

В. УОКЕР, В. ЛЬЮИС,
В. МАК АДАМС

ТИПОВАЯ ХИМИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
АППАРАТУРНЫХ ФОРМ, МЕТОДЫ РАСЧЕТА
ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МАШИН

Выпуск I

ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ
СТЕХИОМЕТРИИ. ГИДРАВЛИКА.
ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. ТОПКИ И
ПЕЧИ. ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ И
ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ В НИХ

Перевод под редакцией
проф. К. Ф. Павлова

Допущен в качестве учебника
к изданию в 1933 г. Главным
Управлением Учебными Заведени-
ями НКТП СССР



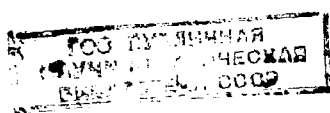
ГОСХИМТЕХИЗДАТ 1933
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

X 17, 5, 2

PRINCIPLES OF CHEMICAL ENGINEERING

By W. H. Walker, W. K. Lewis,
W. H. McAdams

Professors of Chemical Engineering at the
Massachusetts Institute of Technology
Second Edition. Fifth Impression. McGraw-Hill
Book Company, Inc. New-York. London 1927



4182 $\frac{21}{60}$

H
2545
N1

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Предлагаемый вниманию наших химических кадров труд кафедры химического машиностроения Массачузетского технологического института заслуживает названия настольной книги для инженера-технолога. Мы озаглавили книгу „Типовая химическая аппаратура“ с целью привести в нашем издании заглавие книги в большее соответствие с ее содержанием, оттенив основную идею авторов, что бесконечное разнообразие аппаратурных форм в химических производствах сводится в стройную систему на основе немногих общих принципов.

Принципы эти позволяют производителю-практику легко разобраться в каждом новом для него конкретном случае, как бы своеобразен и специфичен на первый взгляд он ни был.

Авторы с изумительным педагогическим мастерством вооружают читателя навыками, необходимыми для самостоятельной и четкой инженерной работы. Они рассматривают только типовую химическую аппаратуру, т. е. аппаратуру, применяемую во всех отраслях химической промышленности; однако, методика авторов несомненно имеет более общее значение: подходы и навыки, верные в отношении типовой аппаратуры, дают возможность критически оценивать и научно конструировать аппаратуру специально технологическую, т. е. специфичную для отдельных производств.

Идеи авторов не новы для высшей технической школы нашего Союза. Уже давно по инициативе А. К. Крупского и его школы введены во многих наших институтах элементы общеобразовательного аппаратурного курса.

Однако мы ни на минуту не могли упустить из виду глубокого различия профилей нашей и американской технической школы.

Оrientировка на нужды наших вузов и наших технических кадров побудила нас дать дополнительные к этой книге выпуски и главы, рассматривающие чрезвычайно важные и незатронутые здесь проблемы: умеренное и глубокое охлаждение, кристаллизацию, внутризаводский транспорт, взвешивание, автоматический контроль и др.

В этих выпусках и главах мы стремимся подготовить читателя к самостоятельной инженерной работе путем заботливого формирования его технических знаний и развития навыков химико-технологического проектирования.

Мы уверены, что читатели оценят всю трудность приспособления столь обширного труда иностранных авторов к нуждам нашей школы и придут нам на помощь в дальнейшей работе над шлифовкой текста своими указаниями и советами.

Круг читателей, на который ориентирована книга, это — технологи-химики, люди, ответственные за технологический эскиз аппарата, но не за его механико-конструктивное оформление. Этим объясняется то обстоятельство, что в прилагаемом курсе сведено к необходимому минимуму рассмотрение с механической стороны деталей химических машин и аппаратов.

За ряд ценных указаний по изложению последних глав (5—8) приношу благодарность Н. Д. Веселовскому, за участие в пересчетах констант и

проверочных расчетах примеров — инж. В. П. Прянишникову и инженеру А. А. Носкову; считаю долгом также отметить большую работу редактора Лен. отд. Госхимиздата В. С. Гуляева по редактированию трудного текста книги.

Перевод сделан К. А. Михельсон и Э. О. Ульман.

К. Павлов

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРОВ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

При подготовке этого нового издания мы стремились исправить некоторые погрешности и переработать неясные места, замеченные в старом издании, а также пересмотреть весь текст книги в отношении соответствия его новейшим достижениям науки и техники. Во многих случаях потребовалось значительное против первого издания расширение объема книги. В главе о теплопередаче константы и некоторые формулы были изменены с целью большего их обобщения и уточнения в соответствии с опытными данными, полученными за последнее время. Переработана и значительно расширена глава о газогенераторах. В главе о ректификации аналитические методы заменены графическими, так как графические приемы сильно сокращают время расчета и, кроме того, все разъяснения становятся чрезвычайно наглядными. По желанию большого числа наших читателей было добавлено, как приложение, собрание задач для самостоятельного их решения.

В первом издании не удалось осветить диффузионные процессы, включающие такие операции, как промывка газов, фильтрация, выщелачивание и т. п., вследствие отсутствия в то время в литературе надежных и проверенных данных; теоретические принципы указанных процессов были еще недостаточно ясны, и методика точных расчетов и решений предлагаемых практикой задач была почти неизвестна. Как только эта проблема оказалась несколько более выясненной, были написаны и прибавлены две главы, обнимающие указанные темы. Первая глава посвящена применению к целому ряду проблем упомянутых принципов диффузии, которые весьма важны для объяснения взаимодействий между фазами и о которых много говорилось в главах о сушке и дистилляции, при чем даны отдельно характеристики соответствующих процессов. Особенно детально рассмотрены вопросы равновесия и скорости реакций для процессов, протекающих при постоянных условиях. Вторая глава посвящена описанию стандартных методов работы и оборудования и дает методику расчетов, иллюстрированную рядом типичных примеров. *Одна из главных общих идей нового издания — подчеркнуть технологическую общность и физико-химическое сходство многих процессов, кажущихся на первый взгляд резко сближенными друг от друга* *.

Кембридж, Массачусетс.

Июль, 1927.

William H. Walker
Warren K. Lewis
William H. McAdams

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРОВ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Искусством дублирования и крашения практически овладели задолго до открытия физико-химических законов, которым эти процессы подчиняются. Точно так же и в расчетах химической аппаратуры практический опыт предшествовал научному анализу и систематизации принципов, на которых

* Курсив наш. Ред.

теперь основаны расчеты химической аппаратуры. В ряде случаев отдельные процессы химической технологии осуществлялись в различных отраслях промышленности в столь грандиозном масштабе, что казались приспособленными только и специально к условиям данного производства и поэтому не находили себе применения в других отраслях промышленности. Все важнейшие элементарные промышленные операции имеют много общего, и, если известны управляющие ими принципы, которые определяют рациональное выполнение проекта и работу основных типов технических аппаратов, то успешное их приспособление к производственным процессам становится скорее делом хорошего руководства, нежели счастливого случая.

В этой книге мы пробуем обратить внимание читателей на те законы физической химии, на которых в технике базируются химические процессы, и развить методику применения этих законов в разрешении таких проблем, которые в настоящее время встречаются в химической практике. *Мы выбрали для изложения основные процессы, общие для всех химических производств, а не детали специальных технологических процессов, и, насколько это в настоящее время возможно, постарались сделать наше изложение наглядным в части описательной и математически точным в части расчетной. Мы склонны надеяться, что эта книга побудит инженеров научно проектировать аппараты, предназначенные для специальных целей, а не просто строить их, а затем, путем большого числа дорогостоящих экспериментов и изменений, находить, наконец, соответствующую конструкцию.**

Эта книга может быть разделена примерно на пять частей.

Первая охватывает принципы стехиометрии, при чем обращено специальное внимание на использование кг-моля как единицы для вычислений, вследствие той легкости и упрощения, которые дает применение этой единицы в разнообразных расчетах и пересчетах. Наш опыт убедил нас в том, что часто практики-инженеры, так же как и студенты, не используют в своей работе колоссального богатства физико-химических констант и других данных, имеющихся в химической литературе. Помочь делу мы старались путем критического подбора важнейших данных, полученных в лабораторных опытах и заводских процессах. Часто многие данные применяются без учета пределов, в области которых они верны, многие данные и совсем не принимаются во внимание вследствие ошибочного их истолкования. Поэтому мы даем на протяжении всей книги ряд примеров с соответствующим их решением, из которых читатели смогут почерпнуть некоторые сведения и правила о проведении экспериментов, о выборе необходимых расчетных данных, о методе решения и интерпретации данных. Эти задачи надо рассматривать не как предмет головоломки для студента, а как иллюстрации, органически связанные с текстом книги.

Во второй части детально разобраны, вследствие их важности, явления теплопередачи и течения жидкостей и законы, управляющие этими процессами. Теплообмен есть явление, сопровождающее почти каждую химическую реакцию; он должен быть обеспечен для того, чтобы быть уверенным в правильности хода процесса. Поскольку возможно, мы иллюстрировали большинство уравнений рядом примеров с подробным их решением.

Третья часть—топливо и наиболее рациональные процессы его сжигания—развита достаточно полно, чтобы можно было понять важнейшие взаимоотношения в этой области.

* Курсив наш. Ред.

Четвертая часть дает подробное описание процессов раздробления и измельчения и механических методов разделения веществ вместе с фильтрованием в его различных формах, при чем описание сопровождается по возможности математическим анализом.

Пятая—процессы испарения в разных формах—обработана с обычной точки зрения равновесия жидкой и паровой фазы. В связи с сушкой материалов мы рассматриваем также процессы увлажнения воздуха, его осушки и охлаждения воды. Выпаривание, перегонка и ректификация изложены в отдельных главах.

Значительная часть печатаемого ныне текста долгое время служила пособием для студентов Массачузетского технологического института в качестве записок по лекциям. Эти записки использованы при составлении настоящего учебника так же, как и печатные материалы, по отдельным вопросам расчета аппаратуры, изданные тем же Институтом.

Читателям может показаться, что ряд принципов и положений формулирован слишком кратко и что математические их выводы напрасно отделены от описательной части, к которой они относятся. Однако опыт преподавания этого предмета доказывает целесообразность такого метода изложения материала.

Эта книга—результат обширной инженерной практики, в течение которой мы пользовались многими идеями, подсказанными нашим опытом, критикой и советами видных представителей технической мысли. Мы проверили эти идеи в условиях сурового опыта и постарались объединить их в одно целое. Материал книги взят из такого множества источников, что детальное перечисление их совершенно невозможно, но за реальную помощь, оказанную предоставлением в наше распоряжение ряда материалов, мы считаем необходимым выразить благодарность нашим многочисленным друзьям.

Кембридж, Массачузетс
Февраль, 1923.

William H. Walker
Warren K. Lewis
William H. McAdams

ГЛАВА I

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ СТЕХИОМЕТРИИ

Введение. Знание основных законов дает возможность путем рассуждений, основанных на известных фактах и закономерностях, предвидеть течение процесса, что в свою очередь дает возможность по имеющемуся заданию рассчитать процесс столь точно, что осуществление его на практике не будет расходиться с результатами расчета.

Однако ни студент, ни молодой инженер-производственник обычно не владеют методом математического анализа и не умеют его применять к имеющимся данным.

Задача этой главы заключается в том, чтобы ознакомить читателя с приемами математической обработки технологических и экспериментальных данных, а также с методами перенесения экспериментальных результатов в заводские условия, применяя эти методы к решению каждодневных практических задач, возникающих на производстве.

ЗАКОНЫ СТЕХИОМЕТРИИ И ПРИЛОЖЕНИЕ ИХ К ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ УСЛОВИЯМ

Химико-технологические расчеты основаны на следующих основных принципах: на законе сохранения материи, законе сохранения энергии и на стехиометрических соотношениях, выраженных в химических формулах и уравнениях.¹

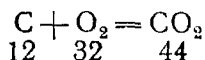
Важность этих трех принципов объясняется тем, что они количественно применимы при всех условиях. Первым и третьим пользуются в сущности при каждом химическом расчете, иногда совершенно бессознательно.

Закон электролиза Фарадея также количественно всегда применим, однако им приходится пользоваться только при решении специального типа задач.

Другие законы, как, например, действия масс и скорости реакций, равновесного соотношения паров и жидкостей и другие подобные законы физической химии, применимы при современном состоянии наших знаний только с ограничением и с разумной осмотрительностью, вследствие большого числа отклонений от них и недостаточной ориентированности их формулировок на практику инженера. Точно так же такие законы, как второй закон термодинамики и вытекающие из него общие положения, касающиеся равновесия в химических реакциях, и другие применяются в широком масштабе сравнительно редко вследствие сложности связанных с ними вычислений.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЕДИНИЦА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Химические реакции происходят между отдельными атомами или атомами молекул. Атомные или молекулярные веса представляют очень удобные единицы для вычисления результатов подобных реакций. Так, уравнение



¹ Ознакомление с этими соотношениями читатель может получить в любом общепринятом курсе неорганической химии.

показывает, что один атом углерода, соединяясь с одной молекулой кислорода, дает одну молекулу углекислого газа. Уравнение показывает также, что 12 вес. частей углерода, будут ли они выражены в граммах, килограммах или тоннах, соединяясь с 32 частями кислорода выраженными в тех же единицах, дают 44 вес. части CO_2 . Эти два способа трактовки вышеприведенных уравнений можно объединить и сказать, что грамм-атом или килограмм-атом углерода входит в соединение с соответствующей весовой единицей кислорода. Таким образом можно говорить о молекуле какого бы то ни было вещества и подразумевать число граммов или килограммов, выраженное относительным (молекулярным или атомным) весом взаимодействующих веществ.

В то время как газы обычно измеряются объемными единицами и в анализах состав их выражается в объемных процентах,—твердые тела измеряются в весовых единицах, и в анализах состав их выражается весовыми процентами. Поэтому уравнение, приведенное выше, можно трактовать двояко: в объемных и в весовых единицах. Целесообразно за основу измерений принять килограмм-молекулу.

Например, если в 100 м³ газа содержится 20 м³ O_2 и 80 м³ N_2 , то это значит, что по объему в нем заключается 20% O_2 и 80% N_2 . Согласно закону Авогадро, равные объемы всех газов заключают в себе равное количество молекул. Следовательно, в нашем случае газ заключает в себе 20% молекул O_2 и 80% N_2 от наличного числа молекул, т. е. в каждых 100 молекулах данного газа содержится 20 молекул O_2 и 80 N_2 . Далее, закон Авогадро предполагает, что давление, производимое каким-либо газом при данной температуре, пропорционально числу его молекул, заключающихся в единице объема. С другой стороны, закон Дальтона устанавливает, что при смешении газов давление каждой отдельной составной части не зависит от присутствия других и что парциальные давления компонентов складываются так, что общее давление является суммой всех парциальных давлений. Следовательно, для смесей газов, подчиненных этим двум законам, давление каждой составной части, выраженное в процентах по отношению к общему давлению, численно равно выраженному в процентах количеству молекул этой составной части смеси, а также и ее объемному проценту.

Рассмотрим, например, сгорание в воздухе кокса, содержащего по весу 82% углерода, 1% водорода, 4% влажности и 13% золы. На каждые 100 кг кокса приходится 6,83 кг-атомов углерода, 0,496 кг-молекул водорода и 0,222 кг-молекул воды. Зола не принимается в расчет при вычислении. Так как объемный процент газа равен молекулярному, то вычисления, как это будет показано ниже, значительно упрощаются.

В виду того, что равные объемы всех газов содержат равное число молекул, очевидно, может быть выбран такой объем, который при определенных температуре и давлении (0°C и 760 мм) содержал бы как раз то число молекул, которое необходимо для того, чтобы число килограммов газа выражало молекулярный вес. Этот объем, путем опыта определенный в 22,4 литра для одной грамм-молекулы, называется молекулярным объемом. В дальнейшем мы пользуемся термином грамм-молекула, грамм-атом, которые для сокращения будем заменять соответственно словами — молекула, атом.

Молекулярный вес газа точно определяется, как вес в граммах 22,412 л (или в килограммах 22,412 м³) газа, измеренного при установленных условиях (Н.У.)¹ температуры и давления. Точно так же можно говорить о молекулярном весе (М.В.) смеси газов, как о весе отдельного газа.

¹ По всей книге сокращение „Н.У.“ будет употребляться для обозначения нормальных условий, т. е. давления в 760 мм Hg и темп. 0° Ц.

Так, например, воздух, свободный от влажности, имеет в среднем следующий состав в объемных процентах:

Кислород	20,92
Азот	78,14
Двуокись углерода	0,04
Аргон и др. газы	0,90

Средний молекулярный вес воздуха или какого-нибудь другого смешанного газа может быть вычислен посредством суммирования весов каждой составной части в одном молекулярном объеме смеси (см. таблицу).

Для удобства расчетов постоянный состав воздуха обычно принимается следующий: 20,9% O_2 и 79,1% N_2 . Аргон и следы других благородных газов прибавлены здесь к азоту, который в большинстве химических процессов оказывается инертным. Единственная переменная величина, которая каждый раз должна быть определена экспериментально, — это влажность воздуха.

Составная часть	Число молекул в 1 кг-молекуле воздуха	Молекулярный вес	Вес единицы молекулярного объема воздуха в кг
O_2	0,2092	32,00	6,69
N_2	0,7814	28,02	21,90
CO_2	0,0004	44,0	0,02
Ar	0,0090	40	0,36

Средний молекулярный вес воздуха 28,97 кг для практического применения принят равным 29,0.

Газовые законы. Так как газы редко могут быть измерены при нормальных условиях, то поэтому необходимо уметь приводить молекулярный объем при различных температурах и давлениях к нормальным условиям. Это может быть сделано с помощью уравнения состояния газа $pV = nRT$, где n — число грамм-молекул рассматриваемого газа, R — газовая постоянная (постоянна для всех идеальных газов), численная величина которой зависит только от выбранных единиц, в которых измеряются давление, объем и температура (p , V , T).

В метрических единицах это уравнение состояния газа может быть написано так: $pV = 848,5nT$; здесь количества, выраженные в метрических единицах, обозначают следующее: p — абсолютное давление в $кг/м^2$, V — объем в $м^3$, T — температура в абсолютных градусах ($273^\circ + t$), n — число кг-молекул газа, введенное в расчет.

Вместо того, чтобы подставлять действительные величины в данное уравнение и находить таким путем объем, проще умножить объем при нормальных условиях на переводный множитель.

Если мы напишем уравнение состояния газа при любых условиях в такой форме:

$$pV = 848,5nT,$$

а при нормальных условиях

$$p_0 V_0 = 848,5nT_0,$$

то, деля первое уравнение на второе и решая относительно V , получим:

$$V = V_0 \cdot \frac{p_0}{p} \cdot \frac{T}{T_0}.$$

Так как поправочные множители $\frac{p_0}{p}$ и $\frac{T}{T_0}$, стоящие при V_0 , представляют отношения, то совершенно безразлично, в каких единицах они выражены, лишь бы только члены каждого отношения были выражены в одних и тех же единицах.

Вместо того, чтобы удерживать в памяти это уравнение, гораздо проще помнить только то, что измеряемый объем должен быть умножен на произведение отношений абсолютных температур и абсолютных давлений, при чем следует брать **прямую** пропорциональность для температур и **обратную** для давлений.

Поясним сказанное примерами.

1. Объем $\frac{1}{2}$ молекулы любого газа при 60°C и 780 мм давления получается из уравнения.

$$V_{780}^{60^\circ} = \frac{\overset{\substack{\text{в м}^3 \text{ при} \\ \text{Н. У.}}}{22,4}}{2} \left| \frac{\overset{\substack{\text{при } 60^\circ \text{ C} \\ 760 \text{ мм}}}{333}}{273} \right| \frac{760}{780} = 13,3 \text{ м}^3$$

2. Объем 25 кг природного газа, содержащего 85% CH_4 и 15% C_2H_6 при 20° и при 50 мм рт. ст. (0,066 атм. по манометру), определяется следующим образом. Во-первых, устанавливается средний молекулярный вес газа.

Так как процентное отношение объемов является в то же время молекулярным процентным соотношением, то

$$\begin{aligned} 0,85 \times 16,07 &= 13,65 \text{ кг метана} \\ 0,15 \times 30,11 &= 4,52 \text{ кг этана} \\ \hline &18,17 \text{ кг смеси} \end{aligned}$$

Таким образом средний молекулярный вес данного природного газа равен 18,17; 0,066 атм. (51 мм рт. ст.) по манометру эквивалентны абсолютному давлению 811 мм рт. ст., так как нормальное атмосферное давление равно 760 мм рт. ст.

В таком случае вычисляемый объем равен:

$$V = \frac{\overset{\substack{\text{кг-молек.} \\ \text{газа}}}{25}}{18,17} \left| \frac{\overset{\substack{\text{м}^3 \text{ при Н. У.}}}{22,4}}{2} \right| \frac{\overset{\substack{\text{при } 20^\circ \text{ C} \\ 760 \text{ мм}}}{293}}{273} \frac{760}{811} = 31,0 \text{ м}^3$$

3. Сколько кг углекислоты заключается в 1000 м³ сухого топочного газа, содержащего в себе 15% CO_2 при 250°C и при барометрическом давлении в 740 мм ртутного столба? (Нормальное барометрическое давление — давление ртутного столба в 760 мм).

$$G = \frac{\overset{\substack{\text{при } 250^\circ \text{ C} \\ 760 \text{ мм}}}{1000 \cdot 273}}{523} \left| \frac{\overset{\substack{\text{при } 760 \text{ мм}}}{740}}{760} \right| \frac{0,15 \cdot 44}{22,4} \approx 150 \text{ кг}$$

Законы, выражаемые уравнением состояния газа, имеют всем известные исключения. Эти законы не могут применяться без поправок к тем газам, молекулы которых ассоциируют или диссоциируют, к каким то ни было вообще газам при высоких давлениях, в особенности, если они близки к насыщению. Тем не менее ошибки, происходящие при применении этих законов к так называемым постоянным газам при давлении, доходящем до 15—20 атм., а для насыщенных паров до одной и возможно 2 атм., не имеют значения для технических целей (не более 2—3%). Поэтому для технических вычислений нам не требуется применять ни одного из многочисленных уточнений уравнения состояния совершенного газа.

Тепловые единицы. В метрической системе тепловые величины измеряются в грамм-калориях, в английской — в В.Т.У. (британские тепловые единицы). Основная единица количества тепла 1 кж-кал., есть количество теплоты, требующееся, чтобы 1 кж воды нагреть на 1°Ц; одна британская термическая единица равна 0,252 кж-кал. Основным фактором, определяющим величину энергии в химических системах, является теплота реакции.

В химической литературе теплота реакции почти всегда выражается в з-кал. на з-мол. (или в кж-кал. на з-мол.). Таким образом, положение, что горение углерода, при обращении его в CO_2 , сопровождается выделением теплоты в 97 000 кал., или 97 кж-кал. означает, что сгорание одного з-атома углерода (12 г) для образования одной з-мол. CO_2 (44 г) освобождает достаточно тепла, чтобы поднять температуру 97 000 г воды на 1°Ц.

Для того, чтобы перевести теплоту реакции в единицы В.Т.У. (брит. тепл. единицы на фунт вещества), достаточно количества, выраженные в з-кал. на з-мол. или з-атом, умножить на 1,8.

Газовая постоянная R в уравнении $pv = nRT$ есть величина энергии, которую иногда удобно выражать в тепловых единицах, как, напр., при оценке теплового эквивалента внешней работы, совершаемой против атмосферного давления каким-нибудь газом при его выделении в результате реакций. Будет ли n выражено в з-мол. или в фунт-молекулах — постоянная R , выраженная в тепловых единицах, будет равна 1,985 (приблизительно 2) для обеих систем единиц — английской и метрической; числовая величина n будет одна и та же, несмотря на то, что количество теплоты, полученное умножением R на nT , выражается в з-кал. в метрической системе, в то время как в английской системе оно будет дано в В.Т.У., если температура выражена в градусах Фаренгейта.

Молекулярная теплоемкость

Газы. Применение молекулы как расчетной весовой единицы объясняется тем, что многие физические свойства веществ получают при этом особенно простое выражение. Так, в то время как удельная теплота (теплоемкость) для различных двухатомных газов при постоянном давлении сильно колеблется (приблизительно от 0,2 до 3,0), их молекулярная теплоемкость, т. е. тепло, требующееся для поднятия температуры одной молекулы данных газов на один градус или, что то же, произведение их молекулярного веса на удельную теплоемкость MC_p остается одна и та же в пределах ошибок опыта для всех двухатомных газов.

Подобно этому тождественны и молекулярные теплоемкости SO_2 и CO_2 , и то же самое верно для галоидов и для других газов.

Зависимость молекулярных теплоемкостей от температуры изображена графически на рис. 1.¹

¹ Эти кривые применяются при умеренных давлениях и имеют в своей основе уравнения Льюиса и Ренделя. См. Lewis and Randall. Thermodynamics and Free Energy of Chemical Substances, 1923 (готовится русский перевод).

Одноатомные газы	$MC_p = 5,0$
$\text{N}_2, \text{O}_2, \text{CO}, \text{NO},$ галоидоводороды	$MC_p = 6,50 + 0,001 T_K$
H_2	$MC_p = 6,50 + 0,0009 T_K$
$\text{Cl}_2, \text{Br}_2, \text{J}_2$	$MC_p = 7,4 + 0,001 T_K$
$\text{H}_2\text{O}, \text{H}_2\text{S}$	$MC_p = 8,81 - 0,0019 T_K + 0,00000222 T_K^2$
$\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{N}_2\text{O}$	$MC_p = 7,0 + 0,0071 T_K - 0,00000186 T_K^2$
NH_3	$MC_p = 8,04 + 0,0007 T_K + 0,0000051 T_K^2$
CH_4	$MC_p = 7,5 + 0,005 T_K$

В этих уравнениях T_K выражено в градусах Кельвина (Kelvin). Молекулярная теплоемкость H_2 может быть принята равной молекулярной теплоемкости двухатомных газов за исключением случаев, когда требуется очень большая точность или когда рассматривается чистый водород.

В химической литературе значение теплоемкости обычно дается, как функция абсолютной температуры по 100-градусной шкале. Так как удельная теплоемкость вещества есть отношение количества тепла, требующегося для изменения температуры одной весовой единицы вещества на один градус, к теплу, требуемому для изменения температуры воды на

один градус, то отсюда следует, что теплоемкость не зависит от выбора единицы измерения.

Однако, если мы представим теплоемкость как функцию температуры следующей формулой $a + bT_K + cT_K^2$, где T_K выражено в градусах Кельвина ($^{\circ}K$), и пожелаем перейти к температуре, выраженной в градусах Ранкина ($^{\circ}R$),¹ то необходимо b разделить на 1,8, а c на 1,8². Так как теплоемкость молекулы есть в то же время удельная молекулярная теплота, то ска-

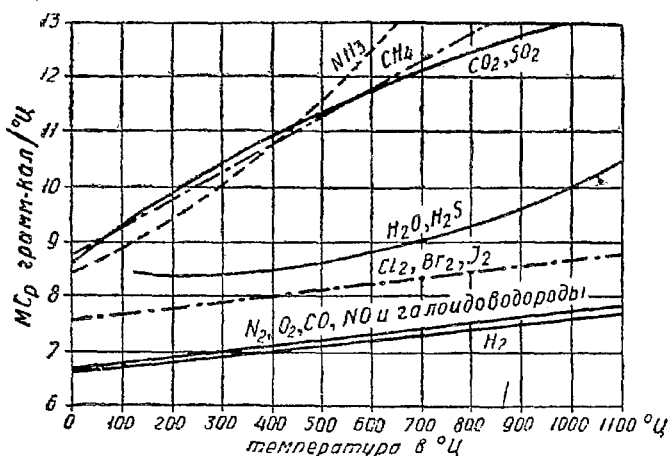


Рис. 1. Молекулярные теплоемкости газов.

занное выше относительно удельной теплоты относится также к теплоемкости молекулы, потому что молекулярный вес есть также отношение.

Так, например, теплоемкость молекулы углекислого газа, выраженная как функция температуры в градусах Кельвина, равна:

$$MC_p = 7,0 + 0,0071T_K - 0,00000186T_K^2,$$

а в градусах Ранкина:

$$MC_p = 7,0 + 0,0039T_R - 0,000000574T_R^2.$$

Для поднятия температуры газа при постоянном давлении требуется большее количество тепла, чем при постоянном объеме, так как для расширения объема необходима добавочная энергия. Но разница в теплоемкости молекулы газа при обоих условиях постоянна для всех газов, подчиняющихся основным газовым законам. Численно эта разница равна газовой постоянной R , которая, при выражении в тепловых единицах, равна 1,985 кал. и не зависит от системы применяемых единиц.

Жидкости. Для жидкостей в отношении их теплоемкости не удалось установить определенных закономерности, однако интересно отметить, что молекулярные теплоемкости жидкостей (а также их удельная теплота) возрастают с увеличением температуры, как показывает рис. 2, т. е. весьма различно для каждой жидкости.

Твердые тела. Для вычисления теплоемкостей твердых тел иногда можно пользоваться законом Дюлонга и Пти и законом Колпа.

Первый закон устанавливает, что атомная теплоемкость всех твердых, (при обычных условиях) элементов есть величина постоянная, среднее значение которой для комнатной температуры равно 6,2, хотя некоторые элементы, а именно углерод, бор и кремний сильно отклоняются от этой величины. Кроме того, эти теплоемкости колеблются вместе с температурой, увеличиваясь в большинстве случаев при ее поднятии, как показывает рис. 3.

¹ $^{\circ}R$ означает градусы Ранкина (Rankine), а именно: $^{\circ}F + 460^{\circ}$, а не градусы Реомюра; $^{\circ}K$ означает градусы Кельвина, т. е. $^{\circ}C + 273$.

Закон Коппа устанавливает, что молекулярная теплоемкость соединения равна сумме атомных теплоемкостей, входящих в его состав атомов.

Атомные теплоемкости элементов в твердом состоянии при комнатной температуре следующие: $C = 1,8$; $H = 2,3$; $B = 2,7$; $Si = 3,8$; $O = 4,0$; $P = 5,4$; $F = 5,4$; атомная теплоемкость всех других элементов равна $6,2$. Поэтому, например, по закону Коппа, теплоемкость химически чистого углекислого кальция ($CaCO_3$) будет равна $6,2 + 1,8 + 3 \cdot 4,0 = 20,0$, а та же величина, определенная опытом, равна $20,2$.

Удельная теплота в таком случае будет $0,20$. Конечно, теплоемкости, применяемые в расчетах, это — эмпирические величины; разница между результатами, полученными путем вычисления и экспериментально, зачастую достигает 10 и более $\%$.

Теплосодержание газов. В связи с изменениями теплоемкостей в зависимости от температуры, иной раз бывает удобно пользоваться кривыми,¹ показывающими полное теплосодержание молекулы газа при различных температурах, т. е. тепло, требуемое для нагревания одной молекулы газа с произвольной нулевой точки ($0^\circ C$ или $0^\circ K$) до рассматриваемой температуры.¹

Для этого пользуются логарифмической бумагой, так как она дает постоянный процент точности на протяжении всей шкалы. На рис. 4 (стр. 14) представлены две диаграммы: линии нижней диаграммы являются продолжением линий верхней диаграммы. Точность изображения в пределах 2% .

¹ Применение подобных кривых является несомненным упрощением расчетов при таких газах, как водяной пар и углекислый газ, теплоемкость которых зависит от температуры в первой степени и от квадрата температуры.

