудов по рассеянию света.

Милликен, Роберт Эндрюс (Millikan, Robert Andrews, 1868—1953 гг.) — американский физик. В 1914—1918 гг. был заместителем председателя Национального исследовательского совета (разрабатывал метеорологические приборы и приборы для обнаружения подводных лодок). В 1921—1945 гг. директор лаборатории Нормана Бриджа Калифорнийского технологического института. В 1912—1915 гг. впервые непосредственно определил численное значение постоянной Планка. В 1914—1916 гг. осуществил прецизионное измерение заряда электрона разработанным им методом. Произвёл экспериментальную проверку уравнения фотоэффекта А. Эйнштейна. Разработал методику атомной спектроскопии в крайней ультрафиолетовой области. Исследовал космические лучи с помощью ионизационной камеры. Лауреат Нобелевской премии (1923 г.).

Му́шенбрук, Питер ван (Pieter van Musschenbroek, 1692—1761 гг.) — голландский физик, разработал многочисленные физические экспериментальные методы и приборы. В 1745 г. изобрёл первый электрический конденсатор — лейденскую банку, автор первого систематического курса физики (1739 г.).

Наджáков, Георги Стефанов (1896—1981 гг.) — болгарский физик. Автор трудов по физике диэлектриков и полупроводников, ядерной физике.

Нернст, Вальтер Фридрих Герман (Nernst, Walther F.G., 1864—1941 гг.) — немецкий физикохимик, один из основоположников современной физической химии. В 1886 г. в дипломной работе, выполненной в лаборатории А. Эттингсхаузена, Нернст описал обнаруженный им эффект возникновения разности потенциалов в помещённой в магнитное поле металлической пластинке, через которую проходит тепловой поток. В 1888—1889 гг. установил связь между подвижностью ионов и коэффициента диффузии электролитов, что послужило основой для созданной им теории электродвижущих сил гальванических элементов. В 1894 г. Нернст показал, что диссоциирующая способность растворителя тем больше, чем выше значение его диэлектрической проницаемости, и обнаружил явление электрострикции. Лауреат Нобелевской премии (1920 г.).

Ноллэ, Жан-Антуан (Nollet, Jean-Antoine, 1700—1770 гг.) — французский физик-экспериментатор, член Парижской академии наук. Учился в Клермоне, Бове, Париже. В 1775 г. стал преподавателем экспериментальной физики. Был профессором в Турине, лектором в Бордо, Версале, с 1753 г. — профессор Королевского колледжа в Наварре, с 1761 г. — в Школе искусств в Мезьере. Проводил исследования в области электричества, молекулярной физики, оптики. В 1747 г. изобрёл электроскоп, усовершенствовал лейденскую банку и способствовал её распространению во Франции, усовершенствовал электрическую машину. Принимал участие в электрических опытах Дюфе. "Передал" электричество по цепи из 180 человек. Первый заметил, что электричество быстрее "стекает" с остриёв, чем с тупых тел. Выдвинул идею излучения действия электричества на растениях и животных. Открыл диффузию жидкостей и осмос. Исследовал водяной пар, наблюдал его конденсацию в сосуде при откачке. Описал машину для шлифовки линз.

Ньютон, Исаак (Newton, Sir Isaac, 1643—1727 гг.) — английский математик, механик, астроном и физик, создатель классической механики. Член (с 1672 г.) и президент (с 1703 г.) Лондонского королевского общества. В 1664—1667 гг., когда в Лондоне свирепствовала чума, Ньютон сделал важнейшие открытия: дифференциальное и интегральное исчисления (за несколько лет до Лейбница, но не публиковал свои результаты, пока Лейбниц не опубликовал свои), основные законы классической механики (продолжил труды Галилея и Кеплера, пространство и время считал абсолютными), объяснение природы света (был уверен, что свет состоит из маленьких частиц (корпускул) и что белый свет фактически является смесью различных типов корпускул), закон все-

мирного тяготения (с помощью которого объяснил причины приливов, прецессию земной оси и движение Луны и планет), описанные в фундаментальных трудах "Математические начала натуральной философии" (1687 г.) и "Оптика" (1704 г.). Построил первый зеркальный телескоп. Был директором Монетного двора, наладил монетное дело в Англии. Ньютон вышел в отставку в 1693 г. после перенесённого нервного расстройства. Установлено, что в теле Ньютона накопились большие количества ртути возможно из-за его алхимических опытов, которым он с 1679 г. отдавал значительную часть своего свободного времени. Ньютон был торжественно похоронен в Вестминстерском аббатстве. Над его могилой высится памятник с бюстом и эпитафией *"Здесь покоится сэр Исаак Ньютон, дворянин, который почти божественным разумом первый доказал с факелом математики движение планет, пути комет и приливы океанов. Он исследовал различие световых лучей и проявляющиеся при этом различные свойства цветов... Пусть смертные радуются, что существует такое украшение рода человеческого"*.
<http://www.newton.cam.ac.uk/newton.html> и http://www.bbc.co.uk/history/historic_figures/newton_isaac.shtml

Ом, Георг Симон (Ohm, Georg Simon, 1789—1854 гг.) — немецкий физик. Основные труды по электричеству, оптике, кристаллооптике, акустике. Проведя серию точных экспериментов, в 1826 г. установил основной закон электрической цепи (закон Ома) и в 1827 г. дал его теоретическое обоснование.

Остроградский, Михаил Васильевич (1801—1861/1862 гг.) — русский математик и механик. Автор трудов по математическому анализу, математической физике, аналитической и небесной механике, гидромеханике, теории упругости, баллистике. Нашёл формулу преобразования интеграла по объёму в интеграл по поверхности (формула Остроградского).

Папалёкси, Николай Дмитриевич (1880—1947 гг.) — российский радиофизик, один из основателей школы радиофизиков и радиотехников; совместно с Мандельштамом выполнил основополагающие исследования по нелинейным колебаниям, разработал метод параметрического возбуждения электрических колебаний, предложил радиоинтерференционный метод; труды по рассеянию света.

Пашен, Фридрих (Paschen, Friedrich, 1865—1947 гг.) — немецкий физик, автор трудов по электрическим разрядам в газах, спектроскопии, спектральным и измерительным приборам, в 1889 г. установил закон Пашена, в 1908 г. обнаружил спектральную серию водорода в ИК-области, в 1912 г. открыл явление Пашена—Бака.

Петрoв, Василий Владимирович (1761—1834 гг.) — русский физик, профессор физики в Петербургской медико-хирургической академии, один из первых русских электротехников. В 1802 г. открыл электрическую дугу с помощью созданной им крупнейшей для того времени гальванической батареи и указал на возможность её практического применения, исследовал химическое действие тока, электропроводность, люминесценцию, электрические явления в газах. Под его руководством был создан один из крупнейших в Европе физических кабинетов.

Петрoвский, Алексей Алексеевич (1873—1942 гг.) — советский радио- и электротехник. Автор первого российского теоретического руководства по радиотехнике (1907 г.), пионер электроразведки полезных ископаемых.

Планк, Макс Эрнст Людвиг (Planck, Max, 1858—1947 гг.) — немецкий физик, сделавший существенный вклад в оптику, термодинамику, статистическую механику, физическую химию и другие области науки. Под влиянием работ Клаузиуса Планк ещё студентом увлёкся термодинамикой; его ранние исследования посвящены уточнению понятий энтропии и необратимости, обоснованию второго начала термодинамики (докторская диссертация, 1879 г.), применению термодинамики к физико-химическим процессам, в частности к диссоциации газов и к слабым растворам (1883—1888 гг.). На основе теории электролитов Нернста Планк в 1890 г. вычислил разность потенциалов двух электролитических растворов. Наибольшее значение имели работы Планка по термодинамической теории излучения, приведшие его к полуэмпирическому установлению формулы распределения энергии в спектре электромагнитного излучения абсолютно чёрного тела, которая была доложена им на заседании Берлинского физического общества; через 2 месяца (14 декабря 1900 г.) Планк продемонстрировал вывод этой формулы, основанный на предположении квантуемости энергии, что сделало Планка основоположником квантовой физики. Полное значение этого революционного открытия было через много лет, и в 1918 г. ему была присвоена Нобелевская премия по физике. Фундаментальная постоянная h теперь называется постоянной Планка. Последующие работы Планка посвящены разработке отдельных аспектов теории излучения, термодинамики (обоснование принципа Ле Шателье—Брауна и др.), релятивистской механики и т. д. Он потерял старшего сына на Второй мировой войне, а в 1945 г. другой его сын, Эрвин (Erwin), был казнён за участие в заговоре по убийству Гитлера. Член-корреспондент Петербургской АН (с 1913 г.), почётный член АН СССР (с 1926 г.), член Лондонского королевского общества (с 1926 г.).