Для того, чтобы получить величину теплосодержания при данной температуре, пришлось бы интегрировать сложные уравнения. Результаты такого интегрирования представлены графически на рис. 4.

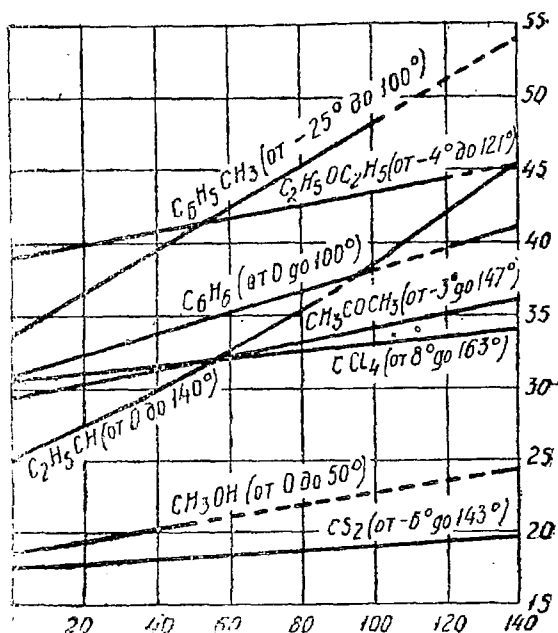


Рис. 2. Молекулярные теплоемкости жидкостей. Абс.—Температура в $^\circ C$. Орд.—МС в м. кал/ $^\circ C$ /г-моль

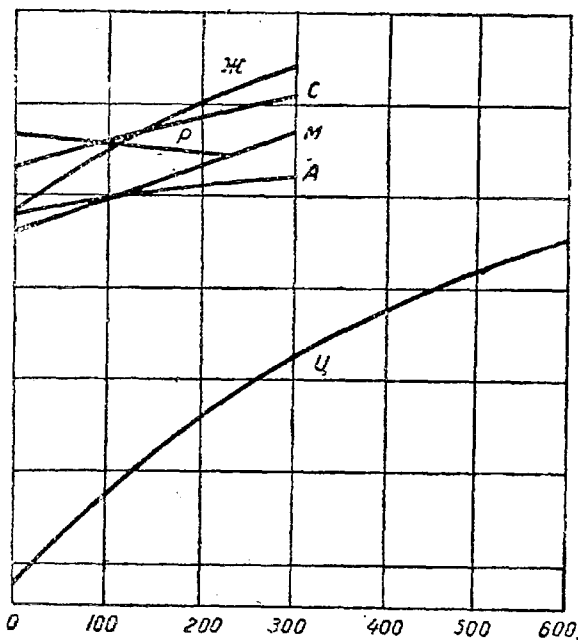


Рис. 3. Атомные теплоемкости металлов.

Абс.—Температура в $^\circ C$. Орд.—А. Ср.

Условные обозначения: Ж—железо, С—серебро, А—алюминий, Р—ртуть, М—медь, Ц—цейлонский графит.

Возьмем для примера углекислый газ. Количество тепла, требуемого для поднятия температуры одной молекулы углекислого газа с 21°C до 481°C , находим посредством вычитания теплосодержания при $21,0^{\circ}\text{C}$, которое по рис. 4 равняется 187 б. кал./кг-мол., из теплосодержания при $481,0^{\circ}\text{C}$, которое равно 4860, что составляет 4673 б. кал. на молекулу. Интересно, что средняя величина молекулярной теплоемкости на этом промежутке

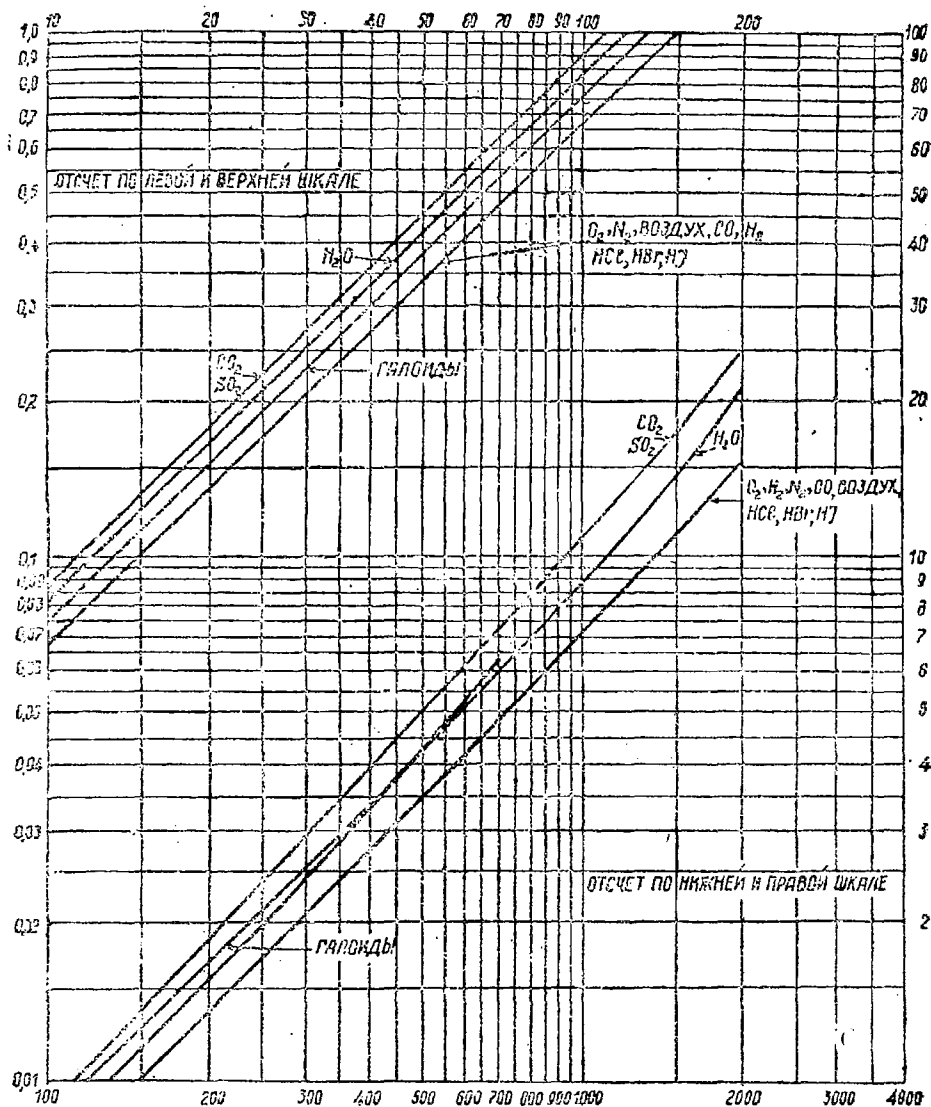


Рис. 4. Теплосодержание газов при разных температурах. Абс.—Температура. Орд.—Теплосодержание (б. кал./г-мол.).

равна $4673 : 460 = 10,14$ б. кал./кг-мол., а средняя величина удельной теплоемкости есть $10,14 : 44 = 0,2305$.

Молекулярная скрытая теплота испарения. Существует еще молекулярное соотношение, которое имеет важное значение в инженерных расчетах,—это так называемый закон Труттона. Он состоит в том,

что молекулярная скрытая теплота испарения M_g различных жидкостей при точке кипения пропорциональна их абсолютной температуре кипения, т. е. отношение $\frac{M_g}{T}$ для большинства жидкостей есть величина постоянная.

В этом выражении M обозначает молекулярный вес, g — скрытую теплоту испарения, рассчитанную на единицу веса жидкости, а T — температуру кипения, выраженную в градусах абсолютной шкалы.

В метрической системе единиц скрытая теплота испарения выражается в грамм-калориях на грамм вещества, а абсолютная температура кипения — в стоградусной шкале, в то время как в английской системе скрытая теплота испарения выражается в В. Т. У. на фунт вещества и абсолютная температура кипения в абсолютных $^{\circ}\text{F}$.

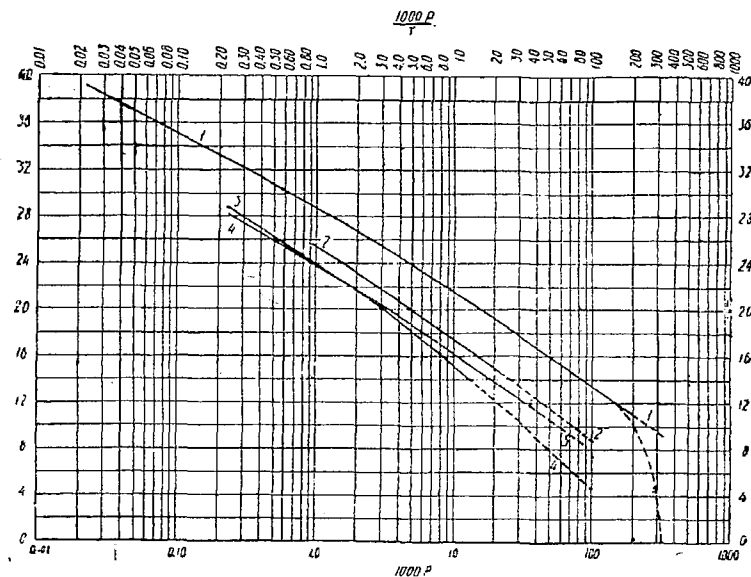


Рис. 5. Функция Гильдебранда. Абс. $\frac{1000 P}{T} \cdot \text{Орд.} \frac{M_g}{T}$.

Обозначения:

1—вода, 2—хлороформ, 3—бензол, 4—четырёххлористый углерод, толуол, ксилол и пр.

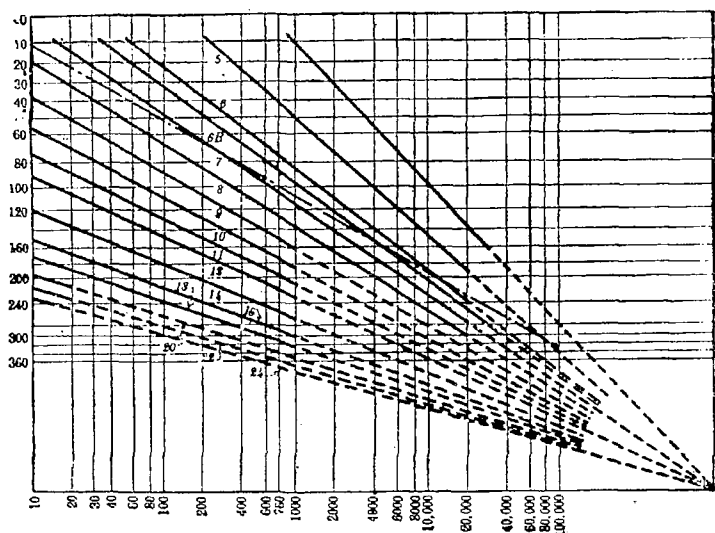


Рис. 6. Диаграмма Кокса для экстраполирования кривых упругости пара при различных температурах. Абс.—Абсолютное давление в мм Нг. Орд.—Температура в $^{\circ}\text{C}$.

Примечание. Значение n для CnH_{2n+2} показано цифрами на диаграмме сплошными линиями; пунктирные линии — логарифмы упругости пара. 6 В обозначает линию бензола.

В той и другой системе единиц это отношение $\frac{M_g}{T}$ выражается одним и тем же числом.

Отклонения от закона Трутона в некоторых случаях значительны; притом закон этот можно применять только для точки кипения под атмосферным давлением.

Более точным приближением и притом таким, которое не ограничено точкой кипения под атмосферным давлением, является закон Гильдебранда,¹

¹ W. K. Lewis and H. C. Weber. J. Ind. Eng. Chem., 14, № 7 (July, 1922), 485.

гласящий, что $\frac{M_r}{T}$ есть функция молекулярной концентрации образующегося пара. Известно, что скрытая молекулярная теплота кипения воды при 373° абс. (1 атм.) и при 453° абс. (10 атм.) равняется соответственно 9720 и 8670 г-кал. на г-молекулу, а, следовательно, соответствующие величины $\frac{M_r}{T}$ равны 26,0 и 19,1. Если обозначить через p давление при данной температуре, то соответствующие молекулярные концентрации, т. е. обратные величины молекулярного объема, или, что то же, число г-молекул в 1 м³, будут прямо пропорциональны $\frac{K_p}{T}$ и (при $K = 1000$ для удобства вычислений) будут равны в наших случаях 2,68 и 22,1; мы увидим, что эти величины лежат на кривой 1 (почти прямая), рис. 5¹ и, таким образом, такой „прямой“ можно воспользоваться для определения молекулярной теплоты испарения воды при других температурах экстраполированием. Экстраполирование становится неточным вблизи критического давления, как это видно на чертеже (см. пункт у 1-ой кривой).¹ Кривая 3-я, построенная по данным для бензола, применима к парафиновым углеводородам при атмосферном давлении.

Эта кривая имеет значение при определении скрытой теплоты испарения различных фракций, получающихся при очистке и перегонке нефти.²

Упругость пара жидкостей. Во многих случаях является необходимым интерполировать кривую зависимости пара от температуры. Метод, предложенный Коксом,³ вполне для этого пригоден. Проводится прямая линия под удобным углом на координатной плоскости (например, горизонтальная) и делится по логарифмической шкале.

Упругости водяного пара откладываются на логарифмической шкале, соответственно шкале температур, как это показано на рис. 6 пунктирной линией.

В этих координатах данные, относящиеся к парафиновым углеводородам, дают прямые линии. Так как последние пересекаются в одной общей точке, то достаточно лишь одной точки, полученной из опыта, для построения кривой упругости пара любого парафинового углеводорода.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОМЫШЛЕННОЙ СТЕХИОМЕТРИИ

Типы процессов. Производственные процессы могут быть разделены на 3 группы: периодические, непрерывные и полунепрерывные, т. е. комбинированные из двух первых.

Иллюстрацией периодических процессов служит, например, обжиг кирпича и глиняных изделий в печах старого типа: изделия после обжига подвергаются охлаждению, затем печь разгружается и вновь загружается. Другие примеры: коксование каменного угля, производство азотной кислоты разложением чилийской селитры серной кислотой, получение растительного масла из семян отжиманием их на гидравлических прессах и т. п.

Типичными для непрерывных процессов являются: камерное и контактное получение серной кислоты, извлечение легких масел и аммиака из све-

¹ W. H. McAdams and J. C. Morrell. Ind. Eng. Chem., 16, № 4 (April, 1924), 375.

² Средний молекулярный вес фракции может быть с достаточной точностью принят равным молекулярному весу нормального алифатического углеводорода, кипящего при температуре, равной средней температуре кипения рассматриваемой смеси углеводородов.

Соотношение между молекулярным весом M любого нормального парафинового углеводорода и его температурой кипения (при атмосферном давлении), выраженной в градусах Цельсия, дается следующим уравнением: $\lg M = [2,51 \lg (t + 393)] - 4,7523$.

³ E. K. Cox, Ind. Eng. Chem., 15, № 6 (June, 1923), 592, см. также Calingaert a. Davis, Ibid. (December, 1925), 1287.

тильного газа посредством применения соответствующих растворителей, действие непрерывных перегонных кубов и ректификационных колонн для отделения летучих растворителей и т. п.

Непрерывность процессов имеет столь явные преимущества, что ее стараются осуществить, где только возможно; однако во многих случаях непрерывность может быть достигнута не в полной мере, и процесс оказывается полунепрерывным, как, например: периодическая чистка головки парового котла, действие диффузоров — вышелащивательных резервуаров (баков) при извлечении поташа из золы или из дубильного экстракта, загрузка доменной печи и т. п. В тех случаях, где процессы по существу являются перемежающимися, приблизиться к непрерывности можно комбинированием отдельных периодически работающих агрегатов, как, например, при коксовании угля в печах, дающих побочный продукт — коксовый газ, непрерывно обрабатываемый на соседнем химическом заводе, или при сжигании доменного газа в кауперах.

В то время, как данная группа процессов может быть рассматриваема как полунепрерывная в том случае, если мы рассматриваем всю совокупность установок в целом, она же должна быть рассматриваема, как прерывная, когда мы имеем дело с отдельными агрегатами.

Химические реакции, при которых данное вещество превращается только в одно другое вещество, сравнительно редки; обычно в одну или в обе части уравнения реакции входит более чем одно вещество. Большинство химических процессов можно поэтому рассматривать как материальные потоки — расходящиеся, сходящиеся, перекрещивающиеся или переплетающиеся.

Примерами расходящихся потоков могут служить: электролиз солевого раствора с получением каустической соды, хлора и водорода; электролиз воды с получением водорода и кислорода; выделение летучих жидкостей из смесей при дистилляции (алкоголь и вода, бензол и толуол и т. д.); сухая перегонка дерева, угля и т. п.

Примерами сходящихся материальных потоков могут служить: получение вулканизированной резины смешением каучука с серой и др. примесями и последующим нагревом (вулканизация), сгорание газов и т. д. В данном случае два (или более) вещества, участвующие в процессе смешения или в реакции, образуют одно вещество, т. е. один поток.

Сгорание угля в воздухе, с образованием летучих газов и золы, восстановление и выплавка железа в доменной печи и окисление сернистых руд на воздухе, дающее окислы металлов с выделением серы, — являются типичными перекрещивающимися потоками. В этих случаях различные потоки, вступая в химические взаимодействия, видоизменяются, т. е. как бы перекрещиваются, и образуют несколько отдельных потоков.

Материальный баланс производства. Подсчет расходуемого сырья и получаемого продукта в химическом производстве надо начинать со следующей схемы уравнения:

Загрузка в аппаратуру сырья = Выгрузка готового продукта + Остаток материала (или его эквивалент)

Загрузка + Потери = Выгрузка

При этом накопление остатка или расход материала зависят от увеличения или уменьшения вещества в самой системе. Это уравнение может быть применено к определенной операции или к целому процессу, полученному комбинированием нескольких отдельных операций. Оно применимо и в отдельности к каждому элементу операции или процесса, для которого имеются в нашем распоряжении данные.

В тех случаях, когда это уравнение применяется к какому-нибудь элементу потока (например, руда в шихте доменной печи), оно не будет экви-

валентным для любого другого элемента того же потока (например, флюс-шихты), а будет, наоборот, совершенно независимым от всех других элементов, если данные, относящиеся к выбранному элементу, были получены независимо от других элементов потока. Это уравнение может быть применимо к энергетическим взаимоотношениям систем и в этой форме дает другое самостоятельное уравнение. Его можно применять к загрузке и выгрузке вещества, взятого в целом, но, очевидно, это новое уравнение не является независимым, будучи только суммой уравнений для различных элементов. Изложенным принципом пользуются почти в каждой задаче.

В этих уравнениях единственными неудобными факторами являются прирост в самой системе остатка и расход. Факторы эти могут быть определены, но все же обычно с некоторыми затруднениями. Тем не менее, при умелом выборе данных и метода вычисления их всегда возможно бывает исключить. В громадном большинстве случаев в промышленной практике периодические операции происходят циклами, которые много раз, даже можно сказать неограниченное число раз, повторяются, и, как непрерывно действующие, так и полунепрерывно работающие аппараты успешно функционируют долгое время. Следовательно, возможность накопления материала или энергии в системе или аппарате оказывается, как мы видим, весьма ограниченной, и обыкновенно представляется возможным без всякого затруднения сводить тепловой и материальный баланс процесса. А если приведенные равенства применяются в продолжение такого периода времени и к таким аппаратам и операциям, что максимум возможных количественных колебаний вещества или энергии, накопленных в процессе, является незначительным по сравнению с поступлением новых их количеств и выдачей продукта за выбранный промежуток времени, то предполагаемые накопления и расхода остатка могут быть выпущены. Тогда имеем для материального баланса, что поступление новых количеств сырья равно выпуску вещества из системы.

Удобнее писать так:

$$\text{Приход сырья} = \text{Продукту} + \text{Утечка}$$

или проще:

$$\text{Загрузка} = \text{Выгрузка} + \text{Потери.}$$

Этими уравнениями преимущественно пользуются для двух целей: во-первых, при пробных испытаниях данного аппарата или процесса для определения фактической производительности (техно-экономических показателей) и, во-вторых, при расчете нового аппарата или проектировании производств, новых в смысле метода или производительности. Настоящая глава рассматривает прежде всего первую из этих задач, т. е. приемы численной обработки данных, характеризующих действие обследованного аппарата, но применяемые методы, конечно, могут быть использованы и для проектирования нового оборудования.

Производительность аппаратуры. Работа аппарата в данный момент характеризуется не только наибольшей его производительностью, но и его эффективностью, и так как последнюю можно понимать разное, то необходимо точное определение термина.

Так, можно различать два коэффициента полезного действия тепла определяемых либо как отношение тепла, используемого аппаратом, к общему количеству подводимого тепла, либо как отношение фактически используемого тепла к тому теплу, которое теоретически могло быть использовано. Существует также понятие *химической эффективности*, которое может быть приложено к каждому химическому элементу в процессе. Примером химической эффективности процесса может служить кристаллизация солей. Пусть, например, имеется 1000 кг неочищенной обыкновенной

Соли, чистого вещества выпускается 600 кг, и остается в промывных водах и в маточном рассоле 400 кг вещества, из которых 380 кг можно выделить в виде чистой соли из рассола. Если под эффективностью понимать отношение выгрузки к загрузке, то в данном процессе, казалось бы, эффективность равна $\frac{600}{1000} \cdot 100 = 60\%$, но так как большое количество уходящих потерь соли можно регенерировать из промывных вод (380 из 400 кг), что и следовало бы осуществлять на практике, — едва ли правильно характеризовать данный процесс столь низкой эффективностью. Следовательно, химическую эффективность надо определять, как отношение выгрузки и загрузке, разумея под загрузкой то количество материала, которое, будучи пущено в процесс, даст ту же самую выгрузку. Эффективность в таком случае выразится: $\frac{600}{1000 - 380} \cdot 100 = 96\%$. При этом 380 кг вымываются из 1000 кг потому, что для получения 600 кг продукта (если бы 380 кг были регенерированы) потребовалось бы употребить 620 кг. Причина, по которой 380 кг не добавляются к 600 кг, состоит в том, что тогда бы изменилась выгрузка и загрузка (1000 кг) также и было бы изменено соответственно новым количеством продукта.

Период обследования установок. Установление „испытательного“ периода, т. е. времени, в течение которого следует собирать данные, касающиеся материального и энергетического баланса, чтобы уменьшить значение колебаний накопления и потерь в самой системе, должно зависеть от условий каждого отдельного случая. В периодических операциях этот испытательный период должен представлять собой по крайней мере один полный цикл, но в том случае, когда известное количество вещества остается в процессе из цикла в цикл (как, например, при мыловарении), период обследования должен охватывать больше одного цикла. Где только возможно, всегда желательно охватить несколько циклов, чтобы не допустить случайных отклонений.

В непрерывных процессах период обследования тем короче, чем проще производство и чем меньше материала участвует в процессе. Полунепрерывные процессы, если возможно, следует продолжать в течение промежутка времени, столь длительного, чтобы представилась возможность рассматривать их, как практически непрерывные.

Например, испытание парового котла должно длиться приблизительно 36 часов, чтобы устранить влияние ошибок при наблюдении, вызываемых изменениями количества топлива в топке в начале и в конце испытания. Если не представляется возможным организовать достаточно длительное обследование, то приходится вводить поправки, учитывающие колебания количества топлива в течение процесса.

Выбор необходимых данных. Если обследование предусматривает измерение каждой статьи загрузки и выгрузки, то пользуются указанными равенствами (стр. 17) только для контроля точности измерений. Тем не менее, обычно подобные уравнения употребляются с целью сокращения количества собираемых данных и числа необходимых измерений, однако при этом все же не следует жертвовать никакими данными, которые возможно получить от испытания.

При измерениях следует ограничиваться определением тех величин, которые легко и точно поддаются учету; величины же, поддающиеся с трудом непосредственному измерению, определяются расчетом. Например, при испытании парового котла было бы затруднительно без специального оборудования измерение расхода воздуха и объемов газов дымовых труб, тогда как легко измерить количество сожженного угля и испарившейся воды. Следовательно, первые два количества вычисляются по другим собранным данным помощью вышеуказанных равенств. При организации испытаний не следует сокращать числа измерений, не ограничи-

ваться минимумом, необходимым для расчетов. Сколько бы данных ни удалось получить, они все должны быть приняты во внимание, так как всякий их избыток можно использовать для проверки точности прочих наблюдений и расчетов.

Для получения полного баланса элементов во всякой операции надо измерить количество и определить состав каждой струи материального потока, входящей в систему или уходящей из нее. Для этого необходимо провести количественный анализ и взвешивание каждой струи. Однако так как для каждого элемента можно составить баланс прихода и расхода, независимо от других элементов, то для каждого такого уравнения обычно опускают какое-либо из упомянутых измерений — количество или состав струи. Итак, некоторые измерения могут быть опущены, но те измерения, которые намечено сделать, должны быть такими, которые можно выполнить легко и с точностью.

Так как химический анализ обыкновенно представляет меньше затруднений, чем количественное измерение больших масс, то первым вообще пользуются для проверки второго. Однако для проверки всегда необходимо сделать по крайней мере одно непосредственное количественное измерение для определения производительности системы. При численной обработке данных непосредственного отсчета следует остерегаться значительных ошибок, причиной которых может быть недостаточная точность проведенных измерений. Например, результат вычитания двух количеств, почти равных, может сам по себе оказаться очень неточным, если относительно небольшие ошибки в уменьшаемом и вычитаемом оказались бы противоположного знака. Это обстоятельство следует всегда иметь в виду при выборе данных, намечаемых к проверке экспериментальным путем.

Отбор проб. При аналитической характеристике производства чрезвычайно важно держаться правильных методов отбора проб. Бесплезно попусту тратить время в лаборатории для проведения анализа, если взятая проба не отражает правильно состава той материальной струи, из которой она взята. Еще хуже отбирать мало характерные пробы: тогда анализ может привести к ложным выводам.

Для того, чтобы анализ правильно характеризовал поток, надо пробу непрерывно отбирать в течение всей длительности обследования. По возможности, отобранная проба должна быть количественно пропорциональной объему струи в каждый данный момент. Проба эта должна быть отобрана не в одной только точке струи, но в нескольких точках, правильно расположенных по поперечному разрезу, за исключением случаев, когда известно уже, что струя однородна (например, в случае газа, прошедшего некоторое расстояние или же после хорошего перемешивания). Подобные требования обуславливают значительный объем проб, из которых для анализа отбирают среднюю пробу. Нетрудно добиться полного смешения большого количества газа или однородной жидкости; тогда отбор наиболее подходящей пробы для анализа не сопряжен ни с какими затруднениями.

Отбор пробы твердых веществ представляет собой совершенно иную задачу. Из-за того, что крупные куски твердого вещества легко отделяются от тонкой пыли (расслаивание), пробу размельчают еще до ее деления. Удовлетворительную для анализа пробу можно получить помощью последовательных делений (на 4 части), каждый раз при тщательном перемешивании. Самая крупная отдельная частица массы должна быть чрезвычайно мала по сравнению со всей собранной пробой, взятой до ее деления.

Часто трудно бывает за один прием обратить весь первоначальный кусок в порошок, в таком случае, для того чтобы удовлетворить требованию, приходится вновь размельчать крупные зерна в отдельной части.

Общие методы расчета. Имеются некоторые практические приемы расчетов, которые хотя и не добавляют ничего нового к приведенным уже теоретическим обобщениям, однако все же заслуживают упоминания.

нения. По сути дела они являются в известном смысле искусственными, тем не менее они во многих специальных случаях упрощают не только вычисления, но и экспериментальную работу.

Случается часто, что какой-нибудь элемент, участвующий в операции, входит одной только струей и выходит тоже одной струей. Это правильно в отношении натрия в электролизе поваренной соли, азота в доменной печи и вообще азота при горении угля. Очевидно, если известно количество одной такой струи, количество другой струи можно тотчас же узнать посредством анализа обеих струй на этот один элемент. Кроме того, если анализ двух потоков выполнен детально, то количество всех прочих наличных элементов в каждой струе не трудно вычислить тотчас же. Эта мысль проведена в примерах, приведенных на стр. 24—28.

Когда элемент входит в систему и выходит одной единственной струей, можно вполне пользоваться тем же методом с некоторыми лишь поправками. Так, при горении угля в печи, углерод составляет главную часть твердого топлива; количество топлива замеряется, и посредством анализа определяется содержание углерода. Углерод в дымовой трубе мы имеем уже в виде газов (CO_2 , CO), незначительная его часть, остающаяся в золе, вследствие недожога или провала через колосники, определяется анализом, и таким образом вычисляется количество газа дымовой трубы. Вследствие того, что азот в газы дымовой трубы в сущности целиком попал из воздуха (азотом топлива обычно можно пренебречь, то тотчас же можно вычислить количество воздуха, израсходованного для горения. Следует заметить, что углерод и азот используются для определения в этой системе отношений объемов входящих и выходящих потоков. И в других случаях бывает возможно пользоваться для этого определенными элементами или компонентами, что очень упрощает вычисления.

Стехиометрическое соотношение, зависящее, как известно, от характера протекающих реакций, часто весьма упрощает задачу и дает возможность сделать важные выводы в количественном отношении. Так, анализ газов дымовой трубы при горении угля дает определенное количество CO_2 , CO , O_2 и N_2 . Так как в действительности все количество N_2 получено из воздуха, становится возможным немедленно определить количество поступившего вместе с ним O_2 . Количество O_2 , обнаруженное анализом дымовых газов, включая сюда свободный и связанный кислород, бывает всегда меньше того, которое приходит с воздухом. Известно, что по химическому составу угля почти весь этот дефицит должен быть отнесен на горение водорода в топливе. Такая разница между кислородом, соответствующим азоту, и кислородом, определяемым анализом, должна, следовательно, соответствовать водороду и являться мерилем горючего водорода в угле.¹ В подобном случае анализ газа дымовой трубы равноценен анализу самого топлива (см. примеры на стр. 24—28). В то время, как подобные точные соотношения, вытекающие из реакций, представляют большую ценность там, где они имеются, бывает много случаев, когда число побочных реакций настолько велико и полнота их протекания настолько неопределенна, что вносимые в химические уравнения стехиометрические соотношения теряют свое значение. Это имеет место часто в органических реакциях, но даже при решении задач неорганической химии необходимо это иметь в виду и в вычислениях надо заботиться о всех побочных

¹ Следует помнить, что при анализе газов, насыщенных водяным паром, по самому характеру универсальных приемов газового анализа само собою исключаются водяные пары, и в результате получается непосредственно состав газов, свободных от воды. Причина этого заключается в том, что хотя объем газов до анализа больше, чем объем сухих газов, благодаря наличию водяного пара, однако увеличение это составляет всегда определенную часть общего объема газов.

В сущности, в этом случае газовый анализ проводится как бы под давлением меньше общего давления на постоянную величину упругости водяного пара при данной температуре.

реакциях, которые могли бы в той или иной мере повлиять на результат. Однако подобные опасения не должны препятствовать применению стехиометрических соотношений в тех случаях, когда они вполне бесспорны.

Как в стехиометрических расчетах в аналитической химии, так и в технологических расчетах нет никакой надобности, чтобы применяемые химические уравнения соответствовали точному механизму реакции. Всякие комбинации отдельных частных реакций могут быть использованы, даже если при этом исключаются промежуточные, но взаимно компенсирующие одна другую стадии, например, реакции в водных растворах незачем записывать в форме ионных уравнений при вычислении количеств осадков, объемов растворов и т. п.