Плиний Старший, Гай Плиний Секунд (Gaius Plinius Secundus (также Maior), 23 или 24—79 гг.) — римский писатель, учёный и государственный деятель. Автор "Естественной истории" в 37 книгах — своеобразной энциклопедии естественно-научных знаний античности. Содержит сведения по астрономии, физической географии, метеорологии, этнографии, антропологии, зоологии, ботанике, сельскому и лесному хозяйству, медицине, минералогии, металлургии и пр., перемешанные с фантастическими рассказами, небывлицами, суевериями, анекдотами. Список книг, составленный Плинием, свидетельствует, что он изучил более 2 000 сочинений по астрономии, минералогии, физике, ботанике, медицине, этнографии, технике, анатомии и т. п. В "Естественной истории" каждой из этих наук посвящено несколько книг. До конца XVII в. "Естественная история" использовалась как источник знаний о природе.

Роггендорф, Иоганн Кристиан (Roggendorff, Johann Christian, 1796—1877 гг.) — немецкий физик, иностранный член-корреспондент Петербургской АН (с 1868 г.). Основные труды по электрическим измерениям.

Пуассон, Симеон Дени (Poisson, Siméon Denis, 1781—1840 гг.) — французский физик и математик. Автор трудов по математическому анализу, теории вероятностей, математической физике, теоретической и небесной механике, теории упругости, гидродинамике и др.

Рентген, Вильгельм Конрад (Röntgen, Wilhelm Konrad, 1845—1923 гг.) — немецкий физик. В 1895 г. открыл рентгеновские лучи, исследовал их свойства, за что получил первую Нобелевскую премию по физике в 1901 г. Труды по пьезо- и пироэлектрическим свойствам кристаллов, магнетизму.

Рихман, Георг Вильгельм (1711—1753 гг.) — российский учёный эстонского происхождения, соратник Ломоносова. В 1735—1740 гг. студент "физического класса" Петербургской АН. С 1740 г. адъюнкт, с 1741 г. профессор АН (академик). С 1744 г. заведующий физическим кабинетом АН. Основные работы по калориметрии и электричеству. Предложил первую работающую модель электрометра со шкалой. Погиб при проведении опытов с атмосферным электричеством.

Ричардсон, Оуэн Уилланс (Richardson, Owen Willans, 1879—1959 гг.) — английский физик, член Лондонского королевского общества (с 1913 г.). Основные труды по термоэлектронной эмиссии. В 1901 г. нашёл зависимость плотности тока термоэлектронной эмиссии от температуры поверхности металла. Ричардсон занимался также изучением фотоэлектрического эффекта, эмиссии электронов под действием химических агентов, некоторых вопросов

магнетизма, квантовой теории, спектроскопии, физики рентгеновских лучей и т. д. Лауреат Нобелевской премии (1928 г.).

Сенека, Луций Анней (Seneca, Lucius Annaeus, ок. 4 до н. э.—65 гг.) — римский политический деятель, философ и писатель. В 49—54 гг. воспитатель будущего императора Нерона.

Сименс, Эрнст Вернер (Ernst Werner von Siemens, 1816—1892 гг.) — немецкий электротехник и предприниматель, член АН в Берлине (с 1874 г.). Первые работы (1840-е гг.) были связаны с гальванопластикой. Развив идею синхронно-синфазного телеграфного аппарата Б. С. Якоби, Сименс в 1847 г. получил в Пруссии патент на телеграф такого типа и с помощью механика И. Г. Гальске начал выполнять заказы и подряды на телеграфные установки. Большие прибыли от этих подрядов, а особенно от сооружения во время Крымской войны в 1853—1856 гг. телеграфной линии от Петербурга до Севастополя, дали возможность Сименсу превратить небольшую берлинскую мастерскую в крупный для того времени завод. С 1870-х гг. Сименс развивает деятельность в области сильноточной электротехники (электрическое освещение, трамвай, электрические станции и т. п.). Он изобрёл машину для наложения на провода резиновой изоляции, предложил цилиндрический якорь 2Т-образного сечения для электрической машины (1856 г.), осуществил измерение диэлектрической проницаемости многих веществ (1859 г.), создал ртутный эталон сопротивления (1860 г.). К 1867 г. относится применение и конструктивная разработка электромашинного генератора с самовозбуждением, к 1879 г. — создание первой в мире опытной электрической городской железной дороги — трамвая (на берлинской промышленной выставке).

Толмен, Ричард (Tolman, Richard Chace, 1881—1948 гг.) — американский физикохимик и физик; автор трудов по химической кинетике, статистической механике, теории относительности и релятивистской космологии.

Уатт, Джеймс (Watt, James, 1736—1819 гг.) — английский изобретатель, создатель универсального теплового двигателя. В 1774—1784 гг. изобрёл паровую машину с цилиндром двойного действия. Уатт ввёл первую единицу мощности — лошадиную силу, позднее его именем была названа другая единица мощности — ватт.

Уитстон, Чарльз (Wheatstone, Charles, 1802—1875 гг.) — английский электротехник. Предложил метод измерения продолжительности разрядной искры (1834 г.); показал, что искровые спектры металлов однозначно характеризуют эти металлы (1835 г.). В 1844 г. предложил мостовой метод

электрических измерений; в 1858 г. создал телеграфный аппарат Уитстона; в 1867 г. открыл принцип самовозбуждения электрических машин; изобрёл ряд приборов.

Умов, Николай Алексеевич (1846—1915 гг.) — русский физик-теоретик, профессор Московского университета (1893—1911 гг.; ушёл в отставку в знак протеста против реакционной политики министра просвещения). Ввёл понятие плотности потока энергии, сформулировал уравнение движения энергии. Труды по земному магнетизму, диффузии и др. Президент Московского общества испытателей природы (с 1897 г.).

Фарадэй, Майкл (Faraday, Michael, 1791—1867 гг.) — английский химик и физик, основоположник учения об электромагнитном поле, обнаружил химическое действие электрического тока, взаимосвязь между электричеством и магнетизмом, магнетизмом и светом, в 1831 г. открыл электромагнитную индукцию, в 1833—1834 гг. установил законы электролиза Фарадея, открыл пара- и диамагнетизм, вращение плоскости поляризации света в магнитном поле (эффект Фарадея), доказал тождественность различных видов электричества, ввёл понятия электрического и магнитного поля, высказал идею существования электромагнитного поля.

Фейнман, Ричард Филипс (Feynman, Richard P., 1918—1988 гг.) — американский физик-теоретик, один из основателей квантовой электродинамики, реформатор методов преподавания физики в вузе. Известен своей способностью ясно объяснять многие непонятные физические идеи простыми словами. Изобрёл диаграммы, сегодня известные как диаграммы Фейнмана, описывающие поведение систем взаимодействующих частиц. За это и другие работы по теории квантового поля и квантовой электродинамики Фейнман разделил в 1965 г. Нобелевскую премию по физике с Синъитиро Томонагой (Tomonaga, 1906—1979 гг.) и Дж. Швингером (Schwinger). Больше прочесть о Фейнмане и увидеть его лекции в Новой Зеландии можно в Интернете: <http://www.feynman.com/> и <http://www.vega.org.uk/series/lectures/feynman/index.php>.

Флеминг (Fleming, Sir John Ambrose, 1849—1945 гг.) — английский электроинженер. В 1904 г. изобрёл электронную лампу.

Форест (Де Форест), Ли (De Forest, 1873—1961 гг.) — американский радиотехник. Окончил Йельский университет (1896 г.). Руководил рядом радиотехнических предприятий в США. В 1906 г. изобрёл триод (патент 1907 г.) и создал на его основе ламповый детектор и усилитель. Разработал систему радиотелеграфной связи, принятую в начале XX в. в армии и на флоте США.

Работал в области радиотелефонии; осуществил первые вещательные музыкальные передачи по проводам (1910 г.). Создал систему звукозаписи (1916 г.). Автор многих других изобретений в области радиотехники и звукового кино.

Фрэнклин, Бенджамин (Franklin, Benjamin, 1706—1790 гг.) — американский просветитель, государственный деятель, учёный, один из авторов Декларации независимости США (1776 г.) и Конституции (1787 г.). Известен трудами по электричеству, разработал его унитарную теорию, один из пионеров исследований атмосферного электричества, предложил молниеотвод.