Основные величины при вычислениях. Полный баланс прихода и расхода в промышленном процессе приходится производить относительно редко. Гораздо чаще приходится объяснять значение результатов частных обследований. Обычно последние являются анализами разных потоков. Подобные анализы почти никогда нельзя непосредственно сопоставлять один с другим. Такое сравнение могло бы повести к грубой ошибке, которая и обнаружится в полном балансе расхода и прихода. Это объясняется тем, что обыкновенно результаты анализа выражаются в процентах от рассматриваемого потока, — такой анализ сам по себе не может показывать отношения объема данной материальной струи к объему всякой другой.

Пусть, например, сушилка выпускает в час тонну готового продукта, содержащего 20% воды. Сколько кг воды испаряется в час, если сырой продукт, входящий в аппарат, содержит 60% влажности? Напрашивается такой ответ: влага с 60% доходит до 20%, т. е. уменьшается на 40% в час; однако эти две цифры не имеют прямого отношения друг к другу, потому что они не относятся к одной и той же основной величине, так как впускается в сушилку в час 2 т (60% влаги), а выходит 1 т (20%).

Такого рода затруднения лучше всего устранять приведением результатов анализа к одной общей основной величине с тем, чтобы можно было делать непосредственное сопоставление. В данном случае такой величиной является само сушимое вещество. Там, где как и в приводимом случае существует один общий компонент, который и входит и выходит одной единственной струей, и нет никакого накопления этого компонента в аппарате за время процесса, количество этого компонента, подвергающегося операции в какое-нибудь определенное время, должно быть одинаково в обоих анализах и потому может служить постоянной основой для сравнения. Следовательно, если в результате анализов получено, что отношение воды к сухому материалу равно 0,25 в высушенном продукте и 1,50 в сыром, то разница 1,25 выразит воду, испарившуюся на кг сухого вещества. Так как сухое вещество составляет 80% готового продукта или 800 кг, то испаряться воды (усушка) будет в 1,25 раз больше, т. е. 1000 кг в час.

Рассуждения предыдущего раздела можно выразить следующим правилом: там, где в операции имеются элементы или компоненты одного направления в потоке, надо задаваться % составом по отношению к этим элементам.

Только что описанный метод следует признать довольно запутанным для тех случаев, когда поток всех компонентов сложный. Однако применение его так распространено, что его следует усвоить.

Очевидно, что ту же самую задачу можно решить без перечисления аналитических данных для новой основной величины. Обозначим через u вес вводимого в сушилку материала и приравняем впуск сухого вещества к выпуску его из аппарата:

$$0,40 u = 0,80 \cdot (1000); \text{ откуда } u = 2000$$

$$\text{Испарение} = \text{потере воды} = 2000 - 1000 = 1000 \text{ кг.}$$

Основной величиной в подобных расчетах является не только количество, но и время. Например, в предыдущем вычислении основной единицей времени был один час. Основной единицей времени при вычислениях может служить длительность обследования или же всякая другая подходящая единица.

Часто единица времени не указывается определенно, и ее истинная величина неизвестна, например, время, требуемое для обработки известного количества продукта или для получения известного количества продукта или потребления количества сырья.

В начале расчета нередко приходится задаваться двумя или большим числом основных величин, однако надо все усилия направлять к тому, чтобы свести их к одной. Так, когда анализ пересчитан на $\%$, то при этом предоставляется произвольный выбор в качестве основания расчета или 100 частей отдельного вещества или всего потока, а также принимается за основу расчета время, потребное для обработки или прохождения через аппарат 100 частей именно этого потока.

Когда же имеем дело со скрещивающимися потоками, случается часто, что какой-либо элемент или компонент переходит от одной струи к другой полностью или же частично; такой элемент можно брать за основание расчета для определения отношения одной струи к другой. Например, в доменной печи струя твердых тел, состав и количество которых известны благодаря обычным записям, идет вниз сквозь печь и выходит из нее в виде двух отдельных струй: шлак и чугун. Вверх через печь идет поток газов, образовавшийся в результате взаимодействия воздуха с коксом в самой печи. Отношение воздуха к колошниковому газу определяется через общий компонент—азот. Подобным образом отношение шихты к чугуну определяется через другой общий компонент—железо. Отношение же этих двух струй друг к другу можно определить посредством углерода или кислорода, так как тот и другой идет от шихты в струю газа. Если пользоваться углеродом, то должно принять во внимание, что он, как показывает анализ, остается в чугуне; если же пользоваться кислородом, то следует принимать в расчет как кислород воздуха, так и кислород неизменной части шихты.

Советуем над расчетом записывать величину, принятую за основную, для того, чтобы ясно была видна замена одной основной величины другой, а также записывать и отношения, с помощью которых делаются преобразования. Применение таблиц оказывает при этом немалую помощь в смысле сокращения и уяснения расчета.

Недостающие данные. Следует указать на то, что расчеты в технологии часто требуют некоторых допущений и являются приближенными. В промышленном деле—будет ли то вследствие неудобств, или во избежание лишних расходов, или в связи с общим ходом процесса, но весьма часто бывает невозможно произвести все необходимые измерения. В подобных случаях рекомендуется делать такого рода упрощающие предположения, которые оправдываются условиями, и на них, пользуясь другими данными, основывать количественную оценку процесса, имея однако в виду, что точность расчета обуславливается именно этими предположениями.

Общий план решения задач. При решении задач полезно руководствоваться следующим планом:

- 1) Сделать диаграмму потоков—технологическую схему процесса.
- 2) Выписать относящиеся сюда химические уравнения.
- 3) Указать величины, принятые за основные при вычислении.
- 4) Расположить в виде таблиц расчетные данные и промежуточные стадии вычисления.

В простых случаях выполнение первых двух пунктов можно выпустить. Применение вышеизложенных общих принципов и удобство пользо-

вания ими можно иллюстрировать нижеследующими примерами. Первый из них касается горения мазута, а прочие два относятся к производству сернистого газа сжиганием серы и к поглощению сернистого газа известковым молоком.

Другие примеры приведены в главе „Печи“.²

Пример 1. Паровой котел сжигает мазут с сухим воздухом при 20° и давлении в 765 мм по ртутн. барометру. Анализ (Орса) дымовых газов в среднем дает 12,9% CO₂; 3,8% O₂ и 83,3% N₂; температура газов в дымовой трубе у ее основания равняется 280°. Предполагая, что нефть содержит только углерод и водород, вычислить:¹

- 1) процентный избыток воздуха;²
- 2) весовой процент углерода в нефти;
- 3) количество воздуха (в куб. метрах), приходящееся на кг нефти.
- 4) количество дымовых газов (в куб. метрах), входящее в трубу и приходящееся на кг нефти.
- 5) парциальное давление водяного пара в дымовых газах.

Решение. 1) Так как анализ данной нефти неизвестен, то неудобно взять ее за основание при расчетах. Анализ же газа дымовой трубы известен, и следовательно его можно взять за основание вычисления. Примем за основание 100 кг-мол. дымовых газов.³

Для расчета распределение отдельных элементов можно принять таким, как показано в таблице.

Газ	Мол.	Атомы С	Мол. O ₂	Мол. N ₂
CO ₂	12,9	12,9	12,9	—
O ₂	3,8	—	3,8	—
N ₂	83,3	—	—	83,3
Сумма	100,0	12,9	16,7	83,3

Отсюда видно, что отношение суммы O₂ к N₂ в дымовой трубе (16,7/83,3) меньше, чем в воздухе (20,0/79,1). Причина этого та, что часть кислорода воздуха соединилась с водородом нефти и образовала водяной пар, что не отмечается анализом в аппарате Орса.

Оставляя в стороне незначительное количество азота нефти, весь N₂ дымовых газов, как уже отмечено, должен был притти из воздуха, поэтому количество израсходованного

воздуха равно $83,3 \cdot 0,791 = 105,2$ мол. [таким образом „азотный баланс“ используется для определения израсходованного воздуха].

Так как сухой воздух содержит 20,9% O₂, то количество O₂, входящее в печь, составляет $0,209 \cdot 105,2 = 22,0$ мол. Но общее количество O₂ в сухом топочном газе равно 16,7 мол., разность $22,0 - 16,7 = 5,3$ мол. пошла на то, чтобы дать 10,6 мол. водяного пара, сжигая 10,6 мол. водорода. [Так составляется „кислородный баланс“ для определения израсходованного кислорода при сжигании водорода].

„Процентный избыток воздуха“ относится к воздуху, израсходованному сверх теоретически требуемого для полного сгорания. Если иметь дело с O₂ воздуха, излишек воздуха удобно определить через отношение количеств O₂ вместо отношения количеств воздуха. Избыточное количество кислорода воздуха, приходящийся на потребное количество кислорода, можно вычислять различными способами.

$$\frac{\text{излишнее}}{\text{все количество} - \text{излишнее}} = \frac{3,8 \cdot 100}{22,0 - 3,8} = 20,9\%$$

$$\frac{\text{излишнее}}{\text{потребное}} = \frac{3,8 \cdot 100}{12,9 + 5,3} = 20,9\% \text{ или}$$

$$\frac{\text{все колич.} - \text{потребное}}{\text{потребное}} = \frac{[22,0 - (12,9 + 5,3)] \cdot 100}{12,9 + 5,3} = 20,9\%.$$

Надо заметить, что эти три способа представляют из себя простое преобразование одного и того же соотношения.

2) Так как вес нефти равен весу углерода $12,9 \cdot 12$ + вес водорода $10,6 \cdot 2,02 = 175,2$ кг, то легко рассчитать процентное количество углерода по весу нефти

$$\frac{12,9 \cdot 12 \cdot 100}{12,9 \cdot 12 + 10,6 \cdot 2,02} = \frac{154,8 \cdot 100}{154,8 + 21,4} = 87,8\%$$

¹ Такое предположение сделано для того, чтобы упростить вычисления. Нефть содержит небольшой процент азота, серы, золы и т. д., но можно показать, что вышеозначенное предположение ведет к очень незначительной ошибке. Действительно, объем азота нефти чрезвычайно мал по сравнению с объемом азота, полученным от израсходованного воздуха. Точно так же азотом угля, кокса и дерева можно пренебречь без всякой серьезной ошибки. В случае сгорания генераторного газа невозможно пренебречь азотом без крупной ошибки.

² Это будет разбираться дальше в главе „Сгорание“.

³ См. стр. 21.

Цифра эта не требуется для дальнейших вычислений, но она служит некоторым контролем точности анализов топочных газов, так как она вполне соответствует обычному составу нефти. Мимоходом следует заметить, что найденное атомное отношение углерода к водороду, именно — $12,9/2 \cdot 10,6 = 0,609$ больше, чем $1/2$, что показывает, что нефть содержит больше углерода, чем это соответствует формуле $(\text{CH}_2)_n$.

3) Так как вес нефти равен 175,2 кг и количество сухого воздуха равно 105,2 мол., то воздух, расходуемый на 1 кг нефти нетрудно определить

$$\frac{105,2}{175,2} \cdot \frac{\overset{\text{м}^3 \text{ при Н. У.}}{22,4}}{273} \cdot \frac{\overset{\text{при } 20^\circ}{293}}{760} \cdot \frac{\overset{\text{при } 765 \text{ мм}}{760}}{765} = 14,3 \text{ м}^3/\text{кг нефти}$$

4) Газы дымовой трубы содержат 100 мол. сухого газа (CO_2 , O_2 и N_2) + 10,6 мол. водяных паров, всего газа дымовых труб — 110,6 мол.

Объем газов топочных на кг нефти высчитывается так:

$$\frac{110,6}{175,6} \cdot \frac{\overset{\text{м}^3 \text{ при Н. У.}}{22,4}}{273} \cdot \frac{\overset{\text{при } 280^\circ \text{ Ц}}{553}}{760} \cdot \frac{\overset{\text{при } 765 \text{ мм}}{760}}{765} = 28,4 \text{ м}^3/\text{кг}$$

5) Парциальное давление водяного пара в топочных газах легко вычисляется при помощи закона Дальтона:

$$p = 765 \cdot \frac{10,6}{110,6} = 73 \text{ мм ртутн. столба.}$$

Пример 2. Анализ газа печи для сжигания серы дает 17,4% SO_2 и 2,7% O_2 . Воздух входит в печь при $15,6^\circ \text{Ц}$; температура выходящего газа 760°Ц . По выходе из печи газ охлаждается до $21,0^\circ \text{Ц}$ в свинцовых холодильниках, отдавая свое тепло воде, температура которой поднимается с 16° до 32°Ц . Серы сгорает 99,4 % расход ее в час равен 310 кг. Влажностью воздуха можно пренебречь и его давление считать нормальным. Требуется определить:

- 1) количество SO_2 (в кг), пропускаемое печью в час;
- 2) количество поглощаемого воздуха (в м^3) в минуту;
- 3) объем газа, выпускаемого печью и холодильником в м^3 в минуту;
- 4) потерю тепла печи в б. калориях за час;
- 5) расход воды на охлаждение в литрах за час.

Решение. Обращая внимание прежде всего на анализ газа, мы замечаем, что некоторое количество SO_3 , образовавшееся за время сжигания, не выявлено в газовом анализе, так как оно конденсировано в виде H_2SO_4 либо за счет влаги, заключенной в воздухе, либо воды, израсходованной на насыщение образца газа еще до анализа. Для удобства примем, что анализ относится не к маленькому количеству взятой пробы, а к 100 молекулам.

Таким образом, за основание расчета принято 100 мол. газа по анализу, приведенному в таблице:

Все количество O_2 воздуха (соответствующее N_2) = $79,9 \cdot \frac{20,9}{79,1} = 21,11$ мол.

Количество O_2 , не принятое в расчет в анализе газа для образования SO_3 , = $21,11 - 20,1 = 1,01$ мол. $\text{O}_2 = \frac{2}{3} \cdot 1,01 = 0,67$ мол.

Так как при образовании 17,4 мол. SO_2 образуется 0,67 мол. SO_3 , то 3,7% всей сжигаемой серы идет на SO_3 .

Для получения требуемых данных, за основную единицу времени лучше всего взять указанную в вопросе, т. е.

- 1) Основная единица — 1 час

$$\frac{\overset{\text{кг сырой серы}}{310}}{\overset{\text{кг S}}{0,994}} \cdot \frac{\overset{\text{мол. S}}{1}}{32,07} \cdot (1,0 - 0,037) = 580 \text{ кг } \text{SO}_2 \text{ в час}$$

Г а з	Мол.	Вычисленное кол. молекул O_2	Вычисленное кол. атомов S
SO_2	17,4	17,4	17,4
O_2	2,7	2,7	0,0
N_2 (и т. д.)	79,9	0,0	0,0
Сумма...	100,0	20,1	17,4

2) Основная единица — 1 минута

кг SO ₂	мол. SO ₂	мол. N ₂	мол. возд.
580	1	79,9	100
60	64,07	17,4	79,1

$$\frac{288,6}{273} = 20,7 \text{ м}^3 \text{ воздуха в минуту}$$

3) Основная единица — 1 минута

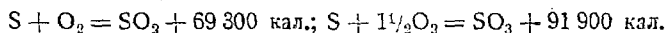
кг SO ₂	мол. SO ₂	мол. газа	м ³ при Н. У.
580	1	100,67	22,4
60	64,07	17,4	273 + 760

$$\frac{273}{273} = 78,5 \text{ м}^3 \text{ в мин. выходит из печи.}$$

Количество выходящего из холодильника газа (20 м³) находят посредством исправления последнего результата на изменение температуры.

В присутствии влаги SO₂, объем которого, как следует заметить, добавляется к объему газа, полностью сконденсировался бы при столь низкой температуре в H₂SO₄.

4) Основная величина—100 мол. газа согласно анализу = 100,67 мол. всего газа (включая SO₂). Тепло реакции можно получить из данных Бертело:



Развивающееся тепло, следовательно, будет равно 17,4 (69 300) + 0,67 (91 900) = 1 268 000 кал. Действительное тепло, уносимое каждым газом, есть теплосодержание одной мол. при 760° Ц минус теплосодержание его при 15,6° Ц, умноженное на число молекул (см. рис. 4 стр. 14).

Количество тепла, относящееся к SO₂, нельзя получить, но не будет крупной ошибкой, если принять его молекулярную теплоемкость равной 10.

Распределение тепла в печи

Газ	Мол.	Полное количество тепла		Разница	Произведение
		при 760° Ц	при 15,6° Ц		
SO ₂	17,4	8100	138	7962	138 600
SO ₃	0,67	7600	156	7444	5 000
N ₂ + O ₂	82,6	5400	107	5293	437 200
					580 800

Количество тепла, оставшегося в газе

$$687\,200 \cdot \frac{9,4}{18,07} = 358\,000 \text{ кал. в час.}$$

5) Основная величина — 100 молекул газа по анализу.

Распределение тепла, выходящего из холодильника

Газ	Мол.	Полное количество тепла		Разница	Произведение
		при 21,0° Ц	при 15,6° Ц		
SO ₂	17,4	186,5	138,3	48,2	838
SO ₃	0,67	211	156	55	37
N ₂ + O ₂	82,6	143,3	106,6	36,7	3030
					39 05

Избыток количества тепла, уносимого газом при температуре 21,0°, над теплом при 15,6°

Так как газ входит в холодильник с 580 800 кал. и покидает его с 3905 кал., он передает охлаждающей воде 576 900 кал. на 100 мол. газа или:

$$576\,900 \cdot \frac{9,4}{18,07} \approx 300\,000 \text{ кал. в час.}$$

Так как охлаждающая вода имеет 16° Ц, ее расход будет

$$19\,200 = \frac{300\,000}{32-16} \text{ кг.}$$

Пример 3. Газ серной печи поглощается известковым молоком для того, чтобы образовать

в башнях бисульфит кальция. В башне молоко идет противотоком к газу. Газ покидает башню при 24,4° Ц с содержанием согласно анализу—2,8% O₂ и при полном отсутствии SO₂. Получившийся раствор бисульфита содержит 7,05% количества SO₂, 1,15% которого свободно, а остальные 5,90% оказываются в виде соли. Употребляемая доломитная известь содержит 82% CaO и 16% MgO. Начальная температура газа 15,6° Ц. Расчет можно вести, исходя из количества воздуха, введенного в печь, т. е. 20,7 м³/мин. (см. выше пример 2).

Определить:

- 1) Как велик объем газа, выходящего из аппарата в минуту.
- 2) Каков должен быть расход извести и воды для того, чтобы обработать этот объем газа в течение часа.
- 3) Сколько раствора вырабатывается в час.

Решение. 1) Основная единица — 1 минута.

$$\frac{\text{м}^3 \text{возд. при } 15,6^\circ \text{Ц}}{20,7} \cdot \frac{\text{N}_2 \text{ при } 15,6^\circ \text{Ц}}{0,791} \cdot \frac{\text{Отбросный газ при } 15,6^\circ \text{Ц}}{(1 - 0,028)} \cdot \frac{\text{То же при } 24,4^\circ \text{Ц}}{297,4 / 288,6} = 17,4 \text{ м}^3 \text{ сухого газа в мин.}$$

Однако надо помнить, что этот газ насыщен водяным паром (понижение упругости водяного пара над насыщенным раствором незначительно). Следовательно, парциальное давление водяного пара составляет 22,7 мм и потому весь объем будет

$$17,4 \cdot \frac{760}{760 - 22,7} = 18,0 \text{ м}^3.$$

2) В задаче может быть задан дан анализ газа, впускаемого в аппарат и выпускаемого из него. Количество азота газа практически не меняется; он не мог бы исчезнуть иным путем, как только растворившись в растворе бисульфита кальция. Однако, растворимость его очень мала, да и применяемая вода более или менее насыщена N_2 , что делает ошибку еще меньше. Следовательно, азот удобен в качестве основной величины для сравнения количеств газов — выпускаемого и впускаемого.

Основная величина — 100 молекул N_2 .

Компонент	Отношение к 100 мол. азота	
	При входе	При выходе
SO_2	$17,4/79,9 = 21,78$	0
O_2	$2,7/79,9 = 3,38$	$2,8/97,2 = 2,88$

Казалось бы, что отношение кислорода к азоту должно быть одно и то же как при выходе, так и при входе. Однако наблюдается заметное его уменьшение, которое нужно приписать окислению SO_2 ; реакция эта имеет здесь важное значение. За счет этого уменьшения $3,38 - 2,88 = 0,50 \text{ O}_2$ окисляет двойное количество SO_2 или 1,00 мол. Следовательно, из всего SO_2 , входящего в аппарат 1,00/21,78 или 4,59% окисляется до SO_3 . Так как лишь 96,3% сжигаемой серы входит в аппарат в виде SO_2 , то окисление в башне составит 4,59% от этого количества или 4,42% плюс 3,7% окисления в печи, т. е. 8,12% всей сжигаемой серы, превращающейся в SO_3 . Все это входит в аппарат, так как воздух сухой. Если бы он был сырой, то печные 3,7% конденсировались бы в холодильниках в раствор H_2SO_4 .

Основная единица — 1 час

$$\frac{\text{кг сырой серы}}{310} \cdot \frac{\text{кг S}}{0,994} \cdot \frac{\text{кг S в растворе в виде SO}_3}{(1 - 0,0812)} \cdot \frac{\text{мол. SO}_2 \text{ в жидкости}}{1} \cdot \frac{5,90}{32,07} \cdot \frac{7,05 \cdot 2}{7,05 \cdot 2} = 3,7 \text{ мол. CaO} + \text{MgO в час}$$

только для связывания SO_2

Основная величина — 100 кг извести

$$\begin{aligned} \text{Молекул CaO} &= \frac{82}{56} \cdot \dots \cdot 1,463 \\ \text{Молекул MgO} &= \frac{16}{40,3} \cdot \dots \cdot 0,397 \\ \text{Молекул всех окисей} &\dots \cdot 1,860 \end{aligned}$$

Основная единица — 1 час

$$\text{Количество требуемой извести} = \frac{\text{мол.}}{3,7} \cdot \frac{100}{1,86} = 198 \text{ кг извести в час только для образования соли.}$$

$$\text{Количество SO}_3 = \frac{\text{кг сырой S}}{\text{кг S}} \left| \frac{\text{кг S в виде SO}_3}{\text{мол. SO}_3} \right| \frac{1}{32,07} = 0,78 \text{ мол. SO}_3 \text{ (окислено в SO}_3\text{)}$$

Различных компонентов входит в жидкость

$$\text{известн} = \frac{(3,7 + 0,78) (198)}{(3,7)} = 240 \text{ кг.}$$

$$\text{SO}_2 = \frac{\text{кг сырой S}}{\text{кг S}} \left| \frac{\text{кг S в ви-де SO}_2}{\text{мол. SO}_2} \right| \frac{64,07}{32,07} = 565 \text{ кг.}$$

$$\text{SO}_3 = \frac{\text{кг сырой серы}}{\text{кг S}} \left| \frac{\text{кг S в ви-де SO}_3}{\text{мол. SO}_3} \right| \frac{80,97}{32,97} = 62,5 \text{ кг.}$$

$$\text{Общий вес твердых тел} = 240 + 565 + 62,5 = 867,5 \text{ кг}$$

$$\text{Общий вес жидкости} = \frac{565}{0,0705} \approx 8000 \text{ кг.}$$

(NB. Это и есть ответ на вопрос 3).

Вычитанием определяем количество воды в жидкости $8000 - 867,5 = 7132,5 \text{ кг}$. К этому надо прибавить небольшое количество воды, забранное газом. Оно вычисляется так:

$$\frac{\text{м}^3 \text{ газа в мин.}}{\text{м}^3 \text{ газа в час}} \left| \frac{\text{м}^3 \text{ H}_2\text{O пара}}{\text{м}^3 \text{ при Н. У.}} \right| \frac{\text{мол. H}_2\text{O}}{\text{мол. H}_2\text{O}} = 24,0 \text{ кг H}_2\text{O, испаряющейся в час.}$$

Следовательно полное количество использованной воды $= 7156,5 \text{ кг в час}$.

ГЛАВА II

ЖИДКОСТНЫЕ ПЛЕНКИ¹

Давно было замечено,² но недостаточно оценено то, что при движении газа или жидкости вдоль твердой поверхности или при движении газа вдоль поверхности жидкости на поверхности соприкосновения движущегося вещества с неподвижным остается пленка, совершенно отличная по свойствам от главной массы движущегося вещества. Эта жидкостная пленка образует границу или зону между той средой, которая быстро движется, и той, которая находится в состоянии покоя; пленка эта оказывает такое влияние на перенос тепла, диффузию пара и газа, как будто бы она была

В этой главе термин „жидкостные пленки“ употребляется как термин гидравлический, т. е. как общее наименование пленок жидкостей в широком смысле—капельных и газообразных.

² Водяная пленка была впервые отмечена Пекле (Peclet. Traité de la Chaleur. Chap. VIII, 131, 1844). После этого существование таких пленок и их свойства были проверены другими, главным образом, Лангмюром (Langmuir) в 1912 г. (Phys. Rev. 34, 421), который, работая над газами, открыл влияние скорости их на плотность пленки и на передачу теплоты через нее.

совершенно новым веществом. Свойства пленки оказывают влияние на многочисленные технические процессы, и поэтому необходимо ближе ознакомиться с нею.

В газообразном пространстве достаточно большого объема движение газа чрезвычайно свободно и быстро, благодаря отсутствию заметного сопротивления движению, т. е. вязкость в газах очень мала. Давления в разных местах объема легко и быстро выравниваются. Разница температур также имеет тенденцию к исчезновению в виду смешения при конвекции. Для жидкостей существуют те же условия, но выравнивание в жидкости менее совершенно, т. е. вследствие большей сопротивляемости движению, вязкость жидкостей значительно больше вязкости газов.

В отличие от легкости движения при конвекции внутри жидкости, движение в непосредственной близости к поверхности стенок столь незначительно, что по сравнению со всей массой жидкости пленка может рассматриваться, как неподвижная.

Рассмотрим случай установившегося движения в трубе. График движения массы газа, находящегося на том или ином расстоянии от стенки трубы, дан на рис. 7.¹ У самой стенки трубы течения нет. При удалении от нее скорость движения газа возрастает. Вблизи стенки каждый элемент ² потока течет в направлении, параллельном стенке, не имея заметной слагающей скорости в направлении, перпендикулярном к ней. При удалении от стенки скорость не только возрастает, но, в конце концов, когда достигается ордината FG, изменяется весь характер движения. Струйки начинают теперь принимать форму спирали. Все перемещение продолжает быть параллельным поверхности, но в направлении отдельных струек появляется большая слагающая, нормальная к поверхности стенок. Это сложное движение оказывает перемешивающее действие на смежные слои потока и называется турбулентным.

Итак, на поверхности стенки трубы движущийся поток оставляет тонкую пленку газа, движущуюся параллельно поверхности трубы, но со скоростью значительно меньшей, чем средняя скорость движения потока, и движение этой пленки, в отличие от движения всей массы потока, совсем не имеет вихревого, турбулентного характера. Поэтому всякое движение в этой пленке по направлению, нормальному к поверхности, должно идти медленным процессом диффузии, усиливаясь от слоя к слою по направлению к оси трубы.

В виду того, что все прослойки пленки отличаются медленностью движения от соседнего к пленке быстро движущегося слоя, правильнее будет представлять пленку, как неподвижный элемент системы, что вполне допустимо практически. Там, где движение главной массы жидкости вдоль поверхности значительно, эта пленка обычно бывает очень тонка.

Когда тепло от твердого тела переходит к газу, например, от паропроводной трубы к воздуху, то оно распространяется путем лученспускания и теплопроводности и, собственно, в очень незначительной степени через конвекцию. Молекула газа ударяется в паропровод и отбрасывается с большей скоростью, т. е. с большей кинетической энергией. Если она ударяется с другой молекулой, то наделяет ее большей скоростью; эта молекула передает энергию в свою очередь другой, и тепло распространяется посредством теплопроводности. Если первоначально „нагретая“ в этом случае молекула, благодаря ее собственному движению, выходит в окружающее про-

¹ Основан на данных Стантона (Stanton), Маршалла (Marshall) и Бриана (Bryant). Proc. Roy. Soc. Ser. A, 97 (1920), 413.

² Подобная струйка составляет очень незначительную часть потока, но содержит много молекул. Каждая молекула имеет свое неупорядоченное движение, но целая группа молекул образующая элемент потока, движется как одно целое, точно так же, как дождевая капля падает вертикально в находящемся без движения воздухе, несмотря на хаотическое движение водяных молекул в самой капле.

странство, то она увлекает с собой тепло; такой процесс передачи тепла называется диффузией. Если эта молекула вместе со многими другими увлекается с поверхности трубы благодаря движению некоторой части газа, она передает тепло вследствие конвекции. Итак, тепло проходит через неподвижную пленку посредством теплопроводности или диффузии. Процессы эти управляются своими законами (см. след. главы). Так как в данном случае невозможно опытным путем провести границу между подлинной теплопроводностью и диффузией, то оба явления рассматриваются совместно, и термин теплопроводность применяется для характеристики их совместного действия. Потеря тепла посредством излучения не зависит от природы газовой пленки (см. стр. 85 и 112).

Пар жидкости (или твердого тела) через эту газовую пленку может пройти только благодаря диффузии. Молекула, отбрасываемая от поверхности жидкости, должна проложить себе дорогу через молекулы газа, образующие неподвижную пленку, пока она не достигнет внешней стороны пленки и не будет захвачена и унесена прочь существующими там конвекционными токами.

Там, где главная масса потока течет по поверхности твердого тела или жидкости, вихревое или турбулентное движение на поверхности, пограничной с пленкой, будет уносить (как бы стирать) часть ее и тем самым конвекционными токами будет захватываться все большая глубина пограничного слоя. Толщина пленки при этом уменьшается, и это будет оказывать соот-

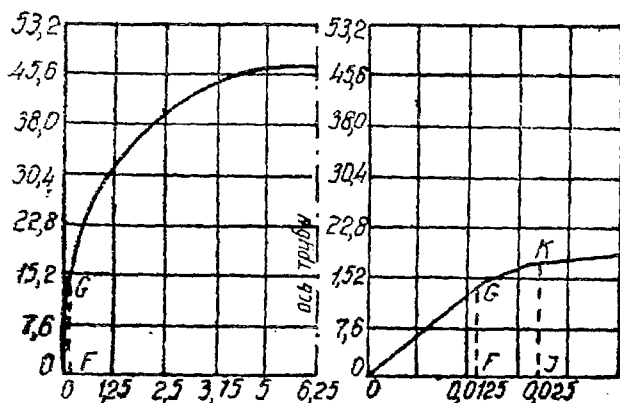


Рис. 7. Изменение скорости изотермического потока в круглой трубе. Абс.—Расстояние от стены в см. Ord.—Скорость в м/сек.

ветствующее влияние на явления, связанные с наличием пленки.

Понятие о неподвижной газовой или жидкой пленке применимо к большинству операций химической технологии. Более детальное применение этой идеи будет дано в главах, относящихся к поглощению газов из газовых смесей жидкостями, а также в главах, посвященных отдувке летучего вещества от мало летучего пропусканием через жидкую смесь потока воздуха или другого газа и растворению твердых тел в жидкостях и, наконец, в главах о теплопередаче в ее разнообразных формах. Такие явления лучше всего объяснимы при помощи понятия о пленочном сопротивлении потоку тепла или диффундирующего материала. Лангмюр (Langmuir)¹ на опыте показал, что такая пленка существует на нагретой серебряной пластинке, толщиной в несколько миллиметров (см. стр. 103). Приняв меры к тому, чтобы излучение тепла свести к минимуму, он медленно двигал чувствительный термоэлемент из окружающего воздуха по направлению к пластинке. До тех пор, пока термоэлемент находился на некотором расстоянии от поверхности, он почти сохранял постоянную температуру, регистрируя температуру воздуха, быстро выравнивающуюся вследствие сильных конвекционных токов. На определенном, весьма малом расстоянии термоэлемента от поверхности пластинки температура начинала быстро подниматься и достигала в конце концов той, которая могла быть получена только при соприкосновении с пластинкой. Наблюдаемая потеря тепла, исправленная на незначительную величину излучения от серебра,

¹ Trans. Am. Electrochem. Soc., 23 (1913).

дала возможность определить толщину воздушной пленки, которая оказалась приблизительно равной 4 мм. Точка, в которой температура начинает подниматься, лежит на внешней поверхности пленки: она в неподвижном воздухе была расположена на расстоянии 2—4 мм от поверхности пластинки.

Теоретическое изучение течения газа через капиллярную трубку привело Пуазейля (Poiseuille) к закону: объем газа, протекающего через тонкую трубку, прямо пропорционален четвертой степени внутреннего диаметра этой трубки. Этот закон основан на предположении, что, во-первых, главная масса газа имеет скорее прямолинейное движение, чем вращательное или зихревое, во-вторых, трение пропорционально относительному перемещению одного слоя газа по отношению к смежному с ним, и, в-третьих, у самой стенки трубки нет скольжения. Тот факт, что точные опыты с очень узкими капиллярными трубками подтверждают количественную точность этого закона, доказывает, что предположения верны; отсюда следует, что в непосредственном соприкосновении со стенкой нет движения.

Процесс диффузии пара с поверхности жидкости в инертный газ (например, воздух), с которым жидкость находится в соприкосновении, может быть пояснен рис. 8. Пусть линия OA представляет поверхность летучей жидкости, находящейся в соприкосновении с воздухом, при чем вся система имеет постоянную температуру. Линия OB представляет расстояние от поверхности жидкости в направлении к воздуху, а линия NK внешнюю поверхность неподвижной воздушной пленки. В направлении OA от точки O , как от начала, откладывается парциальная упругость жидкости. Упругость пара жидкости при температуре, которую она имеет, обозначена точкой C . Парциальное давление пара ее во всей массе воздуха будет ниже, как указывает точка D . Во всей массе воздуха благодаря конвекции пар так хорошо смешан с воздухом, что парциальное давление пара жидкости практически постоянно, как это указывает уровень горизонтальной линии DE . Через воздушную пленку пар проходит только вследствие диффузии, не смешиваясь путем конвекции. Эта диффузия происходит благодаря градиенту парциального давления CD , но, после того как пар прошел эту пленку, он смешивается с остальной частью воздуха путем конвекции: этим поддерживается постоянное парциальное давление DH во всем остальном объеме газа.

В ограниченном воздушном пространстве продолжающаяся в нем диффузия пара поднимает парциальное давление пара, — в некоторый момент оно достигнет величины HF . Это обстоятельство будет оказывать соответствующее влияние на градиент давления в неподвижной пленке (этот градиент теперь обозначается линией CF). Если подъем парциального давления пара в воздухе будет продолжаться, то градиент на протяжении пленки будет уменьшаться, диффузия вследствие этого будет замедляться до тех пор, пока не будет достигнуто окончательное равновесие, при котором на всем протяжении газовой пленки парциальное давление жидкости достигнет величины OC .

Пусть полное давление в пространстве будет изображаться горизонтальной линией LM . Если пространство не замкнуто, то это давление

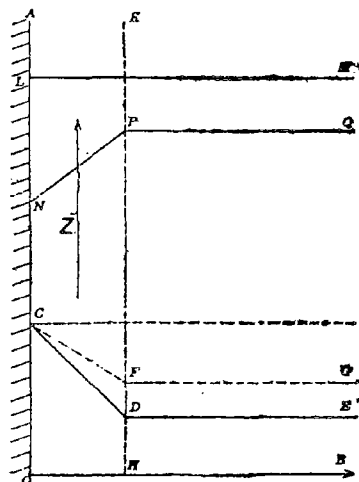


Рис. 8. Диаграмма парциальных давлений в жидкой пленке на границе жидкости и воздуха. $Абс.$ — Расстояние от поверхности жидкости (в направлении к газу). $Орд.$ — Поверхность жидкости. Усл. обозн. Z — упругость паров жидкости.

будет постоянным в каждой точке, независимо от того, близка ли к этой точке поверхность жидкости или нет. Так как на поверхности жидкости упругость пара жидкости тождественна с OC , то парциальное давление воздуха должно быть равно $OL - OC = QN$. Подобно этому во всем объеме воздуха парциальное давление воздуха будет равно $OL - HD$ или будет представлено горизонтальной линией PQ . Отсюда парциальное давление воздуха на неподвижной поверхности пленки будет представлено линией NP . Другими словами, парциальное давление воздуха на поверхности жидкости меньше, чем его парциальное давление на расстоянии от KN поверхности. Тем не менее, несмотря на существование градиента давления, воздух не будет диффундировать в жидкость вследствие столкновения молекул пара с молекулами воздуха, при чем молекулы пара оттесняют молекулы воздуха от поверхности жидкости.

Градиент давления воздуха поддерживается динамическим равновесием: диффундирующие молекулы пара преодолевают трение воздушной пленки, замедляющее их продвижение во внешнюю среду тем более, чем интенсивнее упругость пара. Градиент давления, вместе с ним и движение молекул пара, исчезнут, как только молекулы жидкости насытят газ и давление воздуха на поверхности жидкости станет равным давлению во всей массе газа.

Итак, движение вещества сквозь неподвижную газовую пленку есть процесс диффузии. Скорость диффузии газов и паров обратно пропорциональна квадратным корням из их молекулярного веса. Небольшие частицы твердых тел или жидкостей, взвешенные в газе (т. е. пыль или туман), могут быть рассматриваемы как имеющие бесконечно большой молекулярный вес, а потому можно принять, что они имеют ничтожную скорость диффузии. Совершенно очевидно, что газовая пленка в контакте с газом будет изолировать такие частицы твердых или жидких веществ от поверхности жидкости или твердого тела и затруднять их взаимодействие. Надо помнить, что при постоянной температуре кинетическая энергия (пропорциональная произведению молекулярного веса на квадрат молекулярной скорости) одинакова для всех газовых частиц данной среды. Так, если привести в соприкосновение с водой газообразный аммиак или хлористый водород слабой концентрации, то оба газа порознь будут очень быстро поглощены водой, но, с другой стороны, если допустить одновременное взаимодействие газов друг с другом и с водой, то образуется облако из твердых частиц хлористого аммония, которые невозможно будет растворить в воде. Почти без всякого результата мы будем прогонять воздух, содержащий такое облако, через серию промывателей, чрезвычайно легко справляющихся с поглощением отдельных газов водою.

Этим объясняется трудность поглощения серного ангидрида в контактом производстве серной кислоты. При растворении парообразного серного ангидрида в воде или слабой серной кислоте, пар серного ангидрида придет в контакт сначала не с жидкостью, но с водяным паром, который испарился из жидкости и смешался с газом. Серный ангидрид вступает в химическую реакцию с водяным паром и дает мельчайшие капельки серной кислоты наподобие тумана, эти капельки действительно отделены газовой пленкой от поглощающей жидкости. В качестве абсорбента надо применить жидкость, упругость водяного пара над которой незначительна, т. е. крепкий раствор серной кислоты. В силу этого, для поглощения серного ангидрида надо брать кислоту между 97 и 98%. При большем разбавлении упругость водяного пара достаточна для образования тумана, с другой стороны, при большей концентрации кислоты парциальное давление SO_2 над ней слишком велико, в связи с чем понижается полнота абсорбции. Образование тумана не всегда является следствием химических реакций. Так, например, если воздух, содержащий большой процент хлористого водорода, будет приведен в соприкосновение с водой, хлористый водород

может соединиться с водяным паром и сгуститься в туман, который пройдет через всю массу поглотителя непоглощенным.

Эти факты объясняют трудности удаления смолы из светильного и генераторного газов, цементной пыли и мышьяковистых паров из газов химических печей, сажи, образованной при неполном сгорании природного газа, и т. п. (см. главы VII и VIII).

ГЛАВА III

ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ (ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОДИНАМИКА)¹

Введение. Вопрос о движении жидкостей и газов является весьма существенным для инженера-технолога, поскольку часто встречается необходимость в перемещении жидких или газообразных масс. Если, например, твердое вещество в каком-либо процессе должно быть переведено в раствор, то обычно бывает более экономичным и удобным растворить его в начале процесса и подавать в виде раствора, вместо того, чтобы транспортировать в твердом виде.

Задачей гидродинамики является, во-первых, изучение методов измерения количеств жидкости, протекающей через данную систему, и, во-вторых, расчет энергии и давления, необходимых для поддержания данного движения, т. е., другими словами, изучение движения жидкостей, как результата разности давлений.

Теорема Бернулли. Все вопросы динамики жидкостей разрешаются на основании закона сохранения энергии; этот закон утверждает, что существует равенство между энергией, подведенной и отданной во всей системе или ее части, через которую протекает жидкость. Формулировка, выражающая этот закон, известна под названием теоремы Бернулли. Она предполагает, что через поток проведены в произвольных местах два сечения, оба поперек движения и перпендикулярно к направлению потока. Полную энергию, подводимую единицей веса жидкости к первому сечению, формула приравнивает всей энергии, уносимой той же единицей веса через второе сечение, однако, с поправкой на то количество энергии, которое могло быть подведено или отнято от жидкости на пути от первого сечения до второго. В гидравлике и гидромеханике капельных жидкостей обычно принято приравнивать механическую энергию при входе механической энергии при выходе, поскольку она не превращается в теплоту и обратно. Но переход механической энергии в теплоту возможен при наличии трения; в этом случае, при приравнивании, потеря трения вычитается из подводимой энергии. С другой стороны, если мы имеем сжимаемую (упругую) жидкость, т. е. газ или пар, давление которого различно у входа и выхода на выделенном участке. Такой газ расширяется на пути от сечения с более высоким давлением к сечению с более низким давлением.

При таком расширении данная часть потока производит работу над другой его частью находящейся впереди нее; в системе же, где поток непрерывен, можно считать, что каждая часть потока производит работу над самой собой или что над ней совершает работу та часть потока, которая находится позади нее. При этом увеличение механической энергии получается за счет падения теплосодержания самого газа или окружающей среды. Отсюда следует, что эта работа расширения должна быть прибавлена к подводимой механической энергии.

Теорема Бернулли применяется в двух формах. Первая форма выражает постоянство всей энергии на протяжении рассматриваемого участка,

¹ В этой главе, как и в гл. II, термин „жидкости“ означает как собственно жидкости (капельные), так и газы (упругие жидкости). *Прим. ред.*

вторая устанавливает равенство механической энергии между обоими сечениями, но с поправкой на ту механическую энергию, которая могла быть подведена к жидкости или отнята от нее на протяжении рассматриваемого участка.

Математически, первая форма выражается следующим уравнением:

$$E_1 + x_1 + p_1 v_1 + u_1^2/2g + H + R = E_2 + x_2 + p_2 v_2 + u_2^2/2g \dots (1)$$

а вторая, так как

$$E_1 - E_2 + H = W + (-F),$$

примет вид

$$x_1 + p_1 v_1 + u_1^2/2g + R + W = x_2 + p_2 v_2 + u_2^2/2g + F \dots (2)$$

Наиболее часто применяется вторая форма. Разберемся в физическом значении отдельных слагаемых. Эти равенства относятся к единице веса движущейся жидкости (т. е. в метрических мерах к 1 кг). E обозначает внутреннюю энергию жидкости в момент прохождения ее через соответствующее сечение, x — потенциальную энергию жидкости, как результат действия сил тяжести на жидкость, равную высоте жидкости в данном сечении над некоторой произвольно выбранной горизонтальной плоскостью. Эта плоскость обычно проводится через наиболее низко расположенную точку рассматриваемого гидравлического аппарата или системы для того, чтобы избежать отрицательных значений потенциальной энергии.

Произведение pv представляет собой механическую работу, затрачиваемую на продвижение жидкости через данное сечение. При входе в это сечение объему v надо преодолеть имеющееся здесь давление p (работа эта равна pv). Член $u^2/2g$ выражает кинетическую энергию жидкости, как следствие ее скорости. H есть тепло, переданное жидкости окружающими предметами при ее прохождении между рассматриваемыми сечениями; конечно, оно должно быть выражено в единицах работы, т. е. в кг-м на кг. R есть механическая работа, совершенная приборами, через которые проходит рассматриваемая жидкость (напр., насос). W обозначает работу, производимую жидкостью при ее расширении; она равна $\int p dv$. F представляет собой потерю вследствие трения, т. е. является механической энергией, превращенной в теплоту. Поскольку члены приведенных равенств суть слагаемые, то, очевидно, они должны иметь одинаковую размерность и выражаться в одинаковых единицах. Так как мы рассматриваем количество жидкости весом в 1 кг, то число кг-м энергии численно равно длине, выраженной в метрах или „высоте напора“. Так, x носит название потенциального напора, pv есть гидростатический напор и $u^2/2g$ называется скоростным напором. Величины E и W можно было бы так же рассматривать, как напоры, но это обычно не делается. отождествляя понятие энергии с напором, можно уравнение (2) переписать следующим образом:

$$h'_p + h'_s + h'_v + R + W = h''_p + h''_s + h''_v + h_f,$$

где h_p , h_s и h_v являются соответственно потенциальным гидростатическим и скоростным напором в каких-либо двух сечениях. Эта сумма членов, соответствующих одному сечению, равная сумме аналогичных членов, соответствующих другому сечению, показывает, что если один из данных напоров, например, скоростной, во втором сечении делается больше скоростного напора в первом, то это вызовет соответственное снижение одного или нескольких остальных напоров второго сечения.

Знание линейной скорости потока дает возможность подсчитать его расход (м³/сек.). Поэтому для измерения скоростей существует целый ряд приборов, основанных на том, что изменение гидростатического напора влечет за собой изменение скоростного напора, как это только что мате-

матически было доказано. Для более ясного представления о вышеперечисленных терминах, они будут по очереди разобраны.

Определения. Напор жидкости. Всякое давление, производимое жидкостью (капельной или газообразной) в любой точке, может быть выражено высотой столба жидкости той же плотности. Высота этого столба называется высотой напора жидкости или просто ее напором.

Пусть мы имеем поток, нацело заполняющий трубопровод. Вообразим открытую с обоих концов вертикальную трубку постоянного поперечного сечения, погруженную в поток в той точке, в которой требуется определить величину напора. Жидкость будет подниматься по трубке, очевидно, до тех пор, пока вес ее столбика точно не уравнивается с измеряемым давлением (избыточным по отношению к атмосферному).¹ Высота такого столбика и называется напором жидкости. Будучи помножена на плотность жидкости, она дает избыточное, по отношению к атмосферному, давление на единицу площади. Так, например, 3-метровый столб воды, массой 1000 кг на 1 м³, соответствует избыточному давлению в $3000 \text{ кг/м}^2 = 3000 \text{ мм}$ водяного столба.

Давление в неподвижной жидкости (или ее напор) в данной точке по всем направлениям одинаково. В случае движущейся жидкости это не имеет места, и измеряемое давление меняется, как это будет рассмотрено ниже, в зависимости от расположения отверстия измерительной трубки. Поэтому различают напор статический и скоростной в зависимости от направления движения жидкости относительно плоскости отверстия прибора, измеряющего напор.

В случае капельной жидкости, ее напор часто измеряется непосредственно манометром (U-образная трубка), заполненным этой жидкостью. Напор газа почти всегда измеряется посредством U-образной трубки, заполненной специальной жидкостью или водой. Формулы сильно упрощаются, когда напор выражен в метрах высоты столба той же жидкости (или газа), давление которой мы измеряем. Поэтому, несмотря на то, что манометры дают напор газа, измеряемый высотой столба жидкости, которой они наполнены, — в дальнейшем везде напор будет выражаться высотой столба самого измеряемого вещества. Так, например, если газ имеет напор в 25 мм водяного столба, то необходимо этот напор сначала разделить на 1000 (чтобы выразить в метрах) и затем умножить на отношение плотности воды к плотности газа в данном месте. Всякий напор может быть представлен, как давление на единицу поверхности, и измерен обыкновенным манометром.

Гидростатический (статический) напор может быть определен, как напор, который испытывает помещенная в жидкости площадка, расположенная в параллельной направлению движения потока плоскости (если движение имеется).

Статический напор жидкости обычно измеряется, как это было указано в предыдущем разделе, при помощи манометра, заполненного измеряемой жидкостью, одно колено которого сообщается с атмосферой. Если жидкость находится в движении, то плоскость отверстия манометра должна быть параллельна направлению этого движения, так как, в противном случае на показания будет влиять стремление движущейся жидкости войти или выйти из манометрической трубки.

В случае капельной жидкости гидростатическим напором будет называться высота (по вертикали) в метрах от нижнего отверстия манометра до верхнего уровня жидкости, его заполняющей. Если жидкость находится под давлением ниже атмосферного, т. е. гидростатический напор имеет отрицательное значение, то для измерения давления можно применить U-образную трубку, одно колено которой открыто и сообщается с атмо-

¹ Предполагается, что жидкость имеет постоянную плотность и не смешивается с воздухом.

сферой. В этом случае отрицательный гидростатический напор будет измеряться понижением уровня жидкости в открытом колене. Так как поверхность жидкости в манометре соприкасается с наружным воздухом, то напор получается относительно атмосферного давления.

Для измерения напора газов, положительного или отрицательного, применяется открытая U-образная трубка, наполненная подходящей жидкостью. Этот напор можно выразить высотой столба самого газа, путем умножения на отношение плотности жидкости к плотности газа.

Скоростной напор определяется, как напор, который испытывает помещенная в жидкость площадка, расположенная в плоскости, перпендикулярной к направлению движения потока, минус гидростатический напор жидкости в этом же месте.¹

Если на пути потока неподвижно укрепить небольшой предмет, то он будет отклонять элементарные струйки жидкости, которые при отсутствии предмета прошли бы в этом месте сечения. Отклонение такой струйки прежде всего вызывает замедление ее движения, следствием чего является потеря части кинетической энергии.

Обнаружено, что потеря кинетической энергии превращается в эквивалентное ей добавочное статическое давление жидкости.

Поэтому, если в поток погрузить кружочек с небольшим отверстием и расположить его в плоскости, лежащей под прямым углом к направлению потока (эта диафрагма предполагается сконструированной таким образом, что она лишь незначительно влияет на движение потока в целом и через ее отверстие фактически движения жидкости нет), то в отверстии этой диафрагмы создается давление, равное сумме гидростатического и скоростного напора.

Если к этому отверстию присоединить манометр, то разность показаний этого манометра и другого, подобного ему, измеряющего гидростатическое давление (в плоскости, параллельной направлению течения), даст величину скоростного напора.

Потенциальный напор в любой точке представляет собой высоту этой точки над некоторой произвольно выбранной горизонтальной плоскостью (эта плоскость проводится для удобства через наиболее низко лежащую точку системы, чтобы избежать отрицательных значений напора).

Измерительные приборы и манометры. Измерители давления. Для измерения статического (гидростатического) давления жидкостей и газов в том случае, если оно значительно выше или ниже атмосферного, применяют известные приборы Бурдона (Burdon).

Давление в них отсчитывается по шкале в кг на см^2 , когда давление превосходит атмосферное, и в см ртутного столба, если давление ниже атмосферного. Приборы, находящиеся в работе, нуждаются в периодической проверке.

Дифференциальные манометры. Как видно из формулы Бернулли, скорость течения жидкостей, найденная при помощи диафрагм, трубок Пито или Вентури, ротамессеров и т. п., зависит от разности напоров, выраженной в m столба самой протекающей жидкости (см. стр. 35). Эта разность напоров („разностный“ напор) часто определяется, как разность двух давлений, измеряемых дифференциальным манометром, вроде изображенной на рис. 9—11 U-образной трубки, расположенной в вертикальной плоскости.

Рассмотрим два манометра, одинаковые и рядом расположенные, оба заполненные водой, как манометрической жидкостью. Один манометр измеряет течение воды, а другой — движение воздуха, при чем линейные скорости движения потока воды и воздуха одинаковы.

¹ Полный гидродинамический напор, испытываемый площадкой, лежащей в плоскости перпендикулярной к направлению движения потока, очевидно, будет суммой скоростного и гидростатического напора; эта сумма иногда называется „полной удельной энергией.“

Далее пусть задано, что скоростной напор в обоих случаях будет один и тот же, если он выражен в метрах протекающей жидкости; для большей ясности примем его равным 0,61 м воды и воздуха соответственно.

Разность уровней (падение давления), показанная на дифференциальном манометре, в первом случае (0,61 м воды), будет численно равна величине напора произведенного потоком воды (0,61 м).

Во втором случае (для воздуха) разность уровней в дифференциальном манометре будет меньше, вследствие большей плотности воды, по сравнению с протекающим газом, как это видно из применяемой к обоим случаям формулы:

$$u = \sqrt{2g \cdot \frac{H_{г}}{\gamma_2}}$$

Если плотности газа и воды взять соответственно равными 1,20 и 1000 кг/м³, то разность (падение давления) во втором случае будет 0,61 · 1,20:1000,0 или 0,73 мм воды.

Другими словами, в случае протекания газов при небольших скоростях, разность уровней будет так мала, что крайне трудно будет получить точность определения, пользуясь для этой цели вертикальной U-образной трубкой, заполненной измерительной жидкостью, тогда как в случае жидкостей, протекающих при тех же самых скоростях, гораздо большая точность определения получается крайне легко; короче говоря, в случае низких скоростей, определения вышеуказанным образом возможны для жидкостей, а не для газов.

В случае газов разностный напор может быть измеряем при помощи стеклянной U-образной трубки, частично заполненной соответствующей жидкостью. Чтобы избежать накопления воды или другой жидкости, которая может конденсироваться из газа, U-образная трубка помещается выше точки присоединения к аппарату (рис. 13).

В случае жидкостей U-образная трубка может быть опрокинута; в виду частичного наполнения верхней части газом, протекающая жидкость может заполнить только нижнюю часть трубки (рис. 11, если его повернуть на 180°).

Если U-образная трубка не употреблена в перевернутом виде, нижнюю часть трубки возможно использовать для заполнения ее измерительной жидкостью, не смешивающейся с измеряемой и большего удельного веса.

Тогда искомая разность напоров будет равна видимой разности уровней измерительной жидкости в обоих коленях, умноженной на отношение $\frac{y-s}{s}$, где y и s суть, соответственно, удельные веса измерительной и измеряемой жидкостей.

Так, если давление масла измеряется при помощи U-образной трубки с ртутью, то напор масла будет (принимая $s=900$ кг/м³) равен наблюдаемой разности уровней ртути, умноженной на $\frac{13600-900}{900}$ или 14,1. Несмотря на то, что показания прибора значительно уменьшаются при употреблении ртути, все же это падение не так велико, как в случае применения воды для измерения напора газа. Отсюда следует, что измерение малых скоростей жидких тел может производиться с такой же точностью и такими же манометрами, как и измерение больших скоростей газов.

Приборы-мультипликаторы. В том случае, когда измеряемая разность давлений очень мала, приходится применять особые устройства, дающие увеличенный отсчет, благодаря чему удается снимать со шкалы прибора показания с достаточной степенью точности.

На рис. 9 показана наклонная U-образная трубка, а рис. 10 изображает устройство тягомера, которым обычно пользуются в котельных. Оба они дают отсчет, по величине значительно превосходящий разность вертикальных отметок уровней измерительной жидкости, их заполняющей

Отсчет легко сделать в 10 раз большим, чем соответствующая ему разность уровней. На рис. 11 изображен манометр-мультипликатор. Его нижняя часть наполнена жидкостью, плотность которой лишь немного превосходит плотность жидкости, находящейся в верхней части, при чем жидкости применяются несмешивающиеся.

Диаметр резервуаров А значительно больше диаметра U-образной трубки В. Отношение между полученными отсчетами и истинной разностью давлений лучше всего определить калиброванием, хотя можно, конечно, вычислить его, исходя из диаметров А и В и удельных весов обеих применяемых жидкостей.

Мениск в месте соприкосновения жидкостей должен быть плоским, и ни одна из взятых жидкостей не должна смачивать стенок трубки В. Неосмотрительно было бы считать, что выбранная пара жидкостей действительно абсолютно нерастворима одна в другой. Прежде чем наливать их в манометр, необходимо обе жидкости тщательно перемешать взбалтыванием и точно определить плотности полученных насыщенных растворов.

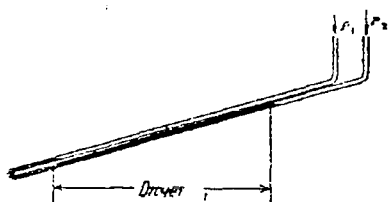


Рис. 9. Наклонная U-образная трубка.



Рис. 10. Тягомер.

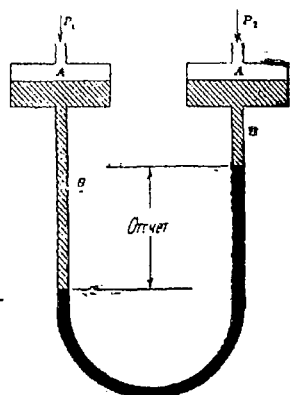


Рис. 11. Манометр-мультипликатор.

Так же нельзя пренебрегать влиянием температуры на плотность жидкостей: хотя температурный эффект вообще и невелик, но в данном случае он может оказать влияние, так как разность плотностей очень мала.

Если размеры А значительно больше трубки В, то отсчет получается в $\frac{1}{y-s}$ раз больше истинной величины (в см водяного столба), где у и s суть удельные веса соответственно более тяжелой и более легкой жидкостей. Приняв, что примененные насыщенные растворы имеют плотности 0,8315 и 0,7905, получаем, что наблюдаемое показание будет в $\frac{1}{0,0410}$ или 24,4 раза больше истинной разности давлений, измеренной в см водяного столба. Если прибор показывает 100 мм, то действительная разность давлений будет 4,1 мм водяного столба.¹

Пьезометрическое кольцо. Как было отмечено, статическое давление измеряется манометром, который присоединяется к небольшому отверстию в трубопроводе, при чем плоскость отверстия должна быть параллельна направлению потока жидкости в трубе.

Так, для измерения статического давления в паропроводе или водяной магистрали применяется манометр Бурдона, присоединенный к отверстию малого диаметра, сделанному в трубе. В некоторых случаях бывает необходимо определить с большой точностью незначительные колебания статического давления. Для этого делают в трубе не одно, а несколько отверстий, расположенных по окружности. Все отверстия соединяются между собой кольцеобразной трубкой, к которой присоединяется манометр. Такое устройство носит название пьезометрического кольца (см. рис. 12) и выполняется следующим образом. В трубопроводе просверливаются четыре (или больше) очень малых отверстия а, отстоящих одно от дру-

¹ Подробнее теорию прибора см. в курсах гидравлики, напр., у Есьмана. Прим. ред.

ного на равных расстояниях и лежащих в плоскости сечения, давление в котором требуется определить. Эти отверстия с наружной стороны несколько расширены, и к ним присоединены короткие трубки подходящего диаметра, напр., 4—6 мм. Через эти соединительные трубки давление передается в общую кольцевую трубку, где и измеряется манометром. Отверстия *a* делаются очень малыми (0,4—0,5 мм) по двум соображениям: во-первых, центры небольших отверстий легче расположить в одной плоскости, строго перпендикулярной к стенкам трубопровода; во-вторых, если окажется, что статическое давление в одном отверстии больше, нежели в другом (как это часто бывает), то малый диаметр отверстий затруднит циркуляцию жидкости по кольцу, и давления в отдельных отверстиях будут сбалансированы. Отсюда ясно видно, что пьезометрическое кольцо является устройством, дающим автоматически среднюю величину давления и уменьшающим ошибку, которая произошла бы при выводе среднего из отдельных давлений в каждом отверстии.

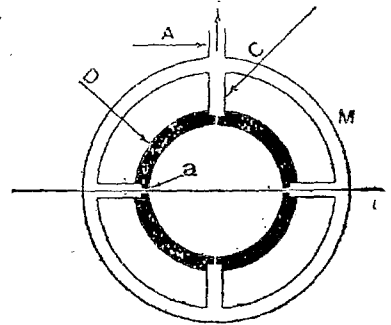


Рис. 12. Пьезометрическое кольцо. D—трубопровод. C—соединительн. патруб. A—сред. стат. давление. M—кольцевая трубка.

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ГАЗОВ, ПАРОВ И ЖИДКОСТЕЙ. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ПАДЕНИЕМ ДАВЛЕНИЯ И СКОРОСТЬЮ ПОТОКА

Как уже говорилось, наиболее важным вопросом гидродинамики является нахождение количественных отношений между скоростью потока и падением в нем давления. Это необходимо: 1) для подсчета затраты энергии на поддержание данного движения; 2) для возможности определения, по этим зависимостям, скорости течения путем измерения падения давления. Для последней цели надо применять приборы, для которых математическая зависимость между скоростью потока и падением давления постоянна во всех случаях. Сейчас будут разобраны наиболее важные и вместе с тем несложные приборы. Изложение в дальнейшем пойдет в следующем порядке.

I. Диафрагма для измерения расхода

II. Прибор Вентури

III. Трубка Пито

IV. Прочие приборы

1. Газометры и приемники

2. Методы физические и химические

3. Газо- и водомеры механические

4. Анемометры

5. Калиброванные измерители

Далее будут рассмотрены:

V. Трение в трубах

А. Круглого сечения

Б. Сечения некруглой формы

VI. Потери от сжатия и расширения.

Для каждого случая будут даны уравнения, выражающие зависимости между падением давления и скоростью потока; применение их иллюстрируется на примерах разнообразных жидкостей и газов. Общая сводка этих уравнений помещена в конце главы вместе с перечнем принятых обозначений (стр. 65—79).

Выводы формул приведены на стр. 73—84, нумерация уравнений принята при выводе уравнений, выдержана всюду. Буква *u* обозначает везде

(если нет оговорок) среднюю скорость жидкости (или газа) в метрах в секунду, т. е. представляет собой число кубических метров жидкости, протекающей в секунду, деленное на площадь сечения потока, выраженную в кв. метрах, независимо от того, заполняет ли жидкость трубопровод полностью или нет.

Пределы применимости формул. Формулы, сопровождающие описания измерительных приборов, в случае жидкостей безусловно справедливы для любого значения величины падения давления; для газов и паров они являются приближенными и дают достаточно точные результаты лишь тогда, когда величина падения давления не превосходит 10% от абсолютного давления газа или пара за измерительным прибором.¹ В общей сводке формул даны особые уравнения для случая большего падения давления.

I. Диафрагма для измерения расхода

Один из употребительных методов определения скорости потока газов, паров и жидкостей заключается в измерении внезапного падения давления в трубе, вызванного пропусканием всего потока чрез диафрагму с отверстием определенной величины (см. рис. 13). При этом часть статического напора в трубе перед диафрагмой превращается в скоростной напор непосредственно за диафрагмой. Так как наблюдаемое падение статического давления вызывается увеличением скорости течения жидкости, то можно написать:

$$\sqrt{u_2^2 - u_1^2} = c \sqrt{2g(\Delta h)}, \dots \dots \dots (19)$$

где u_1 — есть средняя скорость до диафрагмы, u_2 — средняя скорость при прохождении жидкости через диафрагму (обе выражены в м в сек.), c — коэффициент истечения, g — ускорение силы тяжести (9,81 м/сек.²) и Δh — измеренное падение статического давления, выраженное в метрах столба измеряемой жидкости той плотности, которую она имеет за диафрагмой.