Фрэнкель, Яков Ильич (1894—1952 гг.) — советский физик-теоретик, выпускник Физико-математического факультета Петербургского университета, ввёл понятия экситона и дефектов в кристаллах; автор трудов по электронной теории металлов, ферромагнетизму, кинетической теории жидкости, ядерной физике, электродинамике, физике твёрдого тела.

Хаксли, Эндрю Филдинг (Huxley, Sir Andrew Fielding, род. в 1917 г.) — английский физиолог; исследовал ионные механизмы генерации электрического тока в нейронах; обнаружил скольжение актиновых и миозиновых волокон при мышечном сокращении. Лауреат Нобелевской премии (1963 г., совместно с Эклсом и Ходжкином).

Хевисайд, Оливер (Heaviside, Oliver, 1850—1925 гг.) — английский физик; автор трудов по электродинамике. Независимо от Г. Герца записал уравнения Максвелла в современном виде; создал теорию передачи сигналов на дальние расстояния; указал на существование ионизированного слоя атмосферы (слой Хевисайда—Кеннели); один из создателей операционного и векторного исчислений.

Ходжкин, Алан Ллойд (Hodgkin, Alan Lloyd, 1914—1998 гг.) — английский физиолог; основные труды по физиологии нервной клетки и механизмам возбуждения и торможения; создатель современной мембранной теории возникновения биоэлектрических потенциалов. Лауреат Нобелевской премии (1963 г., совместно с Эклсом и Хаксли).

Хокинг, Стивен Уильям (Hawking, Stephen William, род. в 1942 г.) — британский физик-теоретик. В 1962 г он закончил Оксфордский университет и начал занятия теоретической физикой. Когда Хокингу был 21 год, у него стали проявляться признаки бокового амиотрофического склероза, и ему предсказывали раннюю смерть. С 1970 г. он прикован к креслу-коляске, а после операции на горле в 1985 г. потерял способность говорить и общается с помощью компьютерного синтезатора речи. В 1973 г. он связал общую теорию относи-

тельности с квантовой теорией, предсказав, что чёрные дыры "испаряются" за счёт явления, получившего название "излучение Хокинга". Хокинг занимает должность Лукасовского профессора математики в Кембриджском университете — должность, которую три столетия назад занимал Исаак Ньютон. Хокинг, который сегодня один из наиболее известных физиков, опубликовал несколько книг, среди которых "Краткая история времени", переведённая на 33 языка и проданная в количестве 10 миллионов экземпляров.
<http://www.hawking.org.uk>

Чаговёц, Василий Юрьевич (1873—1941 гг.) — российский физиолог, предложил первую ионную теорию биоэлектрических явлений; экспериментально обосновал теорию раздражающего действия электрического тока.

Эдисон, Томас Алва (Edison, Thomas Alva, 1847—1931 гг.) — американский изобретатель и предприниматель, организатор и руководитель первой американской промышленной исследовательской лаборатории (1872 г., Менло-Парк), иностранный почётный член АН СССР (с 1930 г.). Для деятельности Эдисона характерны практическая направленность, разносторонность, непосредственная связь с промышленностью. Автор свыше 1 000 изобретений, главным образом в различных областях электротехники. Изобрёл фонограф (1877 г.), усовершенствовал телеграф и телефон, лампу накаливания (1879 г.) и др., построил первую в мире электростанцию общественного пользования (1882 г.), обнаружил явление термоионной эмиссии (1883 г.) и др.

Эйнштейн, Альберт (Einstein, Albert, 1879—1955 гг.) — выдающийся физик, создатель теории относительности, один из создателей квантовой теории и статистической физики. Родился в Германии, в г. Ульме. С 14 лет вместе с семьёй жил в Швейцарии, где в 1900 г. окончил Цюрихский политехникум. В 22 года он стал гражданином Швейцарии. В 1902—1909 гг. служил экспертом патентного бюро в Берне. В 1905 г. опубликовал 3 статьи в ведущем немецком физическом журнале *Annalen der Physik*. В первой статье он предположил, что свет может вести себя как пакеты энергии, и что энергия этих световых квантов, как он их назвал, пропорциональна частоте. Он пошёл много дальше работы Планка и использовал эту интерпретацию для объяснения фотоэффекта. Вторая статья касалась статистической механики и объясняла броуновское движение. В третьей статье "К электродинамике движущихся тел" он предложил специальную теорию относительности, которая основывалась на двух постулатах: 1) физические законы одинаковы во всех инерциальных системах отсчёта и 2) скорость света одинакова во всех инерциальных системах отсчёта. Позднее в 1905 г. Эйнштейн обнаружил эквивалентность массы и энергии. В 1909 г. был избран профессором Цюрихского

университета, а затем — Немецкого университета в Праге. В 1914 г. Эйнштейн был приглашён преподавать в Берлинский университет. В 1915 г. Эйнштейн опубликовал общую теорию относительности, которая предсказывала, что свет от удалённых звёзд должен слегка отклоняться при прохождении мимо Солнца, что было подтверждено во время солнечного затмения в 1919 г. За открытие законов фотоэффекта и работы в области теоретической физики Эйнштейн получил в 1921 г. Нобелевскую премию по физике. С 1933 г. работал над проблемами космологии и единой теории поля. В 1933 г. после прихода к власти в Германии фашистов Эйнштейн эмигрировал в США, в Принстон, где до конца жизни работал в Институте высших исследований. В 1940 г. стал гражданином США. Эйнштейн был членом многих академий мира и научных обществ. В 1926 г. его избрали почётным членом Академии наук СССР. Больше об Эйнштейне: <http://www.westegg.com/einstein/> и <http://www.aip.org/history/einstein/>

Эпинус, Франц Ульрих Теодор (Aepinus, F.U.Th., 1724—1802 гг.) — российский физик немецкого происхождения. Исследовал пироэлектричество; в 1759 г. сделал попытку математической трактовки электрических и магнитных явлений.

Эренфест, Пауль (Павел Сигизмундович) (Ehrenfest, Paul, 1880—1933 гг.) — физик-теоретик, иностранный член-корреспондент РАН (1924 г.) и АН СССР (1925 г.). Родился в Вене, в 1907—1912 гг. работал в Санкт-Петербурге, способствовал развитию теоретической физики в России. С 1912 г. в Нидерландах. Автор трудов по термодинамике, статистической механике, теории относительности, квантовой теории. В 1933 г. ввёл понятие фазовых переходов 2-го рода. Создал научную школу.

Эрстед, Ханс Кристиан (Ørsted, Hans Christian, 1777—1851 гг.) — датский физик. Автор трудов по электричеству, акустике, молекулярной физике. Важнейшая научная заслуга Эрстеда — установление связи между электрическими и магнитными явлениями в опытах по отклонению магнитной стрелки под действием проводника с током. Сообщение об этих опытах, опубликованное в 1820 г., вызвало большое число исследований, которые в итоге привели к созданию электродинамики и электротехники. Почётный член Петербургской АН (с 1830 г.).

Яблочков, Павел Николаевич (1847—1894 гг.) — русский изобретатель электротехник, изобрёл дуговую лампу (патент 1876 г.), названную "свечой Яблочкова". Свеча Яблочкова совершила подлинный переворот в технике электрического освещения. Значительные заслуги в разработке конструкций генераторов постоянного тока, а также в создании гальванических элементов

и аккумуляторов. В частности, построил элемент, в котором в качестве источника тока непосредственно использовалась химическая реакция горения. Занимался разработкой электродвигателя для экипажа и на одну из выдвинутых им идей электромобиля даже получил авторский документ-привилегию.

Яко́би, Борис Семёнович (Мориц Герман) (1801—1874 гг.) — российский физик и электротехник немецкого происхождения; труды по практическому применению электричества, по военной электротехнике, электрическим измерениям, метрологии; в 1834 г. изобрёл электродвигатель и в 1838 г. опробовал его для привода судна; в 1838 г. разработал гальванотехнику; в 1840—1850 гг. создал несколько типов телеграфных аппаратов; совместно с Ленцем исследовал электромагниты.