В частном примере, изображенном на рис. 13, предполагается, что диаметр трубопровода в пять раз превышает диаметр диафрагмы. Найдено, что в этом случае наибольшее сжатие струи будет за диафрагмой на расстоянии 0,4 внутреннего диаметра трубопровода, а начало сжатия еще не наблюдается до диафрагмы на расстоянии 0,8 этого диаметра от нее.

Отсюда следует, что присоединение манометра должно быть сделано именно с учетом этих расстояний от плоскости диафрагмы.² Это очень важно, так как приводимая ниже величина коэффициента истечения была вы-

Рис. 13. Диафрагма и дифференциальный манометр.

ΔP — скоростной напор,
 SP — статич. напор,
 D — диаметр трубопровода.

ведена в этих предположениях. Если бы 1) не было трения при прохождении жидкости через суженное сечение диафрагмы и 2) отверстие не вызывало бы дальнейшего сжатия потока, то коэффициент истечения c был бы равен единице. В действительности скорость прохождения жидкости через

¹ Большое падение давления в газах и парах допускается редко, так как это было бы неэкономно. Исключением является лишь случай передачи сжатых газов от компрессора по трубам.

² См. *Davis and Jordan*, Bull. 109, Univ. of Ill. Eng. Expt. Sta. (1918).

диафрагму меньше теоретической, вычисленной в предположении отсутствия трения и сжатия потока, поэтому и коэффициент с меньше единицы.

Этот коэффициент для диафрагмы с острыми („рваными“) краями (рис. 14А и 14В) практически постоянен и равен 0,61, при условии, что толщина диафрагмы незначительна по сравнению с диаметром ее отверстия. В случае закругленных диафрагм (рис. 14С), расположенных concentрично с трубопроводом и снабженных подходящими камерами (см. ниже), коэффициент равен 0,98. При употреблении специальной короткой трубки вместо диафрагмы (рис. 14D) коэффициент с имеет различную величину в разных случаях; применение ее не рекомендуется.

Диафрагмы с острыми краями по фиг. 14А лучше всего изготовлять, высверливая отверстие в металлическом диске, толщиной от 1,5 мм до 5 мм. Если диафрагму приходится делать из более толстого листа (при большем давлении), то стенки отверстия надо выполнять косыми так, чтобы отверстие расширялось по направлению струи (рис. 14В). Но приготовить такое круглое отверстие с достаточной точностью довольно трудно.¹ Как видно из эскиза этого типа, выполнение его сопряжено с известными затруднениями. Поскольку тип диафрагмы с острыми краями наиболее прост и дешев, он чаще всего и употребляется.²

При установке диафрагмы необходимо устраивать в трубопроводе цилиндрические камеры (короткие трубы) непосредственно перед диафрагмой и за ней; диаметр труб должен быть в пять раз больше диаметра отверстия в диафрагме.³ Последнее рекомендуется по трем соображениям. Во-первых, вихревые потоки около диафрагмы при этом ослабевают, что дает возможность более точно определить статическое давление. Во-вторых, при наличии камер таких размеров, коэффициент истечения с почти постоянен и равен 0,61, чего не было бы в случае камер меньшей величины. Наконец, в-третьих, формулы значительно упрощаются, если квадрат скорости потока перед диафрагмой u_1^2 исчезает мал по сравнению с квадратом скорости в самом отверстии диафрагмы u_2^2 . При наличии подходящих камер это можно использовать для упрощения, и тогда вышеуказанная формула принимает вид:

$$u_2 = c \sqrt{2g(\Delta h)} \dots \dots \dots (18)$$

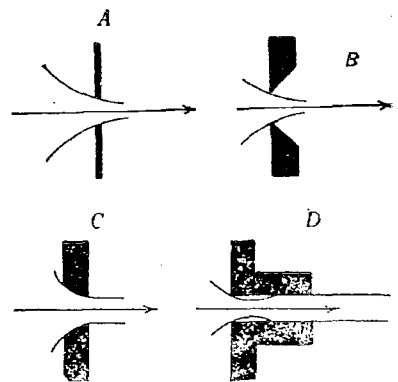


Рис. 14. Диафрагмы и короткая измерительная трубка. А. Диафрагма с острыми краями (тонкая). В. То же (более толстая). С. Диафрагма с закругленными краями (толстая). D. Короткая измерительная трубка.

Если предъявляется требование, чтобы установка диафрагмы не создавала больших потерь на трение, то приходится довольствоваться малым Δh ; поэтому, чтобы не понизить точности измерений, необходимо применить пьезометрическое кольцо (см. стр. 38—39). Измерительная диафрагма может быть установлена в любом месте линии, и при соблюдении указанных предосторожностей показания будут совпадать с действительностью

¹ Лучше применять все же диафрагму типа А и подпирать ее сзади скрепами.

² Большим преимуществом этого типа является то, что коэффициент с не зависит от вязкости жидкости, не изменяясь даже для случая вязкости, в 100 раз превышающей вязкость воды.

³ Необходимость этого станет понятной, если ознакомиться со сложными зависимостями, появляющимися при применении камер неподходящих размеров. См. Judd „Experiments on Water Flow through Pipe Orifices“, Trans. A.S.M.E. 38, 331 (1916) и Davis and Jordan (см. ниже).

(погрешность 2—3%). Если требуется большая точность, то все измерительное устройство надо проградуировать.

Хотя стоимость этого измерительного прибора и низка, но он имеет тот недостаток, что вызывает, вследствие внезапного изменения скорости, потерю напора, по величине близкую к разности давлений, измеряемой манометром.

Поэтому необходимо снижать эту разность, насколько позволяет требуемая точность отсчета. Потеря напора в приборе может оказаться настолько значительной, что будет выгоднее применить другое измерительное устройство (прибор Вентури), более дорогое в смысле первоначальных затрат, но вызывающее потери в десять раз меньшие предыдущих.

Рис. 15¹ показывает, как отношение потери напора к отсчитываемой разности статических давлений меняется в зависимости от величины

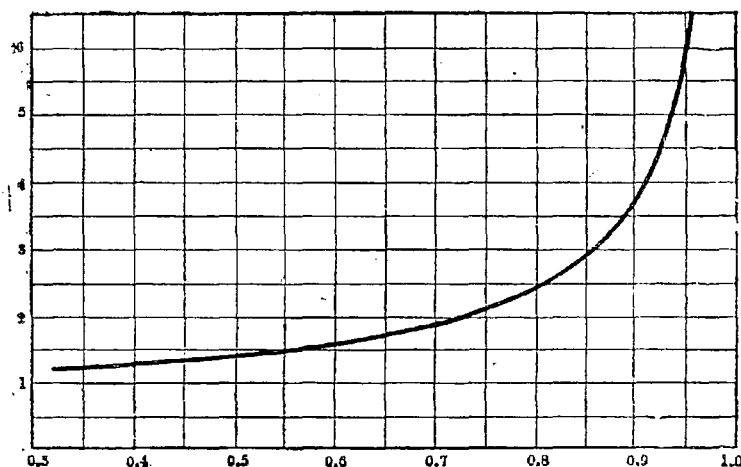


Рис. 15. Диаграмма, указывающая изменение потери напора в диафрагме с острыми краями в зависимости от отношения диаметров камер к диаметру диафрагмы. *Абс.* — Отношение потери давления к общему его перепаду в диафрагме. *Орд.* — Отношение диаметра камеры к диаметру диафрагмы.

фрагмы, имеющей отверстие в 101,6 мм, сделанное в гальванизированном железном листе, толщиной 1,6 мм; отверстие concentрично с осью трубопровода. В расстояниях 406 мм до диафрагмы и 203 мм за диафрагмой установлены пьезометрические кольца; они соединены с вертикальной U-образной трубкой (рис. 13), частично заполненной водой, которая показывает в данный момент разность уровней в 30,8 мм. Вторая U-образная трубка, тоже частично наполненная водой, одним коленом присоединена к нижнему (за диафрагмой) пьезометрическому кольцу, второе колено открыто в атмосферу; трубка показывает давление 101,6 мм водяного столба (сверх атмосферного). Требуется подсчитать количество сухого водорода (в кг), протекающего по трубопроводу в час, и стоимость энергии, расходуемой на продвижение газа через диафрагму в течение суток. Рассмотреть следует два случая: предполагая, а) что газ сухой и б) что он увлажнен водяными парами. Атмосферное давление равно 742 мм ртутного столба, а давление паров воды при 21° Ц соответствует 18,8 мм ртутного столба. Общий коэффициент полезного действия вентилятора и мотора составляет 50%; электрическая энергия стоит 6 коп. за 1 киловатт-час.

а) Решение (сухой газ). Так как диаметр камеры в 5 раз больше диаметра отверстия диафрагмы, то можно применить схему рис. 13, считая коэффициент с равным 0,61, поскольку отверстие диафрагмы имеет острые края, т. е.

$$u_2 = 0,61 \sqrt{2g(\Delta h)} \dots \dots \dots (18)$$

¹ Davis and Jordan, Univ. of Ill. Eng. Expt. Sta. Bull. 109 (1918).

² Это изменение является следствием некоторого возрастания давления за местом наибольшего сжатия (рис. 13, стр. 40).

камер, выраженной отношением диаметра камеры к диаметру отверстия диафрагмы с острыми краями.² В случае камер с диаметром в пять раз большим диаметра отверстия в диафрагме, потеря напора составит 93% от разности давлений, показываемой манометром.

Пример 1. (Газ). — По трубопроводу, состоящему из железных гальванизированных труб Ø 203 мм, движется водород при температуре 21°. В определенном месте трубопровод постепенно расширяется до diam. в 508 мм, образуя камеры для измерительной диа-

Давление газа за диафрагмой равно $742 + \frac{101,6}{13,6} = 749,4$ мм ртутного столба, поэтому соответствующая плотность газа будет:

$$\frac{\text{при Н. У.}}{2,02} \bigg| \frac{\text{при } 21^\circ \text{ Ц}}{273} \bigg| \frac{749,4}{760} = 0,0826 \text{ кг/м}^3 \text{ при } 749,4 \text{ мм и } 21^\circ \text{ Ц}$$

$$\Delta h = \frac{30,8 \cdot 1000}{0,0826} = 373 \text{ м столба газа.}$$

Средняя скорость прохождения через отверстие 101,6 мм в диафрагме

$$u_2 = 0,61 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 373} = 52,1 \text{ м/сек.}$$

Отсюда:

$$\begin{array}{c} \text{м в сек.} \\ 52,1 \end{array} \bigg| \begin{array}{c} \text{м}^3 \text{ в сек.} \\ (0,1016)^2 \end{array} \bigg| \begin{array}{c} \text{кг на м}^3 \\ 0,785 \end{array} \bigg| \begin{array}{c} \text{кг/сек.} \\ 0,0826 \end{array} \bigg| \begin{array}{c} \text{кг на м}^3 \\ 3600 \end{array} = 124 \text{ кг в час сухого водорода} \left(\text{здесь } 0,785 = \frac{\pi}{4} \right)$$

В диафрагме теряется часть давления газа, которая, согласно рис. 15, составляет 93% от разностного напора (373 м газового столба).

В таком случае расход энергии:

$$\frac{\text{кг/сек.}}{124} \bigg| \frac{\text{кг-м/сек.}}{0,93} \bigg| \frac{373}{75} = 0,159 \text{ теор. л.с.}$$

$$\begin{array}{c} \text{действ.} \\ \text{л.с.} \end{array} \bigg| \begin{array}{c} \text{кВт} \\ 0,735 \end{array} \bigg| \begin{array}{c} \text{коп. в час} \\ 6 \end{array} \bigg| \frac{24}{0,5} = 34,2 \text{ коп. (стоимость потерянной энергии за 24 часа).}$$

б) Решение (влажный газ).

$$\text{Средний молекулярный вес} = \frac{2,02(749 - 18,8)}{749} + \frac{18 \cdot 18,8}{749} = 1,97 + 0,45 = 2,42.$$

Подсчет для случая б) может быть произведен подобно а), при чем различие выразится лишь в большей плотности газа в случае б). Вместо этого, решим случай б), воспользовавшись данными, полученными в а), применив метод пропорций.

Из решения а) очевидно, что количество кг газа, протекающего в час, пропорционально произведению его плотности на корень квадратный из величины, обратной плотности, т. е. корню квадратному из плотности. Поэтому количество влажного газа в час будет равно:

$$W = 124 \sqrt{\frac{2,42}{2,02}} = 136,5 \text{ кг.}$$

Так как каждые 2,42 кг влажного газа содержат 1,97 кг чистого водорода, то последнего будет проходить

$$\frac{136,5 \cdot 1,97}{2,42} = 111 \text{ кг/час,}$$

т. е. примерно на 11% меньше, чем в случае а).

Суточная стоимость энергии для случая а) была 34,2 коп., а в случае б) она будет больше в отношении $\sqrt{2,42/2,02}$, вследствие большего веса влажного газа, и в отношении $2,02/2,42$ из-за меньшего напора; в общем это составит:

$$34,2 \sqrt{2,02/2,42} = 31,2 \text{ коп.}$$

т. е. на 90% меньше, чем в случае а). Однако расход на данное количество пропущенного сухого водорода на 1000 кг для влажного газа будет на 1,81% больше.

Примечание. Приведенные вычисления произведены с точностью не более 2%.

Пример 2. (Вода). Вода течет по чугунной 152,4 мм трубе со средней скоростью 1,52 м/сек., под давлением 3,52 атм. техн.

Требуется поставить измерительную диафрагму с таким отверстием, чтобы разность давлений в ней не превышала 0,352 атм. техн. (кг/м²). Каков должен быть для этого диаметр отверстия в диафрагме (с острыми краями), и чему равна теряемая мощность?

Решение. Коэффициент истечения c может быть принят равным 0,61 лишь в том случае, когда при диафрагме имеются камеры соответствующих размеров. Предположим, что эти камеры устроены; тогда можно применять формулу (18).

Так как вода практически не сжимается, то нет необходимости находить ее статическое давление; поэтому $\Delta h = 3520/1000 = 3,52$ м водяного столба. Обозначая диаметр отверстия диафрагмы через d , имеем

$$u_2 = u_1 \cdot \frac{(0,152)^2}{d^2} = \frac{0,035}{d^2}$$

по формуле (18)

$$u_2 = 0,61 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 3,52} = \frac{0,035}{d^2}$$

Откуда $d = 83,5$ мм.

Считая, что теряется напор в размере 93% от заданных 0,352 атм. техн. (кг/м²), получаем теряемую мощность:

м в сек.	м³ в сек.	кг-м/сек.
1,52	(0,152)²	0,785
3520	75	0,93
1	= 1,2 теор. Л.С.	

Пример 3. (Масло). Измерительная диафрагма с острыми краями, с диаметром отверстия 76,2 мм, помещена в стальной трубопровод, с внутренним диаметром 154 мм, через который протекает минеральное масло удельного веса 900 кг/м³; при диафрагме имеются камеры, с диаметром 407 мм. Вертикальная U-образная трубка, заполненная ртутью и маслом, показывает разность уровней ртути 101,6 мм. Подсчитать протекающее количество масла в м³/час и мощность, теряемую в диафрагме. При диафрагме имеется камера в 40 см.

Решение. По формуле (18)

$$u_2 = c \sqrt{2g(\Delta h)}$$

$$u_2 = 0,61 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 0,1016 (13600 - 900)}{900}} = 3,24 \text{ м/сек.}$$

Отсюда протекающее количество масла составляет

$$W = \frac{3,24 \cdot 0,0762^2 \cdot 3,14 \cdot 3600}{4} = 53 \text{ м³/час.}$$

По рис. 15 теряется 94% разностного напора. Поэтому теоретическое потребление энергии в диафрагме составляет:

$$\frac{900 \cdot 0,94 \cdot 3,24 \cdot 0,785 \cdot 0,0762^2 \cdot 0,1016 (13600 - 900)}{75 \cdot 900} = 0,238 \text{ теорет. Л.С.}$$

II. Прибор Вентури

Принцип действия прибора Вентури тот же, что и измерительной диафрагмы, так как оба они измеряют падение статического давления, являющееся результатом увеличения скорости жидкости при прохождении ее через суженное сечение. Основное различие между ними заключается в том, что изменение сечения канала происходит в диафрагме (рис. 13) внезапно, а в приборе Вентури (рис. 16) постепенно.

Зависимость между скоростью и давлением для прибора Вентури имеет следующий вид:

$$\sqrt{u_2^2 - u_1^2} = c \sqrt{2g(\Delta h)}, \quad \dots \dots \dots (28)$$

где u_1 и u_2 суть средние скорости жидкости (или газа) в сечениях до сужения и в самом горле, выраженные в м/сек., g —ускорение силы тяжести, Δh —измеренное падение статического напора, выраженное в метрах столба самой протекающей жидкости, при чем за плотность жидкости принимается та, которую она имеет при проходе через сужение, c —коэффициент истечения (см. выше о диафрагме).

Так как в приборе Вентури сечение уменьшается постепенно и отдельные струйки жидкости сходятся под значительно меньшим углом, чем в диафрагме с острыми краями, то коэффициент истечения c в первом случае больше, чем во втором.

В случае диафрагмы сечение потока внезапно увеличивается при переходе жидкости из отверстия диафрагмы в расположенную за ней камеру, в результате чего большая часть скоростного напора (создавшегося в отверстии диафрагмы, за счет падения статического давления перед диафрагмой) не превращается обратно в статический напор за диафраг-

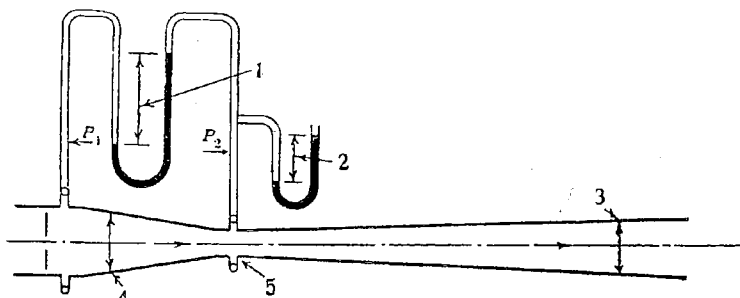


Рис. 16. Измеритель Вентури. Условн. обозначения: 1—разность давлений, 2—стат. давление после сужения сечения, 3—угол расширения, равный 7° , 4—угол расширения 25° , 5—пьезометрическое кольцо у пережима.

мой, а теряется вследствие ударов и внутреннего трения. Прибор Вентури по сравнению с диафрагмой обладает большим преимуществом, которое выражается в том, что потеря давления в нем очень невелика, так как скоростной напор (получившийся в суженном сечении за счет падения первоначального статического давления) почти целиком превращается обратно в статическое давление, благодаря постепенному расширению канала до первоначальной величины.

Устройство прибора Вентури показано на рис. 16. Диаметр сужения делается обычно равным от $1/2$ до $1/4$ первоначального диаметра трубопровода, при чем длина суженной части не должна превышать ее диаметра. Углы сходящейся и расходящейся насадок не должны быть больше 25° для первой и 7° для второй. Во избежание лишних потерь на трение и для обеспечения более или менее постоянного и высокого коэффициента истечения с трубкой в сужении должна быть изнутри облицована бронзой, точно выдержана по диаметру и хорошо обработана.

При этих условиях потеря напора составит всего от $1/10$ до $1/8$ величины, показываемой манометром, а коэффициент истечения будет равен $0,97-0,99$. Для очень точных измерений прибор необходимо градуировать.

При установке пьезометрических колец надо следить за тем, чтобы соединительные трубки не выдавались внутрь канала прибора Вентури; в противном случае возможны крупные ошибки. Поскольку приходится делать углы расхождения насадок малыми, чтобы получить значения

коэффициента истечения, близкие к единице, постольку длина самого прибора получается значительной по сравнению с диаметром трубопровода, в котором он поставлен. Были произведены опыты над измерением газового потока с компактным прибором Вентури, сделанным из гальванизированного листового железа, углы расхождения у которого были 60° до сужения и 15° за ним. Опыты показали, что коэффициент истечения получается при этом в пределах 0,85—0,88; скорость газа измерялась диафрагмой с острыми краями, помещенной в трубопроводе непосредственно за прибором Вентури.

Прибор Вентури с успехом применяется в газовой и других отраслях промышленности. Он не подходит для вязких жидкостей.

Пример 4. (Светильный газ). Надлежаще сделанный прибор Вентури с диаметром сужения в 0,61 м включен в газовую магистраль ($\Phi = 1,22$ м), температура газа в которой равна 21°C .

Плотность газа по отношению к воздуху при одинаковой температуре и давлении равна 0,6, атмосферное давление соответствует 744 мм ртутн. столба.

Дифференциальный манометр, состоящий из наклонной (10:1) U-образной трубки, заполненной бензином (уд. веса 0,685), показывает 2,3 мм, при чем статическое давление в горле (избыточное над атмосферным) равно 50,8 мм водян. столба. Требуется подсчитать а) количество проходящего газа в м³/час. и б) мощность в Л. С., теряемую при прохождении его через прибор Вентури.

Решение. а) Абсолютное давление газа в сужении равно 50,8 мм водяного столба плюс атмосферное давление, т. е.

$$744 + \frac{50,8}{13,6} = 748 \text{ мм.}$$

Плотность газа в сужении¹

$$\frac{29 \cdot 0,6 \cdot 273 \cdot 748}{22,4 \cdot 294 \cdot 760} = 0,71 \text{ кг/м}^3.$$

Разностный напор Δh , выраженный в м газового столба, равняется:

$$\frac{0,0023 \cdot 1000 \cdot 0,685}{0,71} = 2,22 \text{ м светильного газа.}$$

По уравнению (28)

$$\sqrt{u_2^2 - u_1^2} = 0,98 \sqrt{2g(\Delta h)}.$$

Пренебрегая изменением давления, можно считать, что $u_1 = \frac{u_2}{4}$, поэтому:

$$u_2^2 - \frac{u_2^2}{16} = (0,98)^2 \cdot 19,62 \cdot 2,22,$$

откуда $u_2 = 6,65$ м/сек. через сужение с диаметром 0,161 м.

Поэтому расход газа:

$$W = 3600 \cdot u \cdot S = 3600 \cdot 6,65 \cdot 0,785 \cdot 0,61^2 = 6960 \text{ м}^3/\text{час.}$$

б). Весовое количество протекающего газа.

$$0,71 \cdot 6,65 \cdot 0,785 \cdot 0,61^2 = 1,37 \text{ кг/сек.}$$

Поэтому затрачиваемая мощность равна (в предположении потери напора в размере $\frac{1}{8}$ от показания манометра):

$$\frac{2,22 \cdot 1,37}{8 \cdot 75} = 0,0051 \text{ теорет. Л.С.}$$

III. Трубка Пито

Давление в трубке, отверстие которой (рис. 18, отверстие 1) расположено в перпендикулярной струе газа, равно сумме скоростного и статического давлений, в то время как давление в отверстии 2, лежащем в плоскости, параллельной направлению потока, равно только одному статическому давлению газа. Разность этих двух давлений дает величину скоростного напора у отверстия 1.

¹ Средний молекулярный вес воздуха = 29,0 (см. стр. 9).

Часто применяемый для измерения этой разности давлений прибор носит название „трубки Пито“.

Из самого определения понятия „скоростной напор“ следует, что величина действительной скорости газа (u_{act}) в м/сек. в месте расположения трубки будет равна:

$$u_{act} = \sqrt{2g(Ah)}, \quad \dots \dots \dots (35)$$

где Ah есть разностный отсчет, выраженный в метрах столба протекающего газа (или жидкости), возникающий в результате наличия скоростного напора. Примеры применения формулы даны ниже.

Один из способов выполнения прибора представлен на рис. 17. Внутри трубопровода помещены две концентрические трубки, согнутые под прямым углом, при чем отверстие (2) расположено на конце внутренней трубки, а одно или несколько отверстий (1) сделаны в наружной трубке. Удобным является то, что отверстия находятся недалеко одно от другого: этим облегчается исследование потока в разных пунктах.

Недостаток этого устройства заключается в том, что трубка, помещенная в измеряемом потоке жидкости или газа, отклоняет отдельные струйки, а это отзывается на правильности измерения статического давления.

На рис. 18 показано приспособление, устраняющее этот недочет устройством четырех „статических“ отверстий (а); предполагается, что несколько повышенное давление в одном из них будет компенсироваться соответственным понижением в остальных и в сумме давать величину, близкую, к действительному статическому давлению.

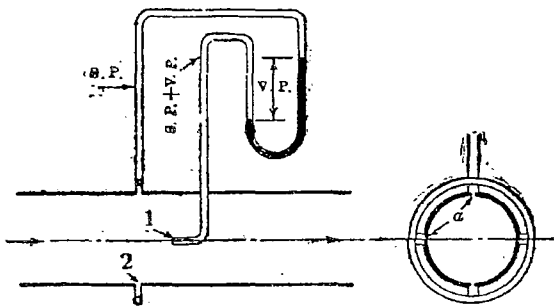


Рис. 18. Трубка Пито. Условн. обозн.: 1 — общее давление (стат. + дин.), 2 — стат. давление.

заслонках и в местах выхода и входа в каждый прямолинейный участок трубопровода.

Опыты показали, что влияние этих мест искривления и сужения потока значительно ослабляется лишь в расстоянии, равном не менее 50 диаметров трубы. Это расстояние при установке измерительных приборов необходимо соблюдать, при чем рекомендуется по возможности его еще увеличивать.

Трубки Пито употребляются для проверки действия готовых установок и машин, так как эти трубки можно вставить через небольшое от-

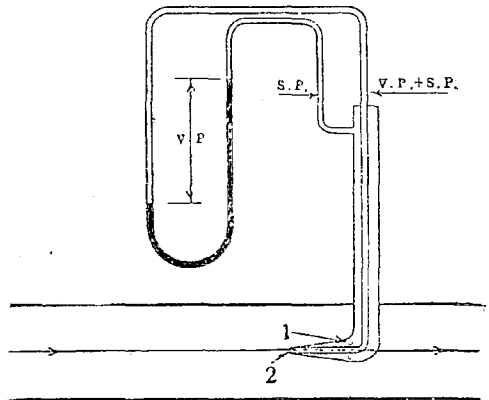


Рис. 17. Открытая трубка и пьезометрич. кольцо. Условн. обозн.: 2 — общее давление (стат. + дин.) 1 — стат. давление (V. P. — скоростной напор и S. P. статический напор).

В некоторых типах трубок Пито полной компенсации все же не получается, и поэтому к ним даются поправочные коэффициенты. Градуировка таких приборов весьма желательна.

Скорость течения всегда оказывается различной в разных точках потока, даже лежащих в одной плоскости, перпендикулярной к направлению потока. Это различие особенно сказывается в коленах, тройниках,

верстие, которое потом легко заделать. В некоторых случаях, когда, например, по середине короткого воздушного канала установлен вентилятор, скорость создаваемого им потока воздуха может быть различной в разных местах, и потребуется измерение ее в нескольких точках одного поперечного сечения.

Здесь трубка Пито оказывается весьма ценной, поскольку других способов измерения применять нельзя.

Как указывалось выше, статическое давление можно измерить наиболее удобно и точно с помощью пьезометрического кольца (стр. 38), которое автоматически дает среднюю величину этого давления. Поэтому большую точность измерения скорости может дать комбинация открытой изогнутой трубки и пьезометрического кольца, которыми можно заменить трубку, изображенную на рис. 17. Это видоизменение прибора состоит из пьезометрического кольца, охватывающего трубопровод, и небольшой открытой трубки с отверстием, расположенным навстречу потоку газа на расстоянии 25 мм от плоскости кольца по направлению потока. Рис. 18 показывает это устройство. Диаметр трубки со „скоростным“ отверстием должен быть достаточно мал по сравнению с диаметром трубопровода, чтобы не вызвать заметного увеличения скорости газа (или жидкости) в этом месте.

К недостаткам обыкновенных трубок Пито следует отнести то обстоятельство, что они дают при измерении небольших скоростей газа, вследствие его незначительной плотности, очень малые отсчеты, вызывающие ошибки. Так, например, в случае воздуха, движущегося по трубе при атмосферном давлении и температуре в 21° Ц со скоростью 3 м/сек., разностный отсчет получается равным 0,57 мм вод. столба; при скорости 10 м в сек. он увеличивается до 5,08 мм вод. столба.

Такие низкие показания¹ лучше всего отсчитывать с помощью наклонной трубки или манометра-мультипликатора.

Вода, двигаясь с теми же скоростями, увеличивает отсчеты, благодаря своей большей плотности, в $1000/1,203 = 832$ раза. Очевидно, что присутствие в трубопроводе трубки Пито не вызывает заметных потерь давления.

Было найдено, что, при условии отсутствия влияния колен и т. п. сужений и искривлений трубопровода, отношение средней скорости к максимальной, (в середине трубы) зависит от группы величин модуля $\frac{du_{\max} \rho}{\mu}$, как это показывает рис. 19. О величине абсолютной вязкости (μ) жидкостей см. стр. 56—60, а о модуле см. стр. 61.

Отношение средней скорости к максимальной составляет всего 0,50 в случае ламинарного движения (см. стр. 53), которое имеет место, когда модуль меньше 2,5 или около этого. При больших значениях модуля течение жидкости в трубе делается неспокойным, вихревым (см. стр. 54), и так как степень перемешивания потока увеличивается вместе с возрастанием модуля, то и отношение $u_{\text{ср}}/u_{\text{max}}$ делается больше. Прежде в технике считали это отношение всегда равным 0,8, что являлось достаточным приближением, так как кривая в области вихревого движения очень полого, и в большинстве случаев действительно имело место вихревое движение.

Движение газов на практике редко бывает ламинарным и обычно лишь при самых незначительных скоростях, которые вызывают настолько малые показания дифференциального манометра, присоединенного к трубке Пито, что часто не представляется возможным сделать сколько-нибудь точный

¹ В случае больших скоростей и давлений, например, в трубопроводах с перегретым паром, эти затруднения не имеют места. В хороших примерах этого типа в качестве жидкости применяется ртуть; они строятся и саморегистрирующими.

отсчет. Однако в случае вязких, маслянистых жидкостей движение параллельными струями наблюдается довольно часто и при высоких скоростях, особенно в небольших трубах.

Применение диаграммы (рис. 19) всегда желательно для определения вероятного значения $u/u_{\max}$, как это сделано в приводимых ниже примерах. Для большей точности следует это отношение определять экспериментально; в этом может встретиться необходимость вблизи критического интервала, где отношение скоростей резко меняется при небольших колебаниях модулу.

Одним из интересных видоизменений прибора Пито является так называемая трубка Пито-Вентури;¹ которая позволяет отсчитывать величину напора при малых скоростях.