Интернет-ресурсы

- <http://scienceworld.wolfram.com/biography/> (биографии)
- <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/Gallery/GalleryMenu.html> (фотогалерея)

Список литературы

1. Айзензон А. Е. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1996.
2. Ахиезер А. И. Общая физика. Электрические и магнитные явления: Справочное пособие. — Киев: Наук. думка, 1981.
3. Бармасов А. В., Бобкова И. С., Высоцкая С. О. и др. Описания лабораторных работ Учебной лаборатории физического эксперимента физического факультета СПбГУ. Часть IV: Электричество. Постоянный электрический ток / Под ред. В. И. Короткова, Е. П. Зароченцевой. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007.
4. Большая российская энциклопедия: В 30 т. / Председатель Науч.-ред. совета Ю. С. Осипов. Отв. ред. С. Л. Кравец. — М.: Большая Российская энциклопедия, 2004.
5. Большая советская энциклопедия: В 30 т. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — 3-е изд. — М.: Советская энциклопедия, 1970—77.
6. Большой энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Советская энциклопедия, 1993.
7. Брегг В. Г. История электромагнетизма. — М.-Л.: Гостехиздат, 1947.
8. Брюханов А. В., Пустовалов Г. Е., Рыдник В. И. Толковый физический словарь. Основные термины: около 3 600 терминов. — 2-е изд., испр. — М.: Русский язык, 1988.
9. Булкин П. С., Попова И. И. Общий физический практикум. Молекулярная физика: Учеб. пособие. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988.
10. Геворкян Р. Г. Курс физики: Учебное пособие. — М.: Высшая школа, 1979.
11. Геворкян Р. Г., Шепель В. В. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Высшая школа, 1972.
12. Глазунов А. Т., Кабардин О. Ф., Калинин А. Н., Орлов В. А., Пинский А. А. Физика. — М.: Просвещение, 2003.

13. Гомонова А. И. Пособие по физике: учебник. — М.: Изд-во Московского университета, 1991.
14. ГОСТ 8033-56 "Электрические и магнитные единицы".
15. Грибов Л. А., Прокофьева Н. И. Основы физики. — М.: Наука, 1995.
16. Гурский И. П. Элементарная физика с примерами решения задач, учебное пособие. — Изд. 2-е, перераб. и дополн. — М.: Наука, 1976.
17. Дамаскин Б. Б., Петрий О. А. Электрохимия: Учеб. пособие для хим. фак. ун-тов. — М.: Высшая школа, 1987.
18. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. — М.: Высшая школа, 2000.
19. Детлаф А. А., Яворский Б. М., Милковская Л. Б. Курс физики (в трёх томах). Том II. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие для вузов. — Изд. 4-е, перераб. — М.: Высшая школа, 1977.
20. Джанколи Д. Физика. — М.: Мир, 1989. — 669 с.
21. Джексон Дж. Классическая электродинамика / Пер. с англ. — М.: Мир, 1965.
22. Дмитриева В. Ф. Физика. — М.: Высшая школа, 1993.
23. Евграфова Н. Н., Каган В. Л. Курс физики для подготовительных отделений вузов: Учеб. пособие. — 3-е изд., испр. и перераб. — М.: Высшая школа, 1984.
24. Енохович А. С. Справочник по физике. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Просвещение, 1990.
25. Жданов Л. С., Маранджян В. А. Курс физики. — М.: Наука, 1968.
26. Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. — М.: Наука, 1972, т. 1—3.
27. Иродов И. Е. Электромагнетизм. — М.: БИНОМ, 2006.
28. Кабардин О. Ф. Факультативный курс физики. Пособие для уч-ся. — Изд. 2-е, перераб. — М.: Просвещение, 1978.
29. Кабардин О. Ф. Физика: Справочник. — М.: АСТ-ПРЕСС ШКОЛА, 2003.
30. Калашников С. Г. Электричество. — М.: Наука, 1977.
31. Карцев Вл. П. Приключения великих уравнений. — М.: Знание, 1970.
32. Касаткин А. С. Основы электротехники. — М.-Л.: Энергия, 1966.
33. Кикин Д. Г. Физика (с основами астрономии). — М.: Высшая школа, 1995.

34. Кляус Е. М. Поиски и открытия. — М.: Наука, 1986.
35. Комаров В. А., Кашкевич М. П., Мовчан И. Б. Геофизические поля сфероидальной формы. — СПб.: СПбГУ, 1998.
36. Кондратьев А. С. Физика. Часть II. Электродинамика. — СПб.: Специальная литература, 1999.
37. Кошкин Н. И., Васильчикова Е. Н. Элементарная физика. Справочник. — М.: АО "Столетие", 1996.
38. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. — Изд. 6-е, стер. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974.
39. Кудрявцев П. С. Курс истории физики: Учеб. пособие для студентов пед. ин-тов по физ. спец. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Просвещение, 1982.
40. Ландау Л. Д., Китайгородский А. И. Физика для всех. — М.: Наука, 1978.
41. Лебедев В. И. Исторические опыты по физике. — Изд. 3-е, стер. — М.: КомКнига, 2007.
42. Луцевич А. А., Яковенко С. В. Физика. — Минск: Высшая школа, 2000.
43. Льюцци М. История физики / Пер. с итал. — М.: Мир, 1970.
44. Марковский Ф. Т. Общая электротехника. — М.: Машгиз, 1963.
45. Марон В. Е., Городецкий Д. Н. Физика: Законы, формулы, задачи: Справочное пособие. — Минск: Высшая школа, 1986.
46. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. — М.: Высшая школа, 1983.
47. Матвеев Б. К. Электроразведка. — 2-е изд. — М.: Недра, 1990.
48. Мерион Дж. Б. Общая физика с биологическими примерами. — М.: Высшая школа, 1986.
49. Орир Дж. Физика. Том 1, Том 2. — М.: Мир, 1981.
50. Павленко Ю. Г. Физика. — М.: Новая волна, 2002.
51. Парселл Э. Курс физики. Электричество и магнетизм / Пер. с англ. — 3-е изд. — М.: Наука, 1983. (Берклеевский курс физики. Том 2).
52. Пёрышкин А. В. Курс физики. Часть 3. Электричество, оптика и строение атома. — Изд. 15-е. — М.: Просвещение, 1968.
53. Политехнический словарь / Редкол.: А. Ю. Ишлинский (гл. ред.) и др. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Советская энциклопедия, 1989.
54. Поль Р. В. Учение об электричестве. — М.: ГИФМЛ, 1962.

55. Поройков И. В. Краткий курс лекций по физике. — М.: Высшая школа, 1965.
56. Ремизов А. Н. Медицинская и биологическая физика: Учеб. для мед. спец. вузов. — 3-е изд., испр. — М.: Высшая школа, 1999.
57. Роуэлл Г., Герберт С. Физика. — М.: Просвещение, 1994.
58. Савельев И. В. Курс общей физики: Учебное пособие. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. — 2-е изд., перераб. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982.
59. Савельев И. В. Курс общей физики: Книга 2. Электричество и магнетизм. — М.: Астрель, 2001.
60. Семёнов М. В., Сапожников В. М., Авдевич М. М., Голиков Ю. В. Электроразведка рудных полей методом заряда. — Л.: Недра, 1984.
61. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности: Учебно-справочное руководство. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1988.
62. Сивухин Д. В. Общий курс физики. — М.: Наука, 1990, т. 1—5.
63. Сивухин Д. В. Общий курс физики: Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Том 3. Электричество. — 4-е изд., стереот. — М.: ФИЗМАТЛИТ, Изд-во МФТИ, 2004.
64. Спиридонов О. П. Фундаментальные физические постоянные. — М.: Высшая школа, 1991.
65. Справочник по химии. Для учащихся сред. школы / Сост. П. И. Воскресенский, К. Я. Парменов, Л. А. Цветков, Д. А. Эпштейн. — М.: Просвещение, 1970.
66. Тамм И. Е. Основы теории электричества. — М.: Наука, 1966.
67. Телеснин Р. В., Яковлев В. Ф. Курс физики. Электричество. — М.: Просвещение, 1970.
68. Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — Изд. 9-е, перераб. и доп. — М.: Издательский центр "Академия", 2004.
69. Трофимова Т. И. Справочник по физике для студентов и абитуриентов. — М.: ООО "Издательство Астрель": ООО "Издательство АСТ", 2001.
70. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Электричество и магнетизм. — М.: Мир, 1977.

71. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. — М.: Большая Российская энциклопедия.
72. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. — М.: Сов. энциклопедия, 1984.
73. Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики. Том II. Электрические и электромагнитные явления. — М.: Гос. изд. физ.-мат. литер., 1962.
74. Хмелевский В. К. и др. Геофизические методы исследования / Под ред. В. К. Хмелевского. — М.: Недра, 1988.
75. Храмов Ю. А. Физики. Биографический справочник. — 2-е изд. — М.: Наука, 1983.
76. Чертов А. Г. Единицы физических величин. Учеб. пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1977.
77. Шахмаев Н. М. Физика. Электричество. — М.: Высшая школа, 1977.
78. Электрические измерения / Под ред. К. К. Илюнина. — 2-е изд. — Л.: Энергия, 1977.
79. Электроразведка: Справочник геофизика. Кн. I. — М.: Недра, 1989.
80. Элементарный учебник физики / Под редакцией академика Г. С. Ландсберга. Том II. Электричество и магнетизм. — М.: Физматлит, 2001.
81. Яворский Б. М., Селезнёв Ю. А. Справочное руководство по физике для поступающих в вузы и самообразования. — М.: Наука, 1984.
82. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Том 1. Механика, молекулярная физика, электродинамика. — М.: Наука, 1981.
83. Якубовский Ю. В., Ренард И. В. Электроразведка. — М.: Недра, 1991.
84. Bureau International des Poids et Mesures, Le Système International d'Unités (SI). — 5th French and English Edition. — Sevres : BIPM, 1985.
85. Cohen E. R. and Taylor B. N. The 1986 Adjustment of the Fundamental Physical Constants // CODATA Bull. — 1986. — V. 63. — P. 1—49.
86. Feynman P. Richard, Leighton B. Robert, Sands Matthew. The Feynman Lectures on Physics. Reading, Massachusetts, Palo Alto, London: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1963.

87. Internationally Adopted Values // Успехи физических наук. — 2003. — Т. 173, № 3.
88. Nordling C., Österman J. Physics Handbook for Science and Engineering. — 8th ed. — Lund: Studentlitteratur, 2006.

Дополнительная литература

Литература к Главе 1

- Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Том II. Электричество и магнетизм. — 4-е изд. — М.: Наука, 1969, § 1, 3.
- Калашников С. Г. Электричество. — М.: Наука, 1977, § 1—4, 144.
- Китайгородский А. И. Электроны. — М.: Наука, 1984.
- Куцый П. Ф. Повелители молний. Из истории электричества. — Алма-Ата: Кайнар, 1965.
- Льюиси М. История физики / Пер. с итал. — М.: Мир, 1970.
- Савельев И. В. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов в 5 кн. Книга 2. Электричество и магнетизм. — 4-е изд., перераб. — М.: Наука. Физматлит, 1998, § 1.1—1.4.
- Сивухин Д. В. Электричество: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983, § 1—3, 90.
- Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, § 77, 78.
- Филонович С. Р. Судьба классического закона: Прошлое и настоящее закона Кулона. — М.: Наука, 1990.

Литература к Главе 2

- Говорков С. Г. Электрические и магнитные поля. — М.: Энергия, 1968.
- Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Том II. Электричество и магнетизм. — 4-е изд. — М.: Наука, 1969, § 2.

- Калашников С. Г. Электричество. — М.: Наука, 1977, § 8—12, 15.
- Савельев И. В. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов в 5 кн. Книга 2. Электричество и магнетизм. — 4-е изд., перераб. — М.: Наука. Физматлит, 1998, § 1.5, 1.9.
- Сивухин Д. В. Электричество: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983, § 2—4.
- Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, § 79, 80.

Литература к Главе 3

- Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Том II. Электричество и магнетизм. — 4-е изд. — М.: Наука, 1969, § 5—7.
- Калашников С. Г. Электричество. — М.: Наука, 1977, § 13, 14.
- Савельев И. В. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов в 5 кн. Книга 2. Электричество и магнетизм. — 4-е изд., перераб. — М.: Наука. Физматлит, 1998, § 1.13, 1.14, 2.5.
- Сивухин Д. В. Электричество: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983, § 5—7.
- Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, § 81, 82.

Литература к Главе 4

- Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Том II. Электричество и магнетизм. — 4-е изд. — М.: Наука, 1969, § 8.
- Калашников С. Г. Электричество. — М.: Наука, 1977, § 16, 17, 19, 20, 24.
- Козлов В. И. Общий физический практикум. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие / Под ред. А. Н. Матвеева, Д. Ф. Киселёва. — М.: Изд-во МГУ, 1987, § 2.
- Математическая энциклопедия. Тома 1—5: Гл. ред. И. М. Виноградов. — М.: Советская Энциклопедия, 1984.

- Савельев И. В. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов в 5 кн. Книга 2. Электричество и магнетизм. — 4-е изд., перераб. — М.: Наука. Физматлит, 1998, § 1.6, 1.8, 1.12.
- Сивухин Д. В. Электричество: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983, § 18—20.
- Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, § 84, 85.

Литература к Главе 5

- Барфут Дж. Введение в физику сегнетоэлектрических явлений. — М.: Мир, 1970.
- Барфут Дж., Тейлор Дж. Полярные диэлектрики и их применения / Пер. с англ. под ред. Л. А. Шувалова. — М.: Мир, 1981.
- Бондарев В. П. Основы минералогии и кристаллографии. — М.: Высшая школа, 1978.
- Дмитриева В. Ф. Физика. — М.: Высшая школа, 1993.
- Жданов Л. С., Маранджян В. А. Курс физики. — М.: Наука, 1968.
- Желудев И. С. Физика кристаллических диэлектриков. — М.: Наука, 1968.
- Желудев И. С. Электрические кристаллы. — М.: Наука, 1969.
- Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Том II. Электричество и магнетизм. — 4-е изд. — М.: Наука, 1969, § 10.
- Иона Ф., Ширине Д. Сегнетоэлектрические кристаллы. — М.: Мир, 1965.
- Калашников С. Г. Электричество. — М.: Наука, 1977, § 38, 39, 41—43, 50—52.
- Кондрашев С. Н. Пьезоэлектрический метод разведки. — М.: Недра, 1970.
- Корицкий Ю. В. Электротехнические материалы: учебник для техникумов. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Энергия, 1976.
- Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. К теории дисперсной магнитной проницаемости ферромагнитных тел [1935] / В кн. Ландау Л. Д. Собр. трудов. Том 1. — М.: Наука, 1969.

- Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. — 2-е изд. — М.: Наука, 1982.
- Мэзон У. Пьезоэлектрические кристаллы и их применения в ультразвуке. — М.: Иностранная литература, 1952.
- Най Дж. Физические свойства кристаллов. — М.: Иностранная литература, 1960.
- Нейштадт Н. М., Мазанова З. В., Суворов Н. Д. Сейсмо- и пьезоэлектрические явления в разведочной геофизике. — СПб.: Недра, 1992.
- Нейштадт Н. М. Пьезоэлектрические явления в разведочной геофизике. — СПб.: Недра, 1992.
- Попов Г. М., Шафрановский И. И. Кристаллография. — М.: Высшая школа, 1964.
- Савельев И. В. Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика: Учебное пособие. — 2-е изд., перераб. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982, § 15, 19, 21.
- Савельев И. В. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов в 5 кн. Книга 2. Электричество и магнетизм. — 4-е изд., перераб. — М.: Наука. Физматлит, 1998, § 2.1, 2.2, 2.7, 2.9.
- Сивухин Д. В. Электричество: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983, § 12, 35—39.
- Смоленский Г. А., Боков В. А., Исупов В. А. и др. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. — Л.: Наука, 1971.
- Смоленский Г. А., Крайник Н. Н. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. — М.: Наука, 1968.
- Струков Б. А. Сегнетоэлектричество. — М.: Наука, 1979.
- Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, § 87, 90, 91.
- Фрёлих Г. Теория диэлектриков. — М.: Иностранная литература, 1960.
- Шаскольская М. П. Кристаллография. — М.: Высшая школа, 1976.
- Шаскольская М. П. Очерки о свойствах кристаллов. — М.: Наука, 1978.