Пример 5. (Газ). Обыкновенная трубка Пито, подобная изображенной на рис. 17, вставлена в середину трубопровода, состоящего из горизонтальных железных гальванизированных труб, с внутренним диаметром в 320 мм. По трубам проходит сухой воздух с температурой 21°C и под статическим давлением 50,8 мм вод. столба (сверх атмосферы). Горизонтальный отсчет U-образной наклонной (10:1) трубки дает 50,8 мм столба. Ближайшие места сужения и искривления потока находятся от трубки Пито в расстоянии свыше 50 диаметров трубопровода. Требуется найти: а) действительную скорость воздуха в м/сек. в месте расположения трубки; б) среднюю скорость в м/сек. в этом поперечном сечении; в) расход воздуха в м³/мин., и г) то же в кг/час. Атмосферное давление равно 755 мм рт. столба.

Решение. Плотность газа вблизи трубки Пито:

$$\frac{29,273 \cdot (755 + \frac{50,8}{13,6})}{22,4 \cdot 294 \cdot 760} = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

Горизонтальный отсчет по наклонной U-образной трубке равен 50,8 мм, но вследствие наклона (10:1) трубки, действительная разность уровней будет только 5,08 мм вод. столба. Так как удельный вес жидкости, заполняющей манометр (вода), равен 1000 кг/м³, то высота столба воздуха, эквивалентная давлению 5,08 мм вод. столба, получится:

$$\frac{0,00508 \cdot 1000}{1,2} = 4,22 \text{ м воздушного столба.}$$

По формуле (35)

$$u_{\text{act}} = \sqrt{2g(\Delta h)} = \sqrt{19,62 \cdot 4,22} = 9,13 \text{ м/сек.}$$

в месте расположения отверстия измерительной трубки, т. е. на осевой линии трубопровода.

Кривые на рис. 25 показывают, что абсолютная вязкость воздуха при 21° приблизительно равна 0,000180 единиц в системе С. Г. S. Величина модулу в данном случае будет

$$\frac{0,302 \cdot 9,13 \cdot 1,203}{0,018} = 185$$

и по рис. 19: $u = 0,81 u_{\max}$, откуда $u = 0,79 \cdot 9,13 = 7,4 \text{ м/сек.}$ Так как площадь поперечного сечения трубы равна 0,0715 м², то расход воздуха оказывается равным

$$7,4 \cdot 60 \cdot 0,0715 = 31,7 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

или

$$30,9 \cdot 60 \cdot 1,203 = 2295 \text{ кг/час.}$$

¹ Fales, J. Am. Soc. Heating Ventilating Eng., 28, 1—10 (Jan., 1922).

Пример 6. (Вода). По чугунной магистрали с диаметром 152,4 мм протекает вода при 20° под давлением 35 200 кг/м², при чем разность уровней в вертикальной U-образной трубке, наполненной ртутью (уд. веса 13,6) и водой, составляет 25,4 мм. U-образная трубка присоединена к трубке Пито, отверстие которой лежит на осевой линии трубопровода. Ближайшие сужения и искривления в трубах расположены далее 8 м от трубки Пито.

Подсчитать расход воды в м³/сек.

Решение. Действительный удельный вес жидкостей в U-образной трубке составляет 13,6 — 1 = 12,6, так что 25,4 мм разностного отсчета соответствует скоростному напору в

$$0,0254 \cdot 0,0254 = 0,32 \text{ м вод. столба.}$$

По формуле (35):

$$u_{\max} = \sqrt{19,62 \cdot 0,32} = 2,51 \text{ м/сек.}$$

Так как абс. вязкость воды равна единице, то модулюс равен

$$\frac{0,152 \cdot 2,51 \cdot 1000}{1} = 382$$

$u = 0,817 u_{\max}$ (рис. 19), откуда u получается равным 2,05 м/сек.,

а расход

$$W = \frac{2,05 \cdot 3,14 \cdot 0,152^2}{4} = 0,0371 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

или

$$0,0371 \cdot 60 = 2,22 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Пример 7. (Масло). Трубка Пито вставлена в стальную трубу, по которой перекачивается минеральное масло при 38°.

Внутренний диаметр трубы равен 103 мм. Трубка Пито расположена отверстием на осевой линии в расстоянии 7,6 м от ближайших сужений и искривлений трубопровода и дает разность в 20,3 мм на вертикальной U-образной трубке, заполненной ртутью и маслом. Найти расход масла (в м³/час) в предположении, что вязкость масла при 38° (относительно воды при 20°) равна а) 50 и б) 300, уд. вес масла при 38° = 900 кг/м³.

Решение. Действительная скорость на осевой линии трубопровода согласно форм. (35) будет

$$u_{\max} = \sqrt{2g \Delta h} = \sqrt{\frac{19,62 \cdot 0,0203 \cdot (13,6 - 0,9)}{0,9}} = 2,37 \text{ м/сек.}$$

Прежде чем подсчитывать расход, необходимо найти величину $u/u_{\max}$, так как протекающий в час объем представляет собой произведение площади поперечного сечения на среднюю скорость в этом сечении.

Так как абсолютная вязкость воды равняется 0,01 пуаза или 1 сантипуаза (стр. 57), то модулюс равен

$$\frac{0,103 \cdot 2,37 \cdot 900}{50 \cdot 1,00} = 4,4$$

и по рис. 19 $u = 0,73 u_{\max}$ ¹

Отсюда расход масла будет:

$$2,37 \cdot 0,73 \cdot 3600 \cdot 0,785 (0,103)^2 = 51,8 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Для случая б) модулюс в шесть раз меньше, чем для случая а), поэтому, $u = 0,50 u_{\max}$ (см. рис. 19), откуда расход равен 35,4 м³ в час. Хотя трубка Пито дает одинаковые показания в обоих случаях, все же расход во втором случае составляет лишь 68,5% первого. Причина — большая вязкость масла.

IV. Прочие приборы

1. Для газов

1. Газометры и приемники. Газометр (газгольдер) представляет собой опрокинутый резервуар в форме цилиндра, обычно металлический, концентрично вставленный в другой подобный резервуар, содержащий какую-нибудь жидкость, например, воду. Когда газометр пуст, то внутрен-

¹ Как указывалось ранее, при значениях модуля, превосходящих 2,5, определение величины $u/u_{\max}$ с достаточной точностью по диаграмме становится затруднительным. Поэтому в таких случаях рекомендуется последовательно измерить скорости по всему сечению трубопровода.

ний резервуар (опрокинутый) целиком находится в жидкости, и по мере поступления газа, подводимого через трубу, проходящую через дно наружного резервуара, внутренний резервуар поднимается пропорционально объему поступающего газа. Газометры широко применяются в газовой промышленности.

Количество газа, находящегося в закрытом резервуаре, можно измерять, определяя давление газа или веса резервуара. Приемники постоянного объема применяются при высоких давлениях, например, для наблюдения за расходом воздуха, подаваемого компрессором. Взвешивание резервуара с газом менее удовлетворительно и дает неточные результаты, так как вес самого резервуара обычно на много превышает вес находящегося в нем газа, если только последний не находится под очень большим давлением.

2. Химические и физические методы измерения. Количество газа, протекающего через данное сечение, можно определить путем введения в газ постороннего вещества и последующего анализа получившейся смеси при обязательном условии хорошего перемешивания. Зная количество введенного вещества и концентрацию газа до и после этой прибавки, можно подсчитать количество газа, к которому вещество было примешано. Например, скорость выделения хлора из электролитической ванны можно определить, вводя в него с известной постоянной скоростью струю воздуха и анализируя состав хлора до и после смешения. Далее, количество воздуха, проходящего через увлажнитель или сушилку, можно найти, зная вес испаренной воды и влажность входящего и выходящего воздуха. Часто представляется удобным подводить или отнимать с определенной скоростью тепло в форме электрической энергии и измерять получаемую разность температур. Газометр Томаса, основанный на этом принципе, состоит из расширенной по середине трубки, по которой пропускается измеряемый газ. У входа в трубку расположен электрический пирометр сопротивления; внутри трубки помещена система проволок, через которые пропускается ток, равномерно нагревающий проходящий газ, и у выхода поставлен второй пирометр, подобный первому.

В приборе Томаса автоматически регулируется сила проходящего тока и поддерживающего постоянную небольшую разность температур обоих пирометров, и измеряется получающийся при этом расход энергии. Эта энергия пропорциональна количеству проходящего газа, поскольку теплоемкость газа можно считать постоянной в пределах имеющегося температурного интервала. Для получения достаточно надежных результатов действие прибора должно быть автоматическим. Так как в обычных условиях колебания температуры поступающего в прибор газа сильно превышают величину подогрева в нем, то метод измерения количества газа путем подвода постоянного количества энергии с наблюдением за степенью прогрева газа, является весьма несовершенным.

Приборы Томаса устраиваются обычно „интегрирующего“ типа, т. е. в них отдельные значения расхода газа суммируются через определенные промежутки времени, что в результате дает расход газа за некоторый период времени.

3. Механические газометры. Количество газа, протекающего через данное сечение, может быть также измерено при помощи механических приборов, установленных в трубопроводе. Они обычно бывают саморегистрирующего типа. Эти приборы тщательно градуируются путем сравнения их с газометрами. Они довольно дороги и сравнительно легко портятся, но часто применяются там, где приходится постоянно измерять большое количество газа, как, например, в газовой промышленности.

Ценное свойство их заключается в том, что они дают величину полного расхода газа за определенный период времени. Скорость газа определяется путем снятия показаний через определенные промежутки времени.

4. Анемометры. Анемометр устроен по типу ветряной мельницы, трение в которой сведено к минимуму, благодаря чему скорость ее вращения пропорциональна скорости газового потока, на пути которого она расположена.

Прибор состоит из лопастного колеса, насаженного на ось, которая приводит в движение счетный механизм. Такие приборы должны быть очень тщательно градуированы при скоростях по возможности близких к измеряемым. Несмотря на такую градуировку, они часто дают неточные результаты. Все же они очень употребительны в исследовательских работах, а при измерении скоростей ниже 1,5 м/сек. обладают точностью, уступающей лишь трубке Пито с очень чувствительным манометром-мультипликатором.

Анемометры редко предназначаются для скоростей свыше 12—15 м/сек. Ясно, что обычные типы анемометров нельзя применять в случае газов, химически действующих на металл, а также, если газ имеет чрезмерно высокую температуру.

5. Калиброванные измерители представляют собой трубки определенных размеров, имеющие по середине сужение. Например, в 50,8 мм трубке делают сужение до 12 мм. Перед установкой трубку градуируют, определяя опытным путем зависимость падения давления газа от скорости при прохождении через сужение.

Для лабораторных работ, где скорость движения газа невелика, употребляют капиллярные трубки от 25 мм до 300 мм длиной, определяя падение давления в них U-образной трубкой, присоединенной при помощи тройников к концам капилляра.

Обычно эти измерители градуируют¹ по объему воды, вытесненному протекающим газом (метод газометра). Подобные измерители, устраиваемые также и для жидкостей, являются недорогими для употребления как в лабораторной, так и в производственной обстановке. Бентон указывает, что в лабораторных измерителях, внутри которых газ движется прямолинейно, получается падение давления (в мм водяного столба), равное

$$1,263 \frac{RL}{d^4} + 67,9 \frac{R^3}{d^4},$$

где R — расход воздуха в литрах в минуту при 25°C и нормальном барометрическом давлении, L — длина капиллярной трубки в мм и d — внутренний диаметр капилляра в мм. Приведенное выше выражение было найдено для потока воздуха. Первый член суммы дает падение давления вследствие трения в капилляре, в то время как второй выражает потери при входе и выходе из капилляра. Если длина капилляра настолько велика, что позволяет пренебречь вторым членом, то падение давления в случае иного газа можно приблизительно высчитать, умножая коэффициент 1,263 на отношение вязкости данного газа при 25° к вязкости воздуха при той же температуре. Все же для точных работ лучше всего проградуировать измеритель.

2. Для жидкостей

При измерении жидкостей газометры заменяются баками, в которых жидкость взвешивается или замеряется ее объем.

Метод смешения, когда расход воды определяется путем измерения концентрации добавленного к ней вещества, может быть применен в случае производственной выпарки растворов. При этом скорости подвода и отвода их находят, исходя из скорости конденсации и анализов входящих и выходящих растворов, или определяют скорость испарения, если из-

¹ A. F. Benton, J. Ind. Eng. Chem. XI. № 7. стр. 623—629 (июль 1919 г.).

вестна скорость подвода и концентрация растворов у входа и выхода. Расход жидкости, протекающей через холодильник, можно высчитать, зная удельную теплоту охлаждающей жидкости, ее температуру при входе и выходе и количество теплоты, поглощенное водой, циркулирующей в холодильном устройстве. В обоих случаях необходимо вносить поправку на возможный обмен тепла с окружающей средой.

Описание различных типов водомеров можно найти в технических справочниках по машиноведению и гидравлике.¹

V. Движение жидкостей в трубах

Механика потока. Здесь будет рассматриваться только случай установившегося движения, т. е. движения жидкости с постоянной скоростью, или, что то же самое, под действием постоянного напора. Движение жидкости вызывается разностью напоров между двумя рассматриваемыми точками.

Например, жидкость, находящаяся под атмосферным давлением, будет перетекать по каналу от точки А к точке В лишь в том случае, если вторая точка расположена ниже уровня первой; в этом случае движение происходит исключительно под действием разности потенциального напора. Подобно этому жидкость будет перетекать по горизонтальной трубе от точки С к точке D, если в последней давление меньше, чем в первой; здесь причиной движения является исключительно разность статического напора. Очевидно, движение может быть также вызвано совместным действием разностей статического и потенциального напоров. Ниже разбираются два возможных вида движения.

A. Круглые сечения (трубы)

Прямолинейное движение. Всякие жидкости (пары, газы, вода и масла) двигаются ламинарно при малых скоростях. При этом каждая частица жидкости перемещается параллельно стенкам трубы, и не образуется „вихревых“ струй. У самой стенки трубы движения нет, но скорость струй увеличивается по мере приближения к осевой линии трубы (см. рис. 20 А.).

На стр. 47—49 указывалось, что если скорость на осевой линии трубопровода определяется в достаточном удалении (50 диаметров трубы) от ближайших мест сужения и искривления, то средняя скорость потока, отнесенная ко всему сечению, составляет половину максимальной, найденной на средней линии. Движение потока жидкости определяется формулой Пуазейля (Poiseuille), которая может быть выведена, исходя из определения абсолютной вязкости; она была проверена рядом наблюдений над движением в трубах разнообразного диаметра, начиная с капилляров и кончая 300 мм трубами:

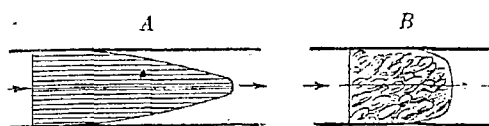


Рис. 20. Распределение скорости в круглых трубах: А—параллельное течение (вязкого) потока, В—пурбулентное (вихревое) движение.

$$\Delta p = \frac{32\mu L u}{gd^2}, \dots \dots \dots (56)$$

где Δp — падение давления в $кг/м^2$, L — длина прямолинейных участков трубопровода в метрах плюс „эквивалентная длина“, соответствующая местным сопротивлениям, u — средняя скорость жидкости в $м/сек.$ ($м^3/сек.$

¹ См. также на русском яз. книгу П. И. Адамовича „Водомеры“ 1931 г. Прим. ред.

деленное на площадь поперечного сечения в m^2), d — внутренний диаметр трубы в метрах, μ — абсолютная вязкость в $г/см/сек.$ (пуаз). Деление на g производится для пересчета $г$ -веса в $г$ -массы. В расчетах будем выражать μ в сантипуазах.

Величина абсолютной вязкости, которая фигурирует в вышеприведенной формуле, является мерой внутреннего трения жидкости, и ее проще определить, как коэффициент μ в уравнении Пуазейля.¹ Каждая жидкость при данной температуре обладает вполне определенной степенью вязкости. Абсолютная вязкость падает с увеличением температуры жидкости.

Вихревое (турбулентное) движение. Увеличивая постепенно скорость движения всякой жидкости, можно наблюдать, что движение из ламинарного внезапно перейдет в так называемое вихревое, являющееся вторым видом движения жидкости в трубах. Оно характеризуется наличием в общей массе жидкости множества отдельных круговых потоков (вихрей) (см. рис. 20 В). Движение частиц жидкости, прилегающих к стенкам трубы, в этом случае незначительно или вовсе не наблюдается. Опыты показали, что отношение средней скорости к максимальной, измеренной на осевой линии трубы, в случае вихревого движения больше, чем при ламинарном. Если скорость на средней линии трубопровода измерять в достаточном удалении (50 диаметров трубы) от ближайших мест искривления потока, то отношение $u/u_{\max}$ можно считать равным прибл. 0,8 (см. рис. 19). Уравнение потока жидкости при наличии вихревого движения, по Фаннингу (Fanning), имеет вид:

$$\Delta p = \frac{f p L u^2}{2 g m} = \frac{4 f p L u^2}{2 g d} \quad , \quad \dots \quad (38)$$

где m — гидравлический радиус в m , равный площади поперечного сечения в m^2 , деленной на омываемый жидкостью (мокрый) периметр в m , равный — $d/4$ для круглых труб,

ρ — уд. вес жидкости в $кг/м^3 = 1000 \cdot s$, где s есть плотность по отношению к воде,

f — коэффициент трения (не имеет размерности); он изменяется в зависимости от модулуса $\frac{d u \rho}{\mu}$ (см. ниже).

В некоторых справочниках коэффициент 4, стоящий в числителе уравнения Фаннинга (38), пропускается, взамен чего коэффициент трения соответственно увеличивается в 4 раза по сравнению с величиной, данной здесь. Но обычно пользуются формулой Фаннинга в том виде, который приведен выше (форм. 38).

Критическая скорость. Скорость, при которой прямолинейное движение переходит в вихревое, носит название критической скорости; величина ее колеблется в весьма широких пределах. Если для трубы определенного диаметра, через которую протекает жидкость определенной плотности и вязкости, построить диаграмму (рис. 21), где по оси ординат откладывать Δp , а по оси абсцисс значения u , то уравнение (56) даст прямую линию, проходящую через начало координат, а уравнение (38) даст кривую с вогнутостью вверх, пересекающую прямую в точке, соот-

¹ Представим себе большой плоский ящик, в котором налита жидкость, находящаяся в покое. Если в эту жидкость поместить в горизонтальном положении плоский лист, сделанный из материала, удельный вес которого равен удельному весу жидкости, и передвигать последний в его плоскости, то можно обнаружить, что прилегающие к нему слои жидкости начнут тоже двигаться под действием сил сцепления частиц.

Частицы, более близкие к листу, будут двигаться с большей скоростью, чем более отдаленные, вызывая явление „срезывания“ по отношению к отдельным слоям жидкости. Когда скорость частиц жидкости, находящихся на расстоянии единицы от движущейся плоскости, будет отличаться на единицу от скорости движения плоскости, то величина силы, приходящейся на единицу поверхности этой движущейся плоскости, и будет численно выражать абсолютную вязкость. Размерность ее, очевидно, будет $\frac{кг-см}{м^2}$.

ветствующей критической скорости. Экспериментальным путем было доказано, что движение жидкости со скоростями ниже критической, подчиняется уравнению (56), а при скоростях выше критической оно происходит согласно уравнению (38). Из этого следует, что падение давления Δp при любых скоростях принимает всегда наибольшее значение (из двух возможных вариантов по рис. 21), наоборот, величина скорости при всех Δp оказывается наименьшей из двух возможных вариантов по рис. 21. Таким образом на практике всегда имеет место наименее благоприятный случай.

Так как при критической скорости u_c величина падения давления одинакова для обоих видов движения, то уравнения (56) и (38) можно приравнять одно другому и таким образом найти величину критической скорости. Как будет показано ниже, коэффициент трения f в уравнении (38) изменяется в зависимости от скорости жидкости и других условий. Называя его значения в критической точке через f_c , имеем:

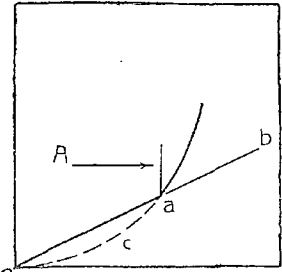


Рис. 21. Критическая скорость. *abc.* — Скорость жидкости и. *Ord.* — Понижение давления (Δp). *A* — Критическая скорость.

$$\Delta p_c = \frac{32\mu Lu_c}{gd^2} = \frac{2f_c \rho Lu_c^2}{gd}, \text{ откуда}$$

$$u_c = \frac{16\mu}{f_c \rho d} \dots \dots \dots (59)$$

На стр. 61 будет показано, что коэффициент трения при критических скоростях, в случае чугунных или стальных труб, одинаков для всех жидкостей и равен $f_c = 0,0170$; поэтому уравнение (59) для всех жидкостей примет вид:

$$u_c = \frac{0,942\mu}{\rho d} \cdot 1 \dots \dots \dots (59a)$$

Это выражение показывает, что критическая скорость велика при большой абсолютной вязкости, малой плотности жидкости и малом внутреннем диаметре трубы. Из этих трех переменных две (μ и ρ) изменяются в зависимости от характера жидкости, и их отношение (μ/ρ) иногда называется кинематической вязкостью. При решении задач о движении капельных жидкостей удобнее μ иногда заменять величиной z , где z — есть сравнительная вязкость жидкости при данной температуре по отношению к вязкости воды при 20°C (см. табл. критических скоростей на стр. 56).

Формула (59a) обычно применяется в случае капельных жидкостей, но она вполне справедлива и для газов.

¹ Если постепенно увеличивать скорость движения параллельных струй, то можно и при скоростях выше критической сохранить прямолинейное движение. Этот случай изображает метастабильная линия *ab* на рис. 21. Здесь уравнение (59) указывает на необходимость применения форм. (38), соответствующей вихревому движению, а фактически величина падения давления определяется уравнением Пуазейля (56). Ошибочное применение форм. (38) дало бы преувеличенный результат для падения давления. Обратно, при постепенном уменьшении скорости вихревого движения жидкости, можно получить неустойчивую форму вихревого движения, как это показывает линия *ac* на рис. 21. И в этом случае формула (59) дает ошибочное представление о применимости ур-ния (56), вследствие чего вычисленная по нему величина падения давления опять оказывается больше истинной. Отсюда видно, что точка пересечения обеих линий на рис. 21, определяемая ур-нем (59), является весьма важной, так как при наличии метастабильной формы движения, все же вычисленная величина падения давления всегда будет отличаться от истинной, будучи больше последней, и, следовательно, будет взята „с запасом“.

Таблица дает критические скорости, вычисленные по форм. (59а) для 50,8 мм (2") трубы. Действительный внутренний диаметр такой трубы равен 53 мм.

Отсюда видно, что критические скорости для воздуха и воды настолько малы, в сравнении с обычно встречающимися скоростями в трубопроводах, что прямолинейного движения (ламинарного) в последних вообще не наблюдается, если только диаметр трубы не очень мал. Наоборот, для вязких масел величина критической скорости значительно превосходит применяемые на практике скорости. Поскольку эти жидкости по своим удельным весам различаются лишь немного, постольку их критические скорости определяются, главным образом, отношением вязкости к внутреннему диаметру трубы.

На стр. 61 будет показано, что в случае движения в трубах отношение между падением давления и скоростью потока жидкости зависит от вязкости жидкости. Вязкость всех веществ меняется с температурой. Для определения величины вязкости существуют различные приборы. Вязкость можно выразить в разных системах единиц (об этом см. ниже).

Вязкость газов.

Абсолютную вязкость газа можно найти, пропуская его через капиллярную трубку известной длины и диаметра, поддерживая определенную разность давлений у ее концов и измеряя количество газа, протекающего в единицу времени. При этом η вычисляется по формуле Пуазейля. Такое измерение выполнить не легко, так как довольно трудно приготовить капиллярную

Вычисленные критические скорости для 50 мм трубы

Вещество	Темп. в ° Ц	Абсол. давл. в атм.	Уд. вес в кг/м³	Относит. вязкость в сант. пуазах	Критич. скор. м/сек.
Водород	21	1	0,0834	0,0088	1,9
Воздух	21	1	1,2	0,0184	0,28
Воздух	21	10	1,2	0,0184	0,028
Пар	100	1	0,60	0,0120	0,36
Пар	180	10	5,24	0,0144	0,05
Вода	20	любое	1000	1,0	0,018
Минер. масло	20	любое	900	10,0	0,21
Сырая нефть (калифорн.)	20	любое	963	3,450	211

трубку строго постоянного диаметра. Это затруднение можно обойти, определяя относительную вязкость (см. стр. 55). Имея в виду, что величина вязкости меняется с температурой, необходимо опыт производить при постоянной температуре. На рис. 22 дана зависимость вязкости нескольких газов от температуры. Вязкость газов приблизительно пропорциональна дробной положительной степени абсолютной температуры. При построении этих зависимостей на логарифмической бумаге оказалось, что получаемые кривые в большинстве случаев очень близки к прямым линиям и имеют наклон от 0,5 до 1.¹

Более подробные сведения о вязкости можно найти в физико-химических таблицах. Обычно принято выражать величину абсолютной вязкости в системе CGS. Способ перевода из этой системы в другие дан на стр. 60.

Вязкость жидкостей. Абсолютную вязкость жидкости можно определить с помощью капиллярной трубки, как это показано ниже, или вискозиметрами разных систем.

¹ Согласно кинетической теории, вязкость (внутреннее трение) газов не должна зависеть от давления, будучи прямо пропорциональна квадратному корню из абсолютной температуры. Опыты показали, что внутреннее трение углекислоты остается постоянным при изменении давления от 1/60 до 1 атмосферы и увеличивается лишь на 18% при повышении давления до 40 атмосфер (Jeans, "Dynamical Theory of gases", Camb. Univ. Press. 1904). Что касается зависимости внутреннего трения от температуры, то в действительности показатель степени у абсолютной температуры близок к единице, а не равен 0,5, как это следует по кинетической теории газов.

В заводской обстановке вязкость жидкостей обычно определяется путем измерения времени истечения известного объема жидкости через короткую трубку в аппарате, называемом вискозиметром. Так, жидкость, имеющая вязкость в 80 по Зейболту, требует 80 секунд, чтобы вылился объем, заполняющий нижний резервуар прибора при переменном уровне в верхнем. Падение внутреннего давления жидкости вдоль трубки зависит от ее абсолютной вязкости, но на потери напора при входе и истечении абсолютная вязкость практически не влияет. Вследствие этого величина абсолютной вязкости не связана прямой пропорциональной зависимостью с продолжительностью истечения.

Соотношение между продолжительностью истечения (θ) в секундах и абсолютной вязкостью различно в вискозиметрах разных систем, а иногда бывает различным и в нескольких одинаковых приборах одной системы. Такие приборы подвергают градуировке, пользуясь жидкостями с вполне определенной вязкостью. Так, для прибора Зейболта это соотношение выражается следующим образом:

$$\frac{z}{s} = 0,220 \theta - \frac{180}{\theta}, \dots \dots \dots (65)$$

где z — вязкость при определенной температуре относительно воды при 20° (в сантипуазах), и s — удельный вес при данной температуре. Так, относительная вязкость масла с удельным весом в 0,9, которое на вискозиметре Зейболта при 65° показывает 100 сек., равняется при этой температуре $20,2 \cdot 0,9 = 18,2$. Эта эмпирическая формула верна лишь для сравнительно вязких жидкостей. К жидкостям с малой вязкостью она не применима. Например, она дает отрицательную величину вязкости при продолжительности истечения меньшей 28,6 сек.

Как указывалось выше, абсолютную вязкость жидкости можно найти, наблюдая время ее истечения через капиллярную трубку. Ланг (Lang) ¹ показал, что можно быстро и с достаточной для практики степенью точности определить вязкость с помощью капиллярной трубки, нижний конец которой погружен в большую плоскую чашку, содержащую испытуемую жидкость. Трубку устанавливают так, чтобы жидкость поднялась по капилляру до определенной метки. Вторая метка наносится немного выше. Затем жидкость поднимают всасыванием до третьей метки, расположенной у верхнего конца трубки. Столбику жидкости дают стечь и наблюдают при этом время (θ_x) падения уровня жидкости в капилляре от третьей метки до второй. Определив время (θ_s) падения уровня жидкости, абсолютная вязкость которой известна, можно вычислить и вязкость испытуемой жидкости по следующей формуле, выведенной на основании закона Пуазейля

$$\frac{\mu_x}{\mu_s} = \frac{\theta_x \rho_x}{\theta_s \rho_s}, \dots \dots \dots (66)$$

где ρ — плотность жидкости.

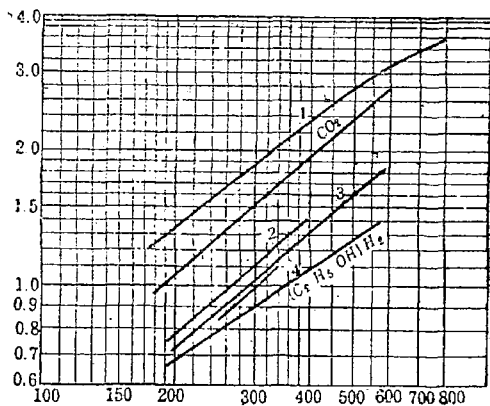


Рис. 22. Вязкость газов. Составлено по различным литературным источникам. Абс. — Абсолютная температура в $^\circ\text{K}$. Орд. — $100z = 100 \times$ вязкость газов в сантипуазах. Усл. обозн.: 1 — воздух, 2 — метан, 3 — этан, 4 — Пар.

Так как вязкость большинства жидкостей значительно меняется с изменением их температуры, то при точных измерениях необходимо покрывать капилляр оболочкой, изолирующей его от внешних тепловых влияний.

Этот приближенный метод не следует применять, когда вязкости стандартной жидкости и испытуемой сильно между собою разнятся.

Вязкость капельных жидкостей всегда уменьшается с повышением их температуры. Если известны только отдельные значения вязкости, соответствующие определенным температурам, то часто приходится интерполировать и иногда экстраполировать, строя кривую линии зависимости изменения вязкости жидкости от температуры, так как достаточно точных и вместе с тем несложных формул, по которым можно было бы вычислять вязкость для всех жидкостей, не существует. Рис. 23 показывает, что кривизна линии может быть большой при одних температурах и малой при других. Известно, что интерполяция и экстраполяция производятся более успешно в тех случаях, когда функциональная зависимость приближается к прямолинейной. Кривизна линий может быть сильно уменьшена построением следующих графиков:

Рис. 23. Вязкость воды. Абс. — Температура воды в °C. Орд. — Относительная вязкость η в сантипуазах.

ков: 1) обратная величина вязкости (текучесть)—температура, 2) логарифм вязкости—обратная величина абсолютной температуры, 3) логарифм вязкости—логарифм абсолютной температуры, 4) логарифм вязкости—температура. Все же ни одна из этих комбинаций не дает прямолинейной зависимости во всех случаях. На рис. 24 представлен метод,¹ пока недостаточно проверенный, но обладающий интересными возможностями. По оси ординат отложены температуры испытуемой жидкости, а по оси абсцисс—температуры, при которых выбранная стандартная жидкость имеет ту же вязкость, что и испытуемая. Надо заметить, что в большинстве случаев получаются прямые линии. Применяя этот метод, необходимо знать зависимость вязкости от температуры для нескольких стандартных жидкостей, охватывающих разные области возможных значений вязкости.