Литература к Главе 6

- Абрикосов А. А. Введение в теорию нормальных металлов. — М.: Наука, 1972.
- Ануфриев Ю. А., Гусев В. Н., Смирнов В. Ф. Эксплуатационные характеристики и надёжность электрических конденсаторов. — М.: Энергия, 1976.
- Виноградов Ю. В. Основы электронной и полупроводниковой техники. — Изд. 2-е, доп. — М.: Энергия, 1972.
- Ермуратский В. В. Где и как применяются конденсаторы. — Кишинёв: Штииница, 1981.
- Ермуратский В. В. Справочник по электрическим конденсаторам. — Кишинёв: Штииница, 1982.
- Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Том II. Электричество и магнетизм. — 4-е изд. — М.: Наука, 1969, § 9, 12, 13, 19, 21.
- Каганов М. И. Электроны, фононы, магноны. — М.: Наука, 1979.
- Калашников С. Г. Электричество. — М.: Наука, 1977, § 14, 29, 31, 32, 35, 37, 145—147, 151.
- Конденсаторы. Справочник. — М.: Радио и связь, 1987.
- Носов О. Н. Оптоэлектроника. — М.: Высшая школа, 1976.
- Рене В. Т. Электрические конденсаторы. — Л.: Энергия, 1989.
- Савельев И. В. Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика: Учебное пособие. — 2-е изд., перераб. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982, § 77, 78.
- Савельев И. В. Курс общей физики: Учебное пособие для втузов в 5 кн. Книга 2. Электричество и магнетизм. — 4-е изд., перераб. — М.: Наука. Физматлит, 1998, § 3.1, 3.3, 3.4, 4.2, 4.3, 11.1, 11.2.
- Сивухин Д. В. Электричество: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983, § 26, 28.
- Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, § 82, 93—95, 102.
- Френкель Я. И. Теория металлов. — М.: Изд-во АН СССР, 1933.

Литература к Главе 7

- Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы: учебник для вузов. — 7-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат, 1985.
- Вознесенская З. С. Электрические лампы накаливания. — М.: Госэнергоиздат, 1953.
- Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Том II. Электричество и магнетизм. — 4-е изд. — М.: Наука, 1969, § 14—18, 28.
- Иванов А. П. Электрические источники света. Ч. 1. Лампы накаливания. — М.-Л.: ГОНТИ, 1938.
- Калашников С. Г. Электричество. — М.: Наука, 1977, § 53, 57—61, 65—68, 70, 71, 145.
- Корицкий Ю. В. Электротехнические материалы: учебник для техникумов. — Изд. 3-е, перераб. — М.: Энергия, 1976.
- Савельев И. В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987, § 55, 56.
- Савельев И. В. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов в 5 кн. Книга 2. Электричество и магнетизм. — 4-е изд., перераб. — М.: Наука. Физматлит, 1998, § 5.1, 5.3—5.8.
- Сивухин Д. В. Электричество: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983, § 40—45, 97.
- Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю. Б. Айзенберга. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
- Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, § 96—99, 101, 103.

Литература к Главе 8

- Алексеев В. В. Физика и экология. — М.: Знание, 1978.
- Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия. — М.: Высшая школа, 1975.

- Астапенко П. Д. Вопросы о погоде. — 3-е изд. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987.
- Багоцкий В. С., Скундин А. М. Химические источники тока. — М.: Энергоиздат, 1981.
- Базелян Э. М., Горин Б. Н., Левитов В. И. Физические и инженерные основы молниезащиты. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978.
- Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащиты. — М.: Физматлит, 2001.
- Барри Дж. Шаровая молния и чёточная молния / Пер. с англ. под ред. А. В. Елецкого. — М.: Мир, 1983.
- Будыко М. И., Ронов А. Б., Яншин А. Л. История атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985.
- Главач А. Молния и человек / Пер. со словац. Б. В. Локка. — Алма-Ата: Казахстан, 1989.
- Жеребцов И. П. Основы электроники. — М.: Энергия, 1977.
- Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Том II. Электричество и магнетизм. — 4-е изд. — М.: Наука, 1969, § 24—26.
- Иванов А. П. Электрические источники света. Лампы газового разряда. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948.
- Имянитов И., Тихий Д. За гранью законов науки. — М.: Атомиздат, 1980.
- Калашников С. Г. Электричество. — М.: Наука, 1977, § 66—68, 156—161, 166—177, 189—197.
- Камалдина И. И. Исследование условий поражения самолётов молниями в негрозовых зонах. — М.: Мир, 1983.
- Карякин Н. А. Угольная дуга высокой интенсивности. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948.
- Квасов Н. Т. Шаровая молния: гипотезы и факты. — Минск: Университетское издательство, 1989.
- Коровин Н. В. Новые химические источники тока. — М.: Энергия, 1978.
- Лаврус В. С. Батарейки и аккумуляторы. — К.: Наука и техника, 1995.
- Леонов Р. А. Загадка шаровой молнии. — М.: Наука, 1985.
- Мурыгин И. В. Электродные процессы в твёрдых электролитах. — М.: Наука, 1991.

- Робинсон Р., Стокс Р. Растворы электролитов / Пер. с англ. — М.: Издательский центр «Издательство МГУ», 1963.
- Рохлин Г. Н. Газоразрядные источники света. — М.-Л.: Энергия, 1966.
- Савельев И. В. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов в 5 кн. Книга 2. Электричество и магнетизм. — 4-е изд., перераб. — М.: Наука. Физматлит, 1998, § 12.1, 12.2, 12.4—12.8.
- Самойлов О. Я. Структура водных растворов электролитов и гидратация ионов. — М.: Изд. АН СССР, 1957.
- Сивухин Д. В. Электричество: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983, § 92—94, 96, 101—103, 109—121.
- Сингер С. Природа шаровой молнии. — М.: Мир, 1973.
- Смирнов Б. М. Загадка шаровой молнии. — М.: Знание, 1987.
- Смирнов Б. М. Проблема шаровой молнии. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.
- Стаханов И. П. О физической природе шаровой молнии. — 2-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
- Стаханов И. П. Физическая природа шаровых молний. — М.: Атомиздат, 1979.
- Томилин А. Н. Мир электричества. — М.: Дрофа, 2004.
- Троицкий О. А. Молнии — оружие богов. — М.: Информэлектро, 1998.
- Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — 6-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 1999, § 97, 105, 106.
- Трухин В. И., Показеев К. В., Куницын В. Е. Общая и экологическая геофизика. — М.: Физматлит, 2005.
- Уэймаус Д. Газоразрядные лампы. — М.: Энергия, 1977.
- Федин Л. А., Барский И. Я. Микрофотография. — Л.: Наука, 1971.
- Фугенфиров М. И. Электрические схемы с газоразрядными лампами. — М.: Энергия, 1974.
- Хорнед Г., Оуэн Б. Физическая химия растворов электролитов. — М.: Иностранная литература, 1952.

- Шимони К. Физическая электроника. — М.: Мир, 1977.
- Энгель А. Ионизированные газы / Пер. с англ. — М.: Физматгиз, 1959.
- Энгель А., Штенбек М. Физика и техника электрического разряда в газах: В 2-х т. — М.: ОНТИ, 1935.

Литература к Главе 9

- Аузин А. К. Электроразведка. — М.: Недра, 1977.
- Белоусов В. В. Переходные зоны между континентами и океанами. — М.: Недра, 1982.
- Беляевский Н. А. Строение земной коры континентов по геолого-геофизическим данным. — М.: Недра, 1981.
- Берлинский А. И. Разделение минералов. — М.: Недра, 1988.
- Богданов К. Ю. Физик в гостях у биолога. — М.: Наука, 1986.
- Берлинский А. И. Разделение минералов. — М.: Недра, 1988.
- Бобровников Л. З., Кадыров И. Н., Попов В. А. Электроразведочная аппаратура и оборудование. — М.: Недра, 1979.
- Бондаренко В. М., Демура Г. В., Ларионов А. М. Общий курс геофизических методов разведки. — М.: Недра, 1986.
- Боровко Н. Н. Оптимизация геофизических исследований при поисках рудных месторождений. — Л.: Недра, 1979.
- Бродовой В. В. Геофизические исследования в рудных провинциях. — М.: Недра, 1984.
- Ваньян Л. Л. Становление электромагнитного поля и его использование для решения задач структурной геологии. — Наука, 1966.
- Вахромеев Г. С. Основы методологии комплексирования геофизических исследований при поисках рудных месторождений. — М.: Недра, 1978.
- Великий А. С. Структуры рудных полей. — Л.: Издательство ЛГУ, 1961.
- Гавриленко В. В. Многогранная геология. — СПб.: Издательство ВНИИ Океангеология, 2004.
- Грюнер-Шлюмберже А. Волшебная шкатулка, или Источники нефти. Воспоминания / Пер. с фр. Общ. ред. и предисл. В. В. Белого. — М.: Издательская группа "Прогресс", "Культура", 1993.