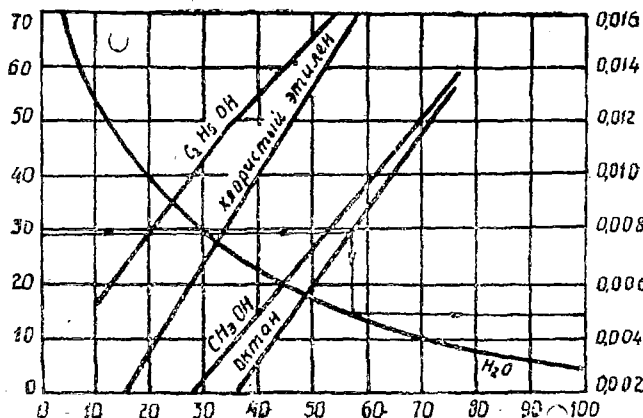


Рис. 24. Изменения вязкости жидкостей в зависимости от температуры по методу Портера.

Абс. — t_w — темпер. воды, при которой она имеет то же μ , что и другая жидкость.

Орд. (лев.) — температура другой жидкости, (прав.) — $\mu_d = \mu_x$
Пример: μ октана при 29,5°C = μ воды при 57,1°C = 0,0040 CGS единиц.

Ряд подобных кривых представлен на рис. 25. Рекомендуются выбирать стандартную жидкость той же природы, что и испытуемая; например, для

¹ A. W. Porter, Phil. Mag., 23, 458 (1912).

испытания водных растворов применять водные же растворы в качестве эталонов и т. п. Хершель ¹ (Herschel) недавно показал, что предположение Эльшлегера (Oelschläger) о существовании линейной зависимости между логарифмом абсолютной вязкости и логарифмом температуры, выраженной в градусах Фаренгейта, действительно подтверждается на практике с достаточной степенью точности, но только для случая масел средней

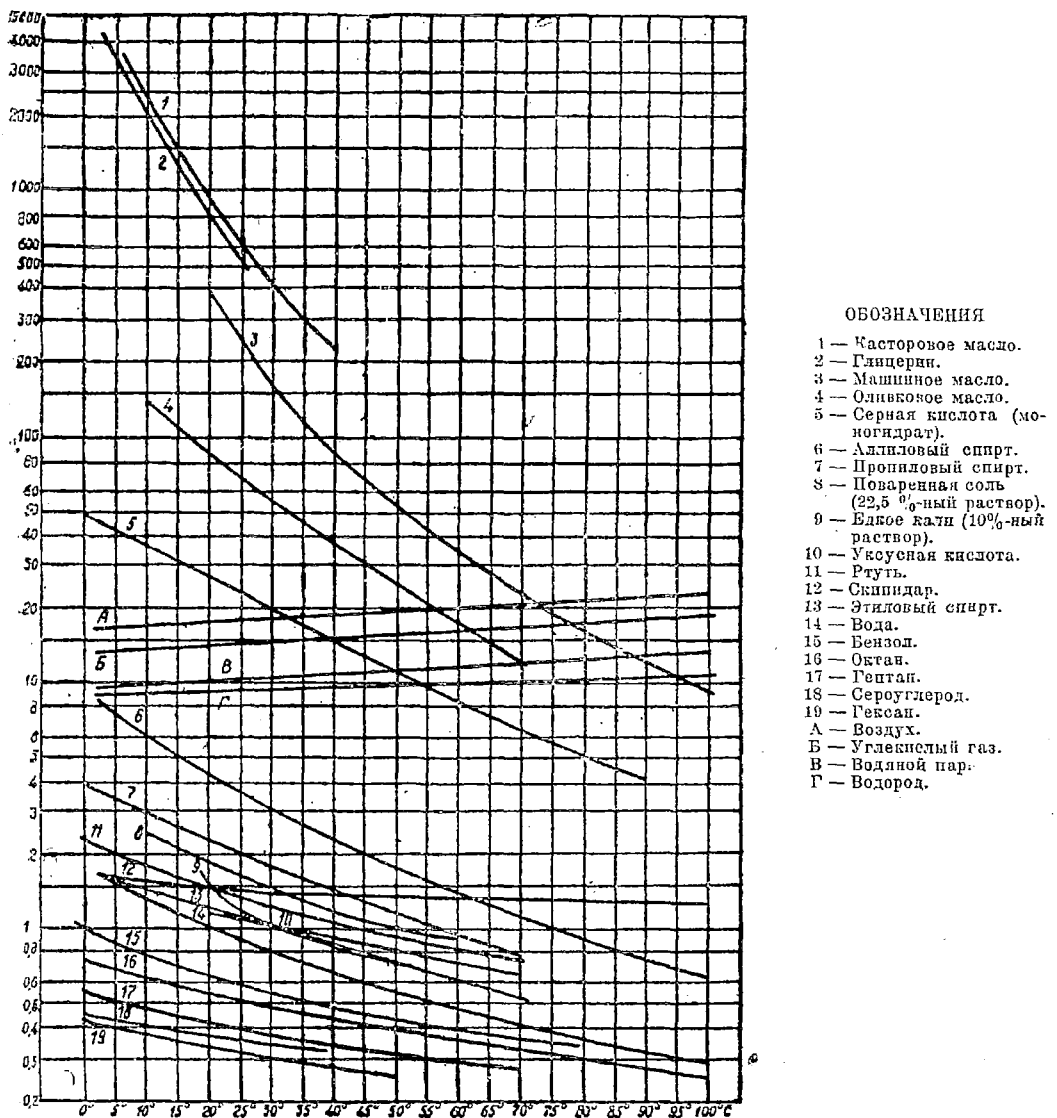


Рис. 25. Относительная вязкость жидкостей.

вязкости, за исключением веретенных, авиационных, а также жирных составных и неочищенных масел (см. рис. 26).

По мнению Портера можно провести параллель между давлением паров жидкости при данных температурах и ее текучестью (величина обратная вязкости). Так, жидкая углекислота обладает весьма малой

¹ J. Ind. Eng. Chem. 14, № 8, 715—723 (Авг. 1. 1922).

вязкостью, в то время как тяжелое минеральное масло с высокой температурой кипения очень вязко.

Как уже говорилось, вязкость всех капельных жидкостей падает с повышением их температуры. Это явление имеет практическое значение при перекачке нефти. Вязкость сырой нефти при 49° составляет всего лишь $\frac{1}{16}$ таковой при $15,5^\circ$. Если движение потока нефти ламинарное, то падение давления в трубопроводе при 49° уменьшается в 16 раз по сравнению с падением при $15,5^\circ$. Если движение вихревое, то падение давления при 49° составит половину падения при $15,5^\circ$, так как f изменяется приблизительно пропорционально корню четвертой степени из z (рис. 27). Отсюда видно, что преимущество перекачки нефти при повышенной температуре гораздо резче сказывается в случае ламинарного движения, чем в случае вихревого.

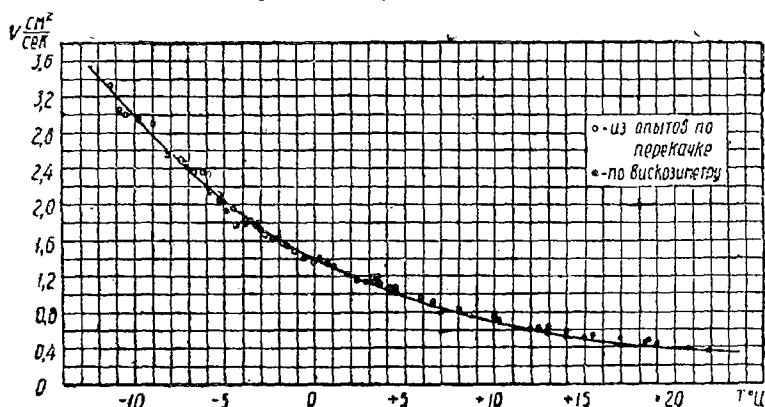


Рис. 26. Диаграмма зависимости вязкости эмбинской нефти от температуры.

Взаимный перевод мер вязкости. В системе CGS величина μ имеет следующую размерность:

$$\frac{\text{дина} \times \text{см}^2}{\text{см в сек.} \times \text{см}} = \frac{\text{сек.} \times \text{дина}}{\text{см}^2}$$

Так как дина соответствует $1 \text{ г} \cdot \text{см} / \text{сек.}^2$, то эту размерность можно представить в виде $\text{г} / \text{сек.} \cdot \text{см}$. Подобно этому, в английской системе мер вязкость выражается как $\text{фн.} / \text{сек.} \times \text{фт.}$. Поэтому, чтобы перевести значение абсолютной вязкости из системы CGS в английскую систему единиц, надо $\text{г} / \text{сек.} \cdot \text{см}$ превратить в $\text{фн.} / \text{сек.} \times \text{фт.}$. Переводный множитель для данного случая будет $30,5/454$ или $0,0672$; на него надо умножить число вязкости, выраженное в системе CGS. Например, абсолютная вязкость воды при 68° Ф (20° Ц) равна $0,0100$ единиц CGS (иногда называемых пуазами) или $0,0100 \cdot 0,0672 = 0,000672$ англ. единиц.

Вязкость жидкости по отношению к воде при 20° получается путем деления абсолютной вязкости жидкости на вязкость воды при 20° при условии, что обе абсолютные вязкости выражены в одинаковых единицах. Так жидкость, вязкость которой при $65,5^\circ \text{ Ц}$ составляет $0,200$ единиц CGS имеет относительную вязкость, равную $0,200/0,0100 = 20$.

Способ перевода вязкости, выраженной в секундах (определенной на приборе Зейболта), в числа относительной вязкости был приведен на стр. 57.

Коэффициент трения при вихревом движении. Если скорость потока превосходит критическую величину, то, согласно ранее сказанному, соотношение между падением давления и скоростью определяется

по форм. (38), соответствующей вихревому движению. В нее входит коэффициент трения f . Прежде в технике применяли разные эмпирические формулы, в которых f определялось, как функция одной или нескольких величин; к ним относились: внутренний диаметр трубы d в метрах, средняя скорость потока u в м/сек., плотность жидкости ρ в кг/м³, абсолютная вязкость жидкости μ в пуазах и степень шероховатости внутренней поверхности трубы α .

Таким образом, эти формулы давали величину f для данной жидкости, но они были верны лишь в определенных узких пределах изменения входящих в них переменных величин. Часто не введенные в формулу величины оказывали все же существенное влияние на f , тем самым делая формулу неверной. Недавно было обнаружено, что коэффициент трения любой жидкости является функцией всех вышеназванных величин, т. е.

$$f = \varphi_1(\text{du} \rho / \mu), \psi_2(\alpha / d).^1$$

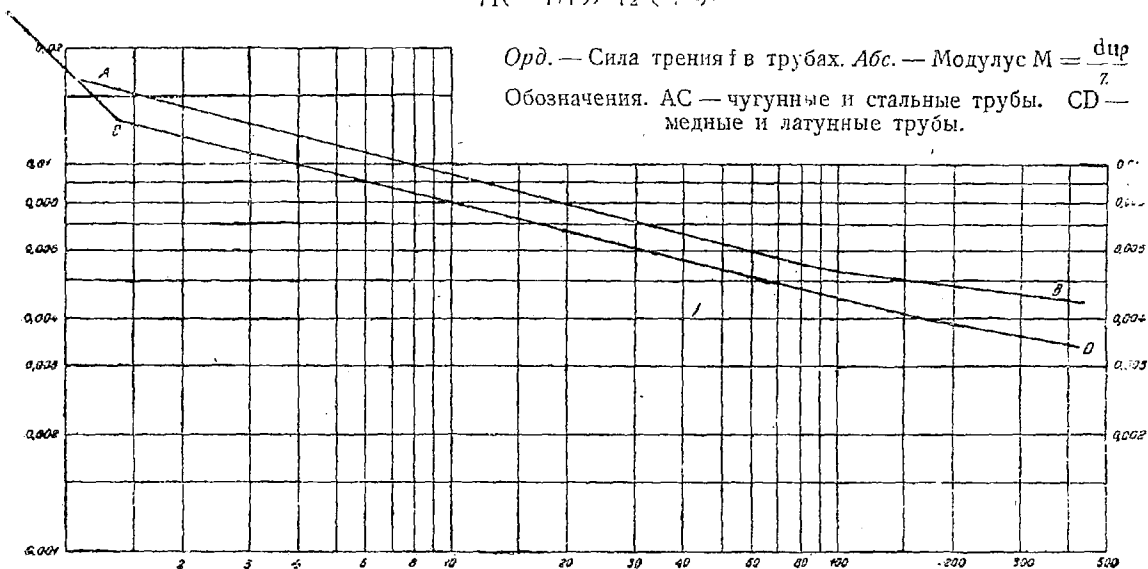


Рис. 27. .

Так как выражать α/d численно неудобно, то соотношение между f и модулюсом $\text{du} \rho / \mu$ было определено опытным путем для труб с различной степенью шероховатости. Наиболее благоприятные соотношения получились поэтому для гладких труб. Эти исследования были проведены много лет назад,² но результат был представлен в такой форме, что воспользоваться им можно было лишь недавно. Наиболее необходимые и достоверные данные для воды, газа и масла, соответствующие случаю вихревого движения в трубах, были недавно обработаны.³ При этом обнаружилось, что коэффициент трения одинаков для всех жидкостей, имеющих один и тот же модулюс. Величина n (наклон линии, полученной при построении на логарифмической бумаге зависимости f от $\text{du} \rho / \mu$, см. рис. 27) изменяется от $-0,4$ до $-0,2$ и меньше; поэтому наиболее удобно определять величину f из диаграммы, представляющей функциональную зависимость f от модулуса. Так как авторы только что названной статьи³ интересовались

¹ Это вполне справедливо для участков труб, длина которых, по крайней мере, в 200 раз больше их диаметра. В случае более коротких труб необходимо вводить в рассмотрение также и величину l/d или вносить в конечный результат поправку, как это показано на стр. 64. См. также *Herschel*, *Proc. Am. Civil Eng.* 84 (1921), 527.

² *Reynolds*, *Trans. Roy. Soc. London* 1883, 935; см. также *Helmholtz*, *Wissenschaftliche Abhandlungen*. I, 158 (1873).

³ *Wilson, Mac Adams and Seltzer* *J. Ind. Eng. Chem.* 14, 2, 105—119 (1922).

преимущественно жидкостями, то величину модулуса они дали в виде отношения dus/z , вместо dur/μ . Наиболее достоверные кривые представлены на рис. 27.

Согласно сказанному ранее, в случае вихревого движения необходимо вычислить величину dus/z , взять f из диаграммы (рис. 27) и подставить в уравнение (38), $\Delta p = 4 f \rho Lu^2/2 \text{gd}$.

Нетрудно видеть, что уравнение (38), соответствующее вихревому движению, дает тот же результат, что и уравн. (56), соответствующее прямолинейному движению ($\Delta p = 32 \mu Lu/\text{gd}^2$), если в формуле (38) принять $f = \frac{16 \mu}{\text{dur}}$. Таким образом формулу (38) можно применять с одинаковым успехом как в случае вихревого, так и прямолинейного движения, если в первом случае f находить по диаграмме (рис. 27), а во втором — определять по формуле:

$$f = 0,016 \frac{z}{\text{dur}} \dots \dots \dots (67)$$

Формула (67)¹ тоже графически представлена на диаграмме (рис. 27), так что в обоих случаях движения f находится по рис. 27 и прямо подставляется в формулу (38)

$$\Delta p = 4 f \rho Lu^2/2 \text{gd}.$$

При применении этого метода совершенно не требуется знать наперед, какой вид движения имеет место; наоборот, ответ на это дает диаграмма, так как если полученная точка лежит вправо от места пересечения обеих линий на рис. 27, то существует вихревое движение, и наоборот — мы имеем ламинарное движение в том случае, когда точка располагается влево от этого места. Абсцисса $\left(\frac{\text{dur}}{z}\right)$ точки пересечения обеих линий для стальных и чугунных труб равна приблизительно единице, а для тннутых медных и бронзовых 1,18 (по новейшим данным она равна прибл. 2,3).

При трубах очень большого диаметра значение f получается преувеличенным, так как в этом случае кривая для стальных труб почти совпадает с таковой для медных. Кривая прямолинейного движения справедлива для труб любых размеров.²

Пример 8. Какова величина падения давления в $\text{кг}/\text{м}^2$ на каждый км горизонтального участка трубопровода, состоящего из стальных труб вн. диам. 154 мм, и сколько требуется теоретических Л. С., чтобы пропускать в час 151 м^3 нефти при $z = 50$, и при $z = 470$ (уд. вес нефти = 0,90).

Решение а) Средняя скорость течения в трубах:

$$\frac{151}{3\,600 \cdot 0,154^2 \cdot 0,185} = 2,25 \text{ м/сек.}$$

Величина $\frac{\text{dur}}{z} = 0,154 \cdot 2,25 \cdot 900/50 = 6,25$, и по рис. 27, соответственное значение будет около 0,010.

Согласно уравнению (38). падение давления на км длины

$$\frac{4 \cdot 0,01 \cdot 900 \cdot 1\,000 \cdot 2,25^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,154} = 60\,300 \text{ кг}/\text{м}^2.$$

Теоретически потребная мощность для передачи нефти зависит от расхода нефти и величины давления, необходимого для преодоления трения и создания скоростного напора. Этот последний равен:

$$\frac{\gamma v^2}{2g} = \frac{900 \cdot 2,25^2}{19,6} = 232 \text{ кг}/\text{м}^2.$$

Теоретический расход мощности $232 + 60\,300 = 60\,532 \text{ кг}/\text{м}^2$; $\frac{151 \cdot 60\,532}{3\,600 \cdot 75} = 34$ теоретич. Л. С.

¹ На рис. 27 по уравнению (67) построена линия с отметкой $f = 0,016 z/\text{dur}$, круто поднимающаяся вверх в левой части диаграммы.

² Кривая вихревого движения в стальных трубах построена применительно к трубам диаметром от 2 до 10 см. Для труб меньших 2 см значение f следует увеличить на 10%.

Действительная мощность будет равна теоретической, деленной на коэффициент полезного действия насоса

б) Здесь $\text{Dus}/z = 0,154 \cdot 2,25 \cdot 900/470 = 0,664$, и, по рис. 27, $f = 0,021$.

Применяем попрежнему ур. (38), несмотря на то, что теперь движение параллельных струй, а не вихревое; величина падения давления получается равной

$$60\,300 \frac{0,021}{0,010} = 132\,000 \text{ кг/м}^2$$

что на 120% больше, чем в предыдущем случае (а).

Б. Сечения некруглой формы

Уравнение Фаннинга остается справедливым в случае вихревого движения жидкости в каналах и некруглого сечения. Значит мы имеем согласно предыдущему

$$\Delta p = \frac{f \rho L u^2}{2 g m}, \dots \dots \dots (38)$$

где смысл входящих величин остается прежним. Практических данных относительно величины коэффициента трения в каналах с некруглым поперечным сечением пока нет. Поэтому, в данном случае умножают гидравлический радиус сечения на 4, получая т. наз. „эквивалентный диаметр“ фиктивной круглой трубы, гидравлический радиус которой равен гидравлическому радиусу данного сечения. Величина f , являющаяся функцией отношения dus/z , определяется при этом по рис. 27, стр. 61.

Для ламинарного движения существуют уравнения движения потока по каналам кольцевого сечения (как, например, в холодильнике с двойными трубами), а также между параллельными плоскостями, как это случается в сушилках. Эти формулы подобны уравнению Пуазейля для круглых труб; они помещены в общей сводке формул на стр. 66, вместе с уравнением для критических скоростей потока в кольцевых каналах и между параллельными плоскостями.

Весьма важным является случай движения воздуха поперек рядов паровых трубок, расположенных в шахматном порядке, как это встречается в калориферах. Существуют формулы, выражающие зависимость между полным падением давления, скоростью воздуха и числом рядов трубок, через которые воздух последовательно проходит. Приводимые здесь приближенные (эмпирические) формулы были составлены применительно к калориферу Стуртеванта (Sturtevant).¹ Эти данные использованы ниже при расчете калорифера (см. стр. 108).

Для 25,4 мм (1") труб (наружн. диам. 32,5 мм) с расстоянием между осями в 54 мм (что дает свободную площадь для прохода воздуха, равную 39,7% от общей площади поперечного сечения калорифера):

$$r = (0,000\,045\,8 + 0,000\,012\,0\,N) u^2.$$

Для 25,4 мм труб (наружн. диам. 32,5 мм) с расстоянием между осями в 66 мм (51,2% свобод. площ.):

$$r = (0,000\,048\,5 + 0,000\,007\,45\,N) u^2.$$

Для 254 мм труб (наружн. диам. 32,5 мм) с расстоянием между осями в 70 мм (55,3% своб. площ.):

$$r = (0,000\,047\,7 + 0,000\,006\,89\,N) u^2.$$

Обозначения:

r — м водяного столба,

u — средняя скорость воздуха в м/сек. (отнесенная к 20° и норм. давлению) через живое сечение ряда трубок вдоль оси калорифера,

¹ „Data Book for Engineers and Architects“. B. F. Sturtevant Co. Hyde Park, Mass. (1917).

N — число рядов трубок, которые воздух последовательно встречает на своем пути.

Примечание. Эти данные верны для скоростей от 3 до 10,5 м/сек. и для числа рядов трубок от 8 до 32.

VI. Потери в газах и жидкостях при сжатии и расширении струи

Потери при расширении. При внезапном увеличении площади поперечного сечения канала, как это изображено на рис. 28, часть скоростного напора струи при переходе в широкую часть превращается в статическое давление, в то время как другая часть теряется вследствие удара быстро движущихся частиц узкой струи о медленно движущиеся частицы в широкой части.¹ В конечном счете давление в широкой части оказывается большим, нежели в узкой, но оно было бы еще больше при отсутствии потерь. Величина этой потери при расширении зависит от квадрата разности скоростей в узкой и широкой части согласно следующему уравнению:

$$\Delta h = \frac{(u_1 - u_2)^2}{2g}, \dots \dots \dots (62)$$

где Δh — потерянный напор, выраженный в метрах столба протекающего вещества при плотности, соответствующей широкой части; u_1 и u_2 суть средние скорости потока в узкой и широкой частях, выраженные в м/сек. Величина g равна 9,81 м/сек.²

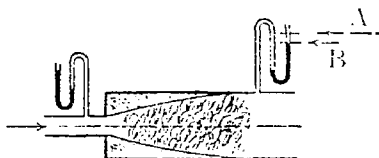


Рис. 28. Потери при расширении. А — ожидаемый уровень при отсутствии потерь. В — действительный уровень.

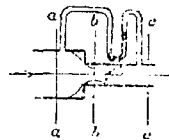


Рис. 29. Потери при сжатии.

Потери при сжатии. При внезапном уменьшении площади поперечного сечения канала, как это изображает рис. 29, часть статического напора струи, при переходе в узкую часть, превращается в скоростной напор, в то время как другая часть теряется вследствие удара. Чертеж показывает, что струя сечения а—а сжимается до сечения б—б и затем расширяется до с—с. Полная потеря на участке от а—а до с—с называется потерей при сжатии.

Величина ее зависит от квадрата скорости потока в узкой части и отношения площадей узкого и широкого канала и выражается следующей формулой:

$$\Delta h = \frac{K \cdot u_2^2}{2g}, \dots \dots \dots (63)$$

где Δh — потерянный напор, выраженный в метрах столба протекающего вещества с плотностью, соответствующей узкой части, u_2 — скорость потока в узком канале, выраженная в м/сек., $g = 9,81$ м/сек.² и K — коэффициент, меняющийся от 0,5 до 0 одновременно с изменением отношения A_2 к A_1 (площади узкого канала к площади широкого) от 0 до 1,0 (см. рис. 30).

Относительное значение потерь при сжатии и расширении. Во многих случаях вихревого движения потеря давления

¹ Жидкость, заполняющая пространство между расширяющимся конусом потока и стенками трубы, фактически неподвижна (см. рис. 28).

обусловливается кроме трения еще потерями при внезапных изменениях поперечного сечения канала. Полезно бывает знать, в каких случаях можно пренебречь этими потерями по сравнению с потерями от трения. Называя через x число сжатий и через y число расширений (обычно $x=y$), имеем выражение полной потери напора от трения и изменения сечения в следующем виде

$$\Delta h = \frac{fLu^3}{2gm} + xK \frac{u_2^2}{2g} + y \frac{(u_1 - u_2)^2}{2g}.$$

Отсюда видно, что во всех случаях вихревого движения относительная доля потерь от изменения сечения в общей сумме потерь не зависит от скорости.¹ Решающим фактором является соотношение между величинами $(Kx+y)$ и (fL/m) . Поэтому в длинных трубопроводах величина потери от сжатия и расширения ничтожна по сравнению

с потерями от трения в то время как, например, во многих типах сушил, наоборот, можно пренебречь потерей от трения.

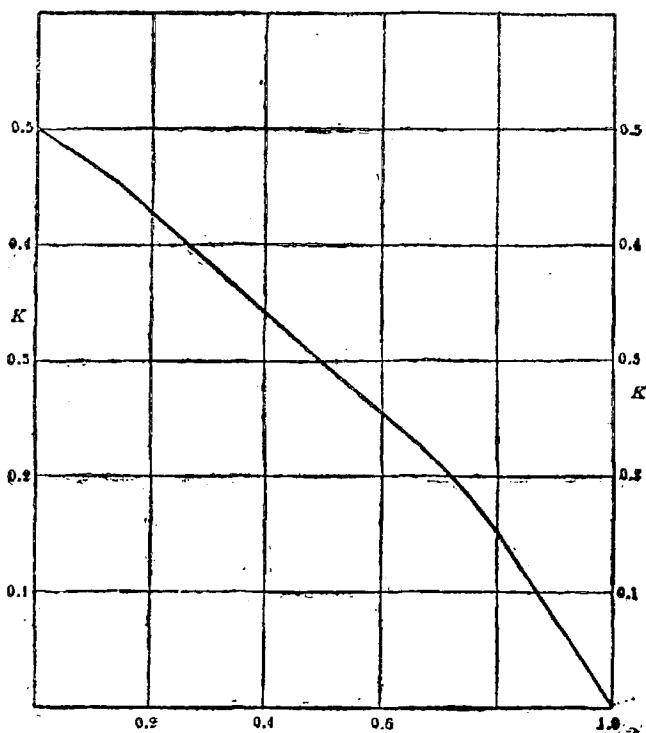


Рис. 30. Величина коэффициента K в уравнении потери от сжатия.

$$\text{Абс. } \frac{A_1}{A_2} \text{ Орд. } K$$

ОБЩАЯ СВОДКА ФОРМУЛ, КАСАЮЩИХСЯ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ, ПАРОВ И ГАЗОВ

I. Формулы справедливы для паров и газов, если падение давления не превосходит 10% абсолютного давления за рассматриваемым сечением (или участком), а для жидкостей — при любом падении давления.

1. Диафрагма

Если диаметр камер, по крайней мере, в пять раз больше диаметра отверстия в диафрагме, то

$$u_2 = c \sqrt{2g\Delta h}, \dots \dots \dots (18)$$

где u_2 — средняя линейная скорость потока в отверстии.

Для диафрагм с острыми краями коэффициент истечения равен 0,61 (отверстие высверлено в металлическом диске, толщиной 1,5—5 мм; в более толстых дисках края отверстия делаются косыми с расширением в сторону движения потока). Эта цифра не годится для диафрагм, толщина которых значительна по сравнению с диаметром отверстия.

¹ Ясно, что скорости в различных точках можно выразить через величину скорости в какой-либо определенной точке, вводя отношения площадей поперечных сечений канала.

Для диафрагм с закругленными краями (в диске, толщиной в 6—7 мм, высверлено отверстие, края которого закруглены навстречу потоку) $c = 0,98$.

Когда диаметр камер меньше пяти кратного диаметра отверстия в диафрагме, то

$$\sqrt{u_2^2 - u_1^2} = c \sqrt{2g \Delta h}, \dots \dots \dots (19)$$

где c должно быть определено опытным путем для каждого отдельного случая.

Примечание. Обычно падение давления при прохождении потока через диафрагму значительно меньше 10% от абсолютного давления за диафрагмой. При непрерывной работе установки считается невыгодным допускать большой процент падения.

2. Прибор Вентури

$$\sqrt{u_2^2 - u_1^2} = c \sqrt{2g \Delta h} \dots \dots \dots (28)$$

Для тщательно выполненных приборов Вентури с правильными углами расхождения и чисто отделанными горловинами $c = 0,98$.

3. Трубка Пито

Для всех давлений:

$$u_{act} = c \sqrt{2g \Delta h}, \dots \dots \dots (35)$$

где u_{act} — действительная скорость в месте расположения отверстия трубки. Соотношение между средней скоростью в трубке и скоростью на осевой линии трубопровода было дано на стр. 49.

Величина c меняется в пределах от единицы (для типа трубки, изображенной на фиг. 18, стр. 47) до 0,84 для более компактных приборов.

4. Движение в трубах и каналах

А) Вихревое движение жидкостей, паров и газов

$$\Delta h = \frac{fLu^2}{2gm} = \frac{2fLu^2}{gd} \dots \dots \dots (38)^1$$

О величине f см. рис. 27, стр. 61.

Б) Ламинарное движение жидкостей, паров и газов

Для круглых труб:²

Пригодно ур. (38) и рис. 28 на стр. 61, см. также стр. 71. Можно применять и следующее уравнение:

$$\Delta p = \rho(\Delta h) = \frac{32\mu Lu}{gd^2} \dots \dots \dots (56)$$

Здесь и далее все величины берутся в чистой, а не в смешанной системе единиц.

Для кольцевых каналов³ (между двумя концентричными трубами):

¹ Для каналов любой формы поперечного сечения (см. стр. 63).

² Только для каналов круглого и квадратного профиля поперечного сечения. Эти формулы проверены на движении воздуха, пара, воды и различных масел, вязкость которых менялась в широких пределах; движение наблюдалось в обыкновенных трубах, диаметром от 2 до 30 см.

³ Уравнения по Lamb'у, "Hydrodynamics of Fluids", 3 изд. Cambridge Univ. Press (1906). Данных для проверки правильности этих формул не имеется.

$$\Delta p = \rho(\Delta h) = \frac{8 \mu L u}{g \left[r_2^2 + r_1^2 - \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln_e \frac{r_2}{r_1}} \right]}, \dots \dots \dots (57)$$

где r_2 и r_1 суть больший и меньший радиусы кольцевого канала.

Для случая движения между двумя параллельными плоскостями:

$$\Delta p = \rho(\Delta h) = \frac{12 \mu L u}{g a^3} \dots \dots \dots (58)$$

В) Критическая скорость

Сплошные линии на рис. 21 (стр. 55) показывают, что величина падения давления всегда оказывается наибольшей из двух возможных. Поэтому при скоростях, ниже критической, применяют уравнения прямолинейного движения, а при скоростях, превосходящих критическую, — уравнения вихревого движения. Формулы, по которым определяется величина критической скорости в различных случаях, следующие:

Для круглых труб:

$$u_c = \frac{16 \mu}{f_c \rho d} \dots \dots \dots (59)$$

Для кольцевых каналов (между двумя трубами):

$$u_c = \frac{8 \mu (r_2 - r_1)}{f_c \rho \left[r_2^2 + r_1^2 - \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln_e \frac{r_2}{r_1}} \right]} \dots \dots \dots (60)$$

Движение между параллельными плоскостями:

$$u_c = \frac{12 \mu}{f_c \rho a} \dots \dots \dots (61)$$

Во всех перечисленных случаях высокая критическая скорость получается при значительной вязкости, малой плотности и малом диаметре (или малом расстоянии между параллельными плоскостями). Коэффициент f_c растет вместе со степенью шероховатости стенок канала; поэтому в трубах с негладкой внутренней поверхностью критическая скорость оказывается меньшей, чем в гладких трубах.