- Гушенский Б. М. Основы физико-химии грунтов и их использование в строительстве. — Л.-М.: Стройиздат, 1965.
- Жданов М. С. Электроразведка: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1986.
- Заборовский А. И. Электроразведка. — М.: Гостоптехиздат, 1963.
- Иванов А. Г. Физика в разведке земных недр. — М.: Недра, 1971.
- Камен Х. Электронные способы измерений в геодезии. — М.: Недра, 1982.
- Кауфман А. А. Основы теории индуктивной рудной электроразведки. — Новосибирск: Наука, 1974.
- Кири П., Брукс М. Введение в геофизическую разведку. — М.: Мир, 1988.
- Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород. — М.: Гостоптехиздат, 1962.
- Ковтун А. А. Использование естественного электромагнитного поля при изучении электропроводности Земли: Учеб. пособие. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1980.
- Ковтун А. А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы по данным магнитотеллурических зондирований. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1989.
- Комаров В. А., Кашкевич М. П., Мовчан И. Б. Геофизические поля сфероидальной формы. — СПб.: СПбГУ, 1998.
- Кондрашев С. Н. Пьезоэлектрические методы разведки. — М.: Недра, 1970.
- Копченова Е. В. Минералогический анализ шлихов и рудных концентратов. — М.: Недра, 1979.
- Матвеев Б. К. Электроразведка. — 2-е изд. — М.: Недра, 1990.
- Матвеев Б. К. Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 1982.
- Нейштадт Н. М., Мазанова З. В., Суворов Н. Д. Сейсмо- и пьезоэлектрические явления в разведочной геофизике. — СПб.: Недра, 1992.
- Нейштадт Н. М. Пьезоэлектрические явления в разведочной геофизике. — СПб.: Недра, 1992.
- Олофинский Н. Ф. Электрические методы обогащения. — М.: Недра, 1970.

- Пархоменко Э. И., Бондаренко А. Т. Электропроводность горных пород при высоких давлениях и температуре. — М., 1979.
- Пархоменко Э. И. Электрические свойства горных пород. — М.: Наука, 1989.
- Полиранц Л. И., Белоконь Д. В., Козяр В. Ф. Аппаратура и оборудование геофизических методов исследования скважин. — М.: Недра, 1985.
- Поляков А. С. Руководство по методу заряда. — М.: Недра, 1969.
- Поляков А. С. Электроразведка методом заряда. — Л.: Недра, 1970.
- Потапов О. А., Лизун С. А., Кондрат В. Ф. и др. Основы сейсмоэлектро-разведки. — М.: Недра, 1995.
- Путиков О. Ф. Геоэлектрохимические методы поисков и разведки. — Л., 1980.
- Разумная Е. Г., Берлинский А. И., Ершова К. С. Методы сепарации руд и горных пород / В кн.: Методы минералогических исследований. — М.: Недра, 1985.
- Рокитянский И. И. Индукционное зондирование Земли. — Киев: Наукова думка, 1981.
- Сверхпроводимость в геоэлектро-разведке / Под ред. В. С. Суркова, Э. В. Матизена. — Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1977.
- Семёнов М. В., Сапожников В. М., Авдевич М. М., Голиков Ю. В. Электроразведка рудных полей методом заряда. — Л.: Недра, 1984.
- Семёнов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Л.: Недра, 1974.
- Серeda Н. Г. Соловьев Е. М. Геофизика. — М.: Недра, 1988.
- Современные методы исследования минералов, горных пород и руд: Учеб. пособие. — СПб.: Горный институт, 1997.
- Соколов К. П. Геофизические методы разведки. — Л.: Недра, 1966.
- Тархов А. Г. Электроразведка. Справочник геофизика. — М.: Недра, 1980.
- Татаринoв П. М., Карякин А. Е. Курс месторождений твёрдых полезных ископаемых. — М.: Недра, 1975.
- Федынский В. В. Разведочная геофизика. — Изд. 2-е. — М.: Недра, 1967.
- Шарма П. Геофизические методы в региональной геологии. — М.: Мир, 1989.

- Электрическое зондирование геологической среды. Часть 1 / Под ред. В. К. Хмелевского, В. А. Шевнина. — М.: Изд-во МГУ, 1988.
- Электроразведка. Справочник геофизика. — М.: Недра, 1979.
- Электроразведка. Справочник геофизика в двух книгах / Под ред. В. К. Хмелевского и В. М. Бондаренко. — М.: Недра, 1989.
- Якубовский Ю. В., Ляхов Л. Л. Электроразведка. — 5-е изд. — М.: Недра, 1988.
- Якубовский Ю. В., Ляхов Л. Л. Электроразведка: Учебник для техников. — 4-е изд., перераб. — М.: Недра, 1982.
- Якубовский Ю. В., Ренард И. В. Электроразведка. — М.: Недра, 1991.
- Якубовский Ю. В. Электроразведка. — М.: Недра, 1973.

Предметный указатель

А

Абсолютная диэлектрическая
проницаемость вакуума 43
Абсолютная диэлектрическая
проницаемость среды 44
Абсолютный нормальный
потенциал 246
Аккумулятор электрический 250
Активная электрическая
проводимость 195
Акустоэлектрический эффект 208
Ампер 192
Ампер-секунда 41
Ампер-час 41
Анизотропия 126
Анизотропная поляризуемость
Анион 245
Анод 235, 249, 260
Антисегнетоэлектрики 138
Астоново свечение 283
Астоново тёмное пространство 283
Атомная поляризуемость 113

Б

Биологический электрогенез 311
Биоэлектрогенез 311
Блуждающие электроны Френкеля 156

В

Вариконд 170
Ватт 211
Вектор:
 напряженности 49
 электрического смещения 66
 электрической индукции 66
Вертикальное электрическое
зондирование 339
Вихрь 93
Внутреннее сопротивление 225
Вольт 99
Вольт-амперная характеристика 194
Вольтова дуга 287
Второе правило Кирхгофа 228
Второй закон Фарадея
 для электролиза 244
Высокочастотный (ВЧ) разряд 288

Г

Газ:
 ионизированный 275
 электронный 152
Газовый разряд 276
Газоразрядные источники света 300
Газосветная трубка 300
Галогенная лампа накаливания 216
Гальванический элемент 248

Гальванометр 42
Гальванопластика 241
Гальваностегия 241
Гальванотехника 241
Геоэлектрический разрез 332
Гептод 266
Гистерезис 134
Горные породы 318
Градиент 104
Грамм-эквивалент 245
Гроза 297

Д

Двойной электрический слой 321
Дивергенция 88
Диполь:
 ось 58
 электрический 58
Диэлектрик 109
 изотропный 126
 неполярный 110
 полярный 111
Диэлектрическая восприимчивость 116
Диэлектрическая проницаемость
 среды 37
Длина диполя 122
Домен 129
Дуговой разряд 282, 287

Е

Ёмкость 166
 аккумулятора 251
 электрическая 166

З

Заземление 161
Закон:
 Богуславского—Лёнгмюра 259
 взаимодействия электрических
 зарядов 21
 Видемана—Франца 221
 Джоуля в дифференциальной
 форме 213
 Джоуля—Ленца 211
 Кулона в системе СИ 43
 Кюри—Вейса 133
 Ома 195
 Ома в дифференциальной
 форме 209
 сохранения заряда 32
 трёх вторых 259
 Фарадея для электролиза, второй 244
 Фарадея для электролиза
 объединённый 244
 Фарадея для электролиза,
 первый 243
Заряд:
 абсолютный электрический 41
 пробный 48
 смещения 116
 точечный 31
 удельный 208
 электрический 29, 40
 электрический, линейная
 плотность 57
 электрический, объёмная
 плотность 56
 электрический, поверхностная
 плотность 57
 электрона 33
 элементарный электрический 33
Звёзды Диоскура 289

И

Излучение:

- рекомбинационное 284
- электронно-возбуждённых молекул газа 283

Изотропный диэлектрик 126

Ион 113

Ионизированный газ 275

Искровой разряд 289

Источник тока 224

объёмной ионизации 279

поляризуемости 113

рационализации 43

Криоэлектрет 148

Кристалл спонтанно
поляризованный 112

Критическая напряжённость поля 289

Круксово тёмное пространство 284

Крутизна 273

Кулон 41

К

Кажущееся сопротивление 337

Каротаж 340

Катион 245

Катод 235, 249, 261

Катодное свечение 284

Катодное тёмное пространство 284

Катодолюминесценция 285

Кенотрон 262

Количество электричества 40

Компенсация ЭДС 230

Конвекционный ток 187

Конденсатор:

- бумажный 169
- воздушный 169
- керамический 170
- плёночный 170
- плоский 80, 108, 171
- слюдяной 170
- цилиндрический 108, 173
- шаровой 107, 172
- электрический 79, 168
- электролитический 170

Концепция близкодействия 55

Коронный разряд 289

Коронозлектрет 148

Коррозия металлов 242

Коэффициент:

- анизотропии 324

Л

Лавина электронная 278

Лампа:

- галогенная 216
- ДРШ 301
- крутизна 273
- ксеноновая 303
- люминесцентная 300
- накаливания 215
- неоновая 304
- ртутная 301
- тлеющего свечения 304
- электронная 260

Лейденская банка 22

Линейная плотность электрического
заряда 57

Линии:

- напряженности 51
- силовые 51
- тока 188
- электрического смещения 67
- электрической индукции 67

Люминесцентная лампа 300

М

Магнетосопротивление 155

Магнетозлектрет 148

Метод:
 естественного поля 341
 заряда 342
 заряженного тела 342
 потенциала скважины 341
 Механоэлектрет 148
 Микрокаротаж 341
 Модуль пьезоэлектрический 140
 Молекула:
 неполярная 110
 полярная 111
 Молния 297
 шаровая 298
 Мост Уитстона 199

Н

Направление:
 линий тока 188
 полярное 141
 тока 187
 Напряжение:
 зажигания 281
 электрическое 223
 Напряженность:
 вектор 49
 линии 51
 поля 49
 поля критическая 289
 пробоя 289
 Неполярный диэлектрик 110
 Нормальный элемент 248
 Носители:
 заряда 186
 тока 186

О

Обкладка конденсатора 79
 Объединённый закон Фарадея для
 электролиза 244

Объёмная плотность электрического
 заряда 56
 Огни святого Эльма 289
 Ом 197
 Оператор набла 89
 Опыт:
 Милликена 32
 Стюарта–Толмена 206
 Основная задача электростатики 103
 Ось диполя 58
 Отрицательное свечение 284

П

Параллельное соединение
 конденсаторов 177
 Пентод 266
 Первое правило Кирхгофа 228
 Первый закон Фарадея
 для электролиза 243
 Переменный ток 187
 Петля гистерезиса 134
 Пирозлектрики 146
 Плоский конденсатор 80, 171
 Плотность:
 тока насыщения 294
 электрического тока 190
 Поверхностная плотность
 электрического заряда 57
 Поверхность эквипотенциальная 103
 Подвижность носителей зарядов 190
 Поле:
 деполаризирующее 130
 напряженность 49
 однородное 67
 потенциальное 92
 равномерно заряженного
 цилиндра 83
 равномерно заряженной сферы 82
 силовое 48
 шарового конденсатора 81
 шарового слоя 84

- электрическое 48
 - электростатическое 48
 - электростатическое, макроскопическое 56
 - электростатическое, микроскопическое 55
 - Полное сопротивление цепи 225
 - Поляризация 112
 - вектор 115
 - ионного смещения 114
 - остаточная 148
 - релаксационная 115
 - электронного смещения 114
 - Поляризованность единицы объема 115
 - Поляризуемость 113
 - анизотропная 113
 - атомная 113
 - среды 330
 - Полярное направление 141
 - Полярный диэлектрик 111
 - Последовательное соединение конденсаторов 178
 - Постоянная
 - Фарадея 244
 - электрическая 43
 - эмиссионная 268
 - Постоянный ток 186, 193
 - Потенциал:
 - абсолютный нормальный 246
 - действия 311
 - ионизации 155
 - покоя 310
 - точки 94
 - электрохимический 246
 - электрического поля 94
 - Поток:
 - вектора напряженности электростатического поля 71
 - вектора через поверхность 68
 - вектора электрического смещения 68
 - вектора электрической индукции 68
 - индукции 68
 - электрического смещения 68
 - Правило:
 - Кирхгофа, второе 228
 - Кирхгофа, первое 228
 - Принцип суперпозиции 53
 - Пробой, напряжённость 289
 - Проводимость 197
 - Проводник:
 - второго рода 151
 - первого рода 151
 - Проводник электрических зарядов 151
 - Пьезогироскоп 143
 - Пьезоэлектрический:
 - модуль 140
 - сейсмограф 143
 - эффект 139
 - Пьезоэффект 139, 142
 - обратный 143
 - поперечный 142
 - продольный 142
- ## P
- Работа:
 - выхода 256
 - ионизации 276
 - Радиоэлектрет 148
 - Разность потенциалов 98
 - Разрез геоэлектрический 332
 - Разряд:
 - высокочастотный (ВЧ) 288
 - газовый 276
 - дуговой 282, 287
 - искровой 289
 - коронный 289
 - с полым катодом 286
 - таунсендовский 281
 - тёмный 281
 - тихий 281
 - тлеющий 282
 - Расхождение 88
 - Рекомбинационное излучение 284
 - Рекомбинационное излучение плазмы 284
 - Рекомбинация 235

Реостат 199
Ротор 93

С

Сверхпроводники 205
Свечение "положительного столба" 284
Связанный заряд 116
Сегнетоэлектрик 127
Сейсмограф пьезоэлектрический 143
Сила:
 сторонняя 222
 электрического тока 191
 электродвижущая 222
Силовые линии 51
Сименс 198
Система:
 закрытая 32
 замкнутая 32
 электрически изолированная 32
Сольватом 234
Сопrotивление:
 кажущееся 337
 цепи полное 225
 электрическое 196
Сопrotивление внутреннее 225
Сродство к электрону 256
Стационарный ток 193
Сторонняя сила 222
Стример 281, 291
Стримерная теория искрового разряда 291

Т

Таунсендовский разряд 281
Текстура 144
Тёмный разряд 281
Температура:
 Кюри 132
 фазового перехода 132

Температурный коэффициент сопротивления 203
Теорема:
 Гаусса 75
 Остроградского–Гаусса 72
Теория металлов
 Дрүде 153
 классическая электронная 153
Термоэлектрет 148
Тихий разряд 281
Тлеющее свечение 284
Тлеющий разряд 282, 285
Ток:
 конвекционный 187
 направление 187
 насыщения 267
 переменный 187
 постоянный 186
 проводимости 187
 электрический 186
Точка Кюри 132
Трибоэлектрет 148
Триод 264

У

Удельная проводимость 201
Удельное электрическое сопротивление 201
Удельный заряд 208
Униполярность 126
Уравнение:
 Максвелла, четвертое 89
 Пуассона 88

Ф

Фарад 166
Фарадеево тёмное пространство 284

Формула:

Гаусса—Остроградского 89

Ленгмюра 259

Ричардсона—Дэшмана 268

Фотополяризация 149

Фотоэлектрет 148

Фотоэмиссия 258

Фотоэффект 258

Франклин 41

Х, Ц

Химический эквивалент вещества 243

Цилиндрический конденсатор 173

Циркуляция вектора электрического поля 93

Циркуляция векторного поля 93

Ч

Частица нейтральная 29

Число Фарадея 244

Ш

Шаровой конденсатор 172

Шаровая молния 298

Э

ЭДС 222

компенсация 230

источника 223

Электреты 148

Электризация 19

Электрическая:

дуга 287

постоянная 43

проводимость 197

прочность 289

разведка 334

Электрический:

аккумулятор 250

диполь 58

дипольный момент 59

заряд 29

конденсатор 79

пробой газа 281

ток 186

Электрическое:

напряжение 223

поле 48

сопротивление 196

Электричество 30

Электровакуумный:

диод 261

прибор 260

Электродвижущая сила 222

Электроёмкость 166

конденсатора 169

Электрокалорический 146

Электрокаротаж 340

Электролиз 240

Электролит 233

Электромер 101

Электрон квазисвободный 156

Электронвольт 100

Электронная:

лавина 278

лампа 260

эмиссия 257

Электронное средство 256

Электронный газ 152

Электрополировка 241

Электропроводимость 151

Электропроводность 151, 197, 201

Электроразведка 334

Электростатика 29

- Электростатическое поле 48
- Электрострикция 145
- Электрохимический
эквивалент вещества 243
потенциал 246
- Электроэлектрет 148
- Элемент
Вестона 249
- гальванический 248
- Даниеля—Якоби 247
- нормальный 248
- Эмиссионная постоянная 268
- Энергия ионизации 276
- Энергия поляризованного
диэлектрика 182
- Эффект акустоэлектрический 208