5. Потери при сжатии и расширении

При внезапном расширении сечения:

$$\Delta h = \frac{(u_1 - u_2)^2}{2g}, \dots \dots \dots (62)$$

где u_1 и u_2 суть средние скорости потока в м/сек. соответственно в узком и широком канале.

При внезапном сжатии сечения.

$$\Delta h = \frac{K u_2^2}{g}, \dots \dots \dots (63)$$

где u_2 — скорость потока (м/сек.) в суженном сечении; K — изменяется в пределах от 0,5 до 0, в зависимости от отношения площадей поперечных сечений: суженного и первоначального (несуженного) согласно рис. 30 на стр. 65.

6. Работа

$$\text{Теоретич. Л. С.} = \frac{\Delta h G}{75} = \frac{\Delta p Q_2}{75} = \frac{\Delta h \rho Q_2}{75} \dots \dots \dots (64)$$

При вычислении величин Δh , ρ и Q_2 необходимо брать ту плотность жидкости (или газа), которая имеет место в канале за рассматриваемым участком. Действительная работа находится путем деления теоретической на механический коэффициент полезного действия эксгаустера или воздухоудувки.

II. Формулы для паров и газов, если падение давления составляет больше 10% от их абсолютного давления за рассматриваемым сечением (или участком).

I. Диафрагма

А. *Диафрагма с диаметром камер не менее пятикратного диаметра отверстия диафрагмы (для газов и паров)*

При падении давления на 10—20% от абсолютного давления за диафрагмой:

$$u_2 = c \sqrt{2 g b T \ln_e \frac{p_1}{p_2}} \dots \dots \dots (13)^1$$

При падении давления свыше 50% от абсолютного давления за диафрагмой:

$$G = c A p_1 \sqrt{\frac{M g k}{R T} \left[\left(\frac{1+k}{2} \right)^{\frac{1+k}{k-1}} \right]}, \dots \dots \dots (25a)^1$$

где p_2 —давление за диафрагмой—должно быть меньше, чем величина

$$p_1 \left(\frac{2}{1+k} \right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

Это значит, что для постоянных двухатомных газов и водяного пара абсолютное давление за диафрагмой должно быть соответственно меньше 53% и 55% от абсолютного давления перед диафрагмой.

Так как k для воздуха равно 1,404, то формула (25a) в этом случае перепишется следующим образом:

$$G = \frac{0,533 \ c A p_1}{\sqrt{T_1}} \text{ [ур-ие Флигнера (Fliegner)]} \dots \dots \dots (26)^1$$

Для пара (19) принимает вид:

$$G = \frac{c A p_1}{70} \text{ [ур-ие Нэпира (Napier)]} \dots \dots \dots (27)^1$$

Б. *Диафрагма с диаметром камер, меньшим пятикратного диаметра отверстия диафрагмы (для газов и паров)*

Для любого падения давления:

$$\sqrt{u_2^2 - u_1^2} = c \sqrt{\frac{2 g k p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \dots \dots \dots (11)$$

Величину коэффициента c необходимо определить для каждого случая особо (опытным путем).

¹ О величине коэффициента c см. ч. I общей сводки формул на стр. 65.

II. Прибор Вентури

Для газов и паров:

$$\sqrt{u_2^2 - u_1^2} = c \sqrt{2gbT \ln_e \frac{p_1}{p_2}} \dots \dots \dots (7)$$

Примечание. О величине коэффициента c см. ч. I сводки.

III. Трубка Пито

Для паров, газов и жидкостей, при любом падении давления можно применять формулы, приведенные в I части общей сводки формул.

IV. Движение в трубах и каналах

A. Вихревое движение (газы и пары)

При любой форме поперечного сечения трубы, длина которой не превышает 200 ее диаметров (но и не слишком короткая труба):

$$u_1 = \sqrt{\frac{gRT(p_1^2 - p_2^2)/2Mp_1^2}{\left[\frac{fL}{2m} + \ln_e \frac{p_1}{p_2}\right]}} \dots \dots \dots (51a)$$

$$G = A \sqrt{\frac{gM(p_1^2 - p_2^2)/2RT}{\left[\frac{fL}{2m} + \ln_e \frac{p_1}{p_2}\right]}} \dots \dots \dots (51c)$$

При любой форме поперечного сечения трубы и длине свыше 200 диаметров ее:

$$u_1 = \sqrt{\frac{gmRT(p_1^2 - p_2^2)}{Mp_1^2 fL}} \dots \dots \dots (52a)$$

$$G = A \sqrt{\frac{gmM(p_1^2 - p_2^2)}{RT fL}} \dots \dots \dots (52c)$$

Примечание. О величине f см. рис. 27 на стр. 61. Эти формулы не учитывают потери при входе и выходе, поэтому их не следует применять в случае очень коротких труб. О влиянии колен, вентилей и т. п. см. табл. II и рис. 31 на стр. 71.

B. Ламинарное движение (газы и пары)

Уравнений нет, поскольку этот случай не встречается на практике.

V. Работа

Для газов и паров (адиабатическое сжатие)

$$\text{Теоретич. Л. С.} = \frac{G k p_1 v_1}{75(k-1)} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \dots \dots \dots (11)$$

Примечание. Это уравнение дает сумму работ сжатия и выталкивания без работы всасывания. Действительное число Л. С. находится путем деления теоретически вычисленной величины на механический коэффициент полезного действия компрессора или воздуходувки.

Обозначения

Смысл индексов у букв

- 1 — относится к участку до рассматриваемого сечения
- 2 — " " " " за рассматриваемым сечением
- act — действительный
- max — максимальный

- с — относится к критической скорости
 s — относится к нормальной (стандартной) жидкости
 x — относится к жидкости, сравниваемой с нормальной
 s — относится к воде

Смысл букв

- A = Площадь поперечного сечения в кв. метрах
 a = Расстояние между полками в сушилах или между концентричными трубами
 R = „Газовая постоянная“ = 848; $pV = RT/M = bT$
 b = Постоянная в уравнении газов = R/M
 c = Коэффициент истечения
 D, d = Внутренний диаметр трубы в метрах
 E = Внутренняя энергия 1 кг вещества = теплосодержание в б. кал. (выше 0°Ц)
 f = Коэффициент трения, не имеет размерности (о величине см. рис. 27)
 g = 9,81 в м/сек.²
 G = Расход жидкости (или газа) в кг/сек.
 h = Напор жидкости (или газа), выраженный в метрах столба протекающей жидкости или газа.
 Δh = Разностный напор и падение давления, выраженные в метрах столба протекающего вещества, с плотностью, которая имеет место за рассматриваемым сечением = $h_1 - h_2 = \Delta p/\rho$
 H = Теплота, переданная протекающему веществу от внешнего источника, выраженная в кг-м на кг вещества
 k = Отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме
 K = Коэффициент в выражении потерь от сжатия потока (о величине см. рис. 30 на стр. 65).
 L = Расчетная длина трубопровода в метрах = действит. длине прямолинейных участков трубопровода плюс „эквивалентная“ длина, соответствующая вентилем, коленам и т. п., в метрах. Об „эквивалентной“ длине см. табл. II к рис. 31 на стр. 71
 M = Средний молекулярный вес (не имеет размерности). Для воздуха M = 29
 m = Гидравлический радиус в метрах = площади живого сечения канала в кв. метрах деленной на мокрый периметр сечения в м.
 n = Расход жидкости (или газа) в кг-молекулах в сек.
 $\ln_e$ = Натуральный логарифм = 2,3 десятичного логарифма
 p = Абсолютное давление в кг/м²
 Δp = $p_1 - p_2$ = Разность давлений и падение давления, выраженные в кг/м² = $(\Delta h)\rho$
 Q₂ = Расход жидкости (или газа) в м³ в сек. с плотностью за рассматриваемым сечением = Q
 r = Радиус в м
 R = Энергия в виде механической работы, затраченная извне на движение рассматриваемой жидкости (или газа)
 s = Плотность вещества при данной температуре относительно воды при комнатной температуре (не имеет размерности)
 T = Абсолютная температура в °K = °Ц + 273 (абсол.)
 u = Средняя линейная скорость жидкости в м/сек.
 u_{act} = Действительная скорость в м/сек. в месте расположения отверстия трубки Пито. Это не „средняя“ скорость
 u_{max} = Максимальная скорость жидкости в м/сек.
 u_c = Критическая (средняя) скорость жидкости в м/сек.
 v = Удельный объем вещества = $1/\rho = \text{м}^3/\text{кг}$
 W = $\int p dv$ = работа расширения кг/м на кг газа
 x = Потенциальный напор в м метрах (см. выше)
 z = Относительная вязкость жидкости при данной температуре, относительно воды при 20° Ц в сантипуазах

Значения греческих букв

- μ = Абсолютная вязкость жидкости в системе CGS г/сек./см; или сек. × динах см² или пуазах. Для жидкостей $\mu = 0,01 \text{ з.}^1$
 γ, ρ = Плотность жидкости в кг/м³ за рассматриваемым сечением (при комнатной температуре $\rho = 1000 \text{ г}$)
 θ = Время в любых выбранных единицах

¹ Эта единица вязкости в системе C. G. S. иногда называется пуазом, вязкость воды при 20° Ц равняется 0,010 пуаза или 1,0 сантипуаза¹.

Т а б л и ц а I

Среднее значение k (отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме)¹

	k		k
Одноатомные газы (A, He, Hg)	1,667	Аммиак (газообразный NH_3)	1,30
Постоянные двухатомные газы (воздух, O_2 , N_2 , H_2 , CO)	1,405	Метан (CH_4)	1,31
Пары хлористого водорода (HCl)	1,40	Ацетилен (C_2H_2)	1,26
Газообразный хлор (Cl_2)	1,36	Этилен (C_2H_4)	1,24
Углекислота (CO_2)	1,30	Этан (C_2H_6)	1,22
Сернистый газ (SO_2)	1,26	Сероуглерод (CS_2)	1,20
Водяной пар (H_2O)	1,28	Бензол (C_6H_6)	1,10
		Серный (этиловый) эфир ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$)	1,08

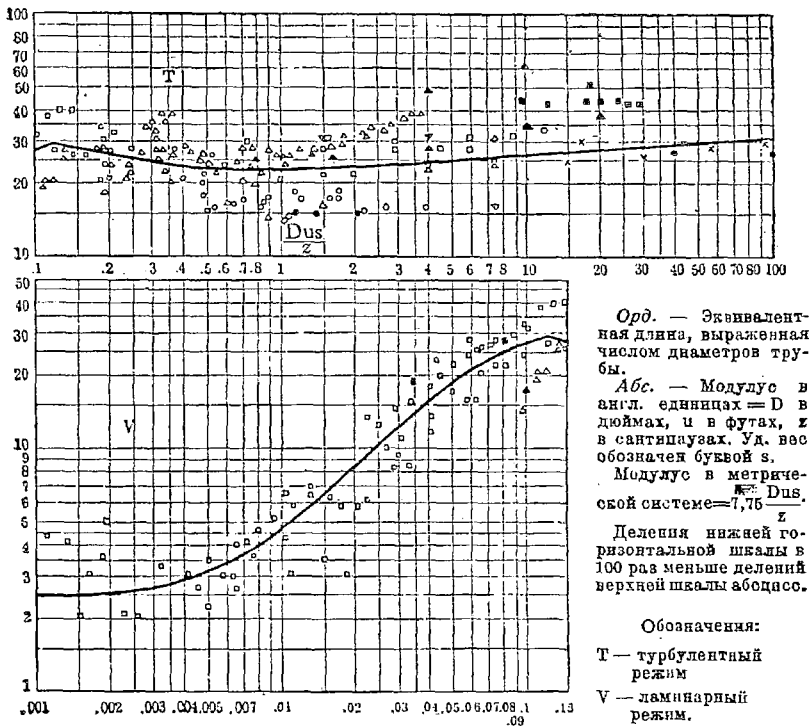


Рис. 31. Эквивалентная длина стандартных закруглений (90°).

Кривая дает среднее из значений опытных данных разных авторов для труб от 1" до 6".

Т а б л и ц а II

„Эквивалентная“ длина для колен, вентилях и т. п., выраженная в диаметрах добавочного прямого участка трубопровода (для вихревого движения)

Колена 90° на трубах $^2 d$ от 25,0 до 70 мм	30
от 70 до 150 мм	40
от 180 до 250 мм	50
Шаровой вентиль ^{2} при d от 25,0 до 70 мм	45
от 70 до 150 мм	60
от 178 до 250 мм	75
Тройники ^{3} от 25,0 до 100 мм	60
Отводы ^{4} , 90° вн. диам. = вн. диаметру трубопровода	
Радиус закругления (по осевой линии) = диам. трубы	20
Радиус закругления = от 2 до 8 ди. м. трубы	10
Крестовины (пересечение двух цилиндров)	50
Потери при входе и при выходе — см. стр. 64.	

¹ По разным литературным данным.

² E. Miller „Notes on Heating and Ventilating“ M. I. T.

³ Marks „Mechanical Engineers' Handbook“ Mc Graw-Hill, N. Y. 1916).

⁴ Trans, Am. Soc. C. E. 62, стр. от 67 до 112 (1909).

ВЫВОД УРАВНЕНИИ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА

Упрощение теоремы Бернулли

В начале главы рассматривалась наиболее употребительная форма выражения теоремы Бернулли:

$$x_1 + p_1 v_1 + \frac{u_1^2}{2g} + R + W = x_2 + p_2 v_2 + \frac{u_2^2}{2g} + F. \quad (2)^1$$

Это уравнение относится к 1 кг вещества. Ранее уже указывалось, что все члены этого уравнения взаимно обратимы, имеют одинаковую размерность (выражены в метрах столба протекающего вещества) и называются напорами. Этим уравнением устанавливается математическое равенство полной механической энергии движущейся жидкости (или газа) в двух выбранных сечениях непрерывной системы с поправкой на ту механическую энергию, которая могла быть отнята или подведена на протяжении рассматриваемого участка (между выбранными сечениями).

Во всех следующих уравнениях, ради упрощения, член R выпущен, так как работу насоса лучше рассматривать отдельно. При выводе формул F тоже не принимается в расчет, но в соответствующих местах разбирается влияние трения.

Уравнение (2) можно применять лишь тогда, когда есть возможность вычислить величину $W = \int p dv$, а это выполнимо, когда известна зависимость между p и v для данного случая. Для этого необходимо знать, во-первых, уравнение состояния рассматриваемого вещества (жидкости или газа) и, во-вторых, влияние внешней среды на него. Следующие важные частные случаи наиболее часто встречаются в технике.

а) Движение при постоянной температуре. Жидкости и газы обычно передаются по трубам, имея температуру окружающего их воздуха, и большинство приборов для измерения скорости движения работает при постоянной температуре. При этом, в случае идеальных газов, член $p v$ пропадает, так как произведение $p v$ для них постоянно при постоянной температуре. В случае жидкостей, которые практически можно считать несжимаемыми, удельный объем остается неизменным, и член W делается равным нулю.

Поэтому для изотермического движения идеальных газов общее выражение теоремы Бернулли принимает вид:

$$x_1 + \frac{u_1^2}{2g} + W = x_2 + \frac{u_2^2}{2g} \quad (2a)$$

При изотермическом движении жидкостей

$$v_1 = v_2 = 1/\rho, \quad W = 0, \quad \text{и уравни. (2) дает:}$$

$$x_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2g} = x_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (2б)$$

б) Случай, когда можно пренебречь изменением потенциального напора. Скорости движения паров и газов обычно во много раз превышают скорости движения жидкостей, и величина W для них довольно значительна. Величина x , появляющаяся при движении не в горизонтальной плоскости, в случае газов сравнительно невелика, и ею можно часто пренебречь. Для измерения разности давлений газа, обычно при-

¹ В этом уравнении трение представляется как исчезновение части механической энергии; конечно, эта энергия в действительности не теряется, а превращается в другой вид ее, в теплоту.

меняется дифференциальный манометр, при котором оба значения x автоматически исключаются из уравнения, и выражение принимает вид:

$$\frac{u_1^2}{2g} + W = \frac{u_2^2}{2g} \dots \dots \dots (2в)$$

Все эти упрощенные формулы, представляющие собой частные случаи теоремы Бернулли, в дальнейшем будут подробно рассмотрены применительно к отдельным вопросам в следующем порядке:

А. Пары и газы

I. Введение (сравнение адиабатического и изотермического движения)

а. Диафрагма (случай малого падения давления)

б. Диафрагма (случай значительного падения давления)

II. Прибор Вентури

III. Трубка Пито

IVа. Движение газов по каналам постоянного поперечного сечения (вихревое движение)

IVб. Движение газов по каналам (ламинарное движение).

Б. Вода

I. Диафрагма

II. Прибор Вентури

III. Трубка Пито

IV. Движение по каналам постоянного поперечного сечения.

В. Прочие жидкости

I. Движение в круглых трубах.

Г. Потери при расширении и сжатии для всех жидкостей и газов.

А. Вывод уравнений для газов и паров

I. Сравнение адиабатического и изотермического движения идеальных газов

Если пренебречь разностью потенциальных напоров, то формула Бернулли (2) для сжимаемых „жидкостей“ (паров и газов) принимает вид:

$$\frac{u_1^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g} = p_1 v_1 - p_2 v_2 + W \dots \dots \dots (3)$$

Применяя уравнение идеального газа

$$pv = bT, \dots \dots \dots (4)$$

получаем величину работы расширения при постоянной температуре

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p_1 v_1 \ln(p_1/p_2) \dots \dots \dots (5)^1$$

и

$$p_1 v_1 = bT = p_2 v_2 \dots \dots \dots (6)$$

Поэтому, для случая изотермического движения идеального газа формула (3) дает

$$\frac{u_2^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} = p_1 v_1 \ln(p_1/p_2) = bT \ln(p_1/p_2) \dots \dots \dots (7)$$

Если идеальный газ расширяется в условиях отсутствия обмена теплоты между ним и окружающей его средой, то такое расширение называют адиабатическими, зависимость между объемом и давлением имеет вид:

$$p_1 (v_1)^k = p_2 (v_2)^k, \dots \dots \dots (8)$$

где k есть отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме. Пользуясь уравнением (8) можно написать выражение интеграла $p dv$ для случая адиабатического расширения:

$$\int_{v_1}^{v_2} p dv = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k} \right] \dots \dots \dots (9)$$

и

$$p_1 v_1 - p_2 v_2 = p_1 v_1 \left[1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k} \right] \dots \dots \dots (10)$$

Подставляя уравнение (9) и (10) в ур. (3), получаем интегрированное уравнение адиабатического движения идеального газа:

$$\frac{u_2^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k} \right] \dots \dots \dots (11)$$

Уравнение (7) и (11) являются основными, поскольку все дальнейшие уравнения относятся к случаю изотермического или адиабатического движения. Деля одно уравнение на другое, имеем

$$\frac{(k-1) \ln(p_1/p_2)}{k \left[1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k} \right]} = 1 \dots \dots \dots (12)$$

Действительно, если падения давления нет, т.-е. $p_2 = p_1$, то нетрудно показать, что отношение (12) превращается в единицу. Другими словами, если пренебречь величиной падения давления, то изменения скоростей оказываются практически одинаковыми как в случае изотермического, так и в случае адиабатического движения. В действительности изотермические и адиабатические кривые настолько близки одна к другой, что даже при изменении давления на 20% против первоначального, разница между изменениями скорости в обоих случаях составляет всего лишь 1%. Это значит, что ошибка, которая получается, когда считают расширение изотермическим, не выходит из пределов точности самого опыта. Если же изменение давления меньше 20%, то имеет смысл воспользоваться этим приемом, так как предположение об изотермичности расширения сильно упрощает и математические выкладки и получаемые результаты.

а. *Диафрагма (случай малого падения давления)*. При наличии камер подходящего размера (см. стр. 41), уравнение изотермического движения (7) принимает вид

$$u_2^2 / 2g = bT \ln_e(p_1/p_2) \dots \dots \dots (13)$$

Если выражения $\ln(1+y)$ разложить в ряд Маклорена, то получится сумма $y - y^2/2 + y^3/3 - y^4/4$ и т. д., и если величина y мала по сравнению с единицей, то эту сумму можно приближенно считать равной самому y . Так как p_1 очень мало отличается от p_2 , то логарифм p_1/p_2 можно представить в виде

$$\ln \left[1 + \left(\frac{p_1}{p_2} - 1 \right) \right], \dots \dots \dots (14)$$

и так как разность $\frac{p_1}{p_2} - 1$ составляет очень малую величину, то логарифм приблизительно равен данной разности или $\frac{p_1 - p_2}{p_2}$ ¹.

Подставляя в ур. (13) величину $\frac{p_1 - p_2}{p_2}$ вместо $\ln(p_1/p_2)$, имеем:

$$u_2^2 / 2g = bT(p_1 - p_2) / p_2 \dots \dots \dots (15)$$

Так как по уравнению идеального газа $bT/p_2 = v_2$, то:

$$u_2 = \sqrt{2gv_2(p_1 - p_2)} = \sqrt{2g(\Delta h)}, \dots \dots \dots (16)$$

где Δh — дифференциальный отсчет в m столба протекающего вещества (газа или пара), той плотности, которую оно имеет за диафрагмой. Практически величина дифференциального отсчета получается в m столба жидкости, заполняющей манометр, и соответствующая высота столба газа находится путем умножения отсчета на отношение плотности жидкости к плотности газа (при температуре и давлении, существующих за диафрагмой).

Действительный расход газа в $m^3/\text{сек}$. Q_2 оказывается меньше вычисленного по формуле (16), так как неизбежное трение уменьшает скорость потока в диафрагме, а поперечное сечение потока всегда бывает меньше отверстия диафрагмы. Поэтому необходимо при вычислении вводить коэффициент истечения c

$$Q_2 = cA \sqrt{2g(\Delta h)} \dots \dots \dots (17)$$

Если u_2 средняя скорость газа при проходе через диафрагму, и так как $Q_2 = Au_2$, имеем:

$$u_2 = c \sqrt{2g(\Delta h)} = c \sqrt{2gv_2(p_1 - p_2)} = c \sqrt{\frac{2gRT(p_1 - p_2)}{M p_2}} \dots \dots (18)$$

В случае, когда диаметр камер невелик по сравнению с диаметром отверстия в диафрагме, имеем:

$$\sqrt{u_2^2 - u_1^2} = c \sqrt{2g(\Delta h)} \dots \dots \dots (19)$$

6. *Диафрагма (случай значительного падения давления)*. При большом падении давления в диафрагме, нельзя уже приближенно считать движение изотермическим, а необходимо применять точную формулу адиабатического движения (11). Ранее было уже указано, что при достаточно больших размерах камер, квадратом скорости движения в них можно пренебречь по сравнению с квадратом скорости в отверстии диафрагмы. Вводя опять коэффициент истечения, имеем:

$$u_2 = c \sqrt{\frac{2gk(p_1 v_1)}{k-1} \left[1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k} \right]} \dots \dots \dots (20)$$

$$Q_2 = cA \sqrt{\frac{2gk p_1 v_1}{k-1} \left[1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k} \right]} \dots \dots \dots (21)$$

$$G = Q_2/v_2 = cA \sqrt{\frac{2gk p_1}{(k-1)v_1} \left[(p_2/p_1)^{2/k} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(1+k)/k} \right]} \dots \dots \dots (22)$$

Это уравнение относится к случаю большого падения газа при проходе через диафрагму, но оно редко применяется в таком виде, так как его можно сильно упростить, выбирая надлежащим образом условия проте-

¹ Это упрощение вызывает ошибку +1,1%, когда p_1 на 2% больше p_2 ; при p_1 на 10% больше p_2 ошибка получается +5,2% и при p_1 больше p_2 на 20% ошибка достигает +9,8%. Обычно p_1 превосходит p_2 не более, чем на 1%.

кания газа. По мере увеличения падения давления газа формула изотермического движения делается все более приближенной, в то время как результаты вычисления по формуле адиабатического движения оказываются более близкими к действительности. Очевидно, что при некоторых средних величинах падения давления обе формулы могут оказаться недостаточно точными. В таких случаях рекомендуется вводить в формулу адиабатического движения вместо отношения теплоемкостей k другой коэффициент n , как это делается при расчете мощности, поглощаемой воздушным компрессором. Но, с другой стороны, это настолько усложняет вычисления, что в технике обычно такого метода избегают.

В состав выражения (22) входит величина:

$$\left[(p_2/p_1)^{2/k} - (p_2/p_1)^{(1+k)/k} \right] \dots \dots \dots (23)$$

При отсутствии движения газа через диафрагму, $p_2/p_1 = 1$; по мере уменьшения этого отношения (при движении) величина (23), а вместе с ней и величина потока по уравнению (22) растёт от нуля, достигая максимума при

$$p_2/p_1 = \left(\frac{2}{1+k} \right)^{k/(k-1)} \dots \dots \dots (24)$$

После того как p_2/p_1 перейдет за критическую величину, определяемую ур. (24), расход газа падает, согласно ур. (22). Опыты показали, что истинная величина расхода газа подчинена ур. (22) только в том случае, когда отношение p_2/p_1 равно или больше критического; при меньших значениях p_2/p_1 величина расхода остается постоянной и равной критической (т. е. соответствующей критическому значению p_2/p_1). Это кажущееся расхождение объясняется следующим образом. Пока не достигнута критическая величина давления за диафрагмой, давление в камере низкого давления равняется давлению в самой отверстии диафрагмы, но, при дальнейшем снижении давления p_2 за диафрагмой за критическую величину, давление в отверстии диафрагмы (а вместе с ним и скорость)¹ остаются постоянными. Так как это давление оказывает решающее влияние на расход газа, то и последний остается неизменным.² Поэтому, выражение (23) тоже остается постоянной величиной, пока отношение p_2/p_1 не превосходит критического значения, определенного ур. (24). В этих условиях общее выражение адиабатического движения (22), при условии наличия достаточно больших камер у диафрагмы, принимает следующий упрощенный вид:

$$G = cA p_1 \sqrt{\frac{gkM}{RT} \left[\frac{1+k}{2} \right]^{\frac{(1+k)}{1-k}}} \dots \dots \dots (25a)$$

или

$$n = cA p_1 \sqrt{\frac{gk}{RMT} \left[\frac{1+k}{2} \right]^{\frac{(1+k)}{1-k}}} \dots \dots \dots (25б)$$

¹ Предполагается, что начальное давление (перед диафрагмой) постоянно.

² Процесс вытекания газа высокого давления через небольшое отверстие диафрагмы в область низкого давления можно рассматривать, как состоящий из двух статей. Во-первых, скорость газа увеличивается, принимая наибольшую величину в самом отверстии диафрагмы; этому увеличению скорости соответствует определенное падение давления газа. Во-вторых, газ, выходя из отверстия диафрагмы, расходится в камере низкого давления. Падением давления газа во время этого второго движения можно пренебрегать, пока скорость в отверстии диафрагмы не очень велика. Но при увеличении скорости может случиться, что выходящий газ не сможет больше рассеиваться по камере низкого давления настолько быстро, чтобы еще более снизить давление в отверстии диафрагмы.

В таком случае давление в отверстии окажется постоянным, независимым от давления в камере низкого давления.

Для воздуха $k=1,405$, поэтому по уравнению (25а)

$$G = 0,533 c A p_1 / \sqrt{T_1} = \kappa g \text{ воздуха в сек.} \quad (26)$$

при условии, что давление за диафрагмой составляет не более 0,53 от давления перед диафрагмой, и площадь поперечного сечения камер по крайней мере в 25 раз больше площади отверстия в диафрагме. Это частное уравнение известно под названием уравнения Флигнера. Для пара величина κ растет вместе с T таким образом, что в результате дает возможность еще упростить уравнение (25а), которое для насыщенного пара принимает вид (приближенно):

$$G = \frac{c A p_1}{70} \left[\text{уравнение Нэпира} \right] \quad (27)$$

при условии, что давление за диафрагмой составляет не более 55% от первоначального давления.

Эти простые уравнения (25а, 25б, 26 и 27) применимы только в тех случаях, когда отношение давлений достаточно мало, а размер камер достаточно велик по сравнению с размером диафрагмы. Поэтому весьма желательно соблюдать эти условия во всех случаях большого перепада давлений. Как уже было указано, критическая величина отношения давлений для воздуха и других постоянных двухатомных газов¹ составляет 0,53, а для пара 0,55, поэтому для возможности применения этих формул необходимо, чтобы величина отношения давлений была меньше приведенных чисел.

Значения коэффициента (c) для некоторых типов диафрагм приведены на стр. 65. При очень точных измерениях следует диафрагму проградуировать. Надо заметить, что величина коэффициента (c) в случае диафрагмы с закругленными краями обычно бывает больше единицы вследствие существования теплообмена между газом и окружающими телами. Наличие такого обмена показывает, что фактически движение не является строго адиабатическим, как это нами принималось.

В случаях, когда не представляется возможным сделать отношение p_2/p_1 ниже критической величины, приходится применять более сложное уравнение (22). Если, кроме этого, и диаметр камер не может быть сделан в 25 раз больше диаметра отверстия в диафрагме, то следует пользоваться уравнением (11).

II. Прибор Вентури

Считая движение изотермическим и предполагая, что применяется для отсчета дифференциальный манометр, имеем:

$$\frac{u_1^2}{2g} + \frac{RT}{M} \ln(p_1/p_2) = \frac{u_2^2}{2g} \quad (7)$$

Если падение давления невелико по сравнению с общим давлением, то выражение (7) можно упростить, раскладывая² его в ряд Маклорена (подобно излож. на стр. 75); это дает:

$$\sqrt{u_2^2 - u_1^2} = c \sqrt{\frac{2gRT(p_1 - p_2)}{M p_2}} = c \sqrt{2g\Delta h} \quad (28)$$

Коэффициент истечения c введен с целью, ранее указанной на стр. 76.

¹ H_2 , O_2 , N_2 , CO и NO .

² Это упрощение ведет к ошибкам, указанным в примечании на стр. 76.

Очевидно:

$$u_2/u_1 = p_1 A_1 / p_2 A_2 \dots \dots \dots (29)$$

$$u_1 = c \sqrt{\frac{2g \Delta h}{(p_1 A_1 / p_2 A_2)^2 - 1}} \dots \dots \dots (30)$$

$$G = u_2 A_2 / v_2 \dots \dots \dots (31)$$

$$n = G/M \dots \dots \dots (32)$$

Когда перепады давлений очень невелики, как это обычно бывает в приборах Вентури, уравнение (30) можно еще более упростить:

$$u_1 = c \sqrt{\frac{2g \Delta h}{(A_1/A_2)^2 - 1}} \dots \dots \dots (33)$$

$$G = u_2 A_2 / v_2 \dots \dots \dots (34)$$

$$n = G/M \dots \dots \dots (34a)$$

III. Трубка Пито

Если трубку с отверстием на конце поместить в струе газа так, чтобы отверстие было расположено прямо навстречу движению потока, то в отверстии создается давление, превосходящее статическое давление газа на величину, соответствующую кинетической энергии газа. Эта энергия является следствием того, что газ обладает известной скоростью. Величина такого скоростного или динамического давления определяется уравнением:

$$h_i - h_s = \Delta h = \frac{u_{act}^2}{2g}, \dots \dots \dots (35)$$

где Δh — высота столба газа, равная разности кинетического давления (удара) h_i и статического давления h_s ; u_{act} представляет действительную скорость газа в месте расположения отверстия трубки; ее не следует смешивать со средней скоростью потока u .

$$\Delta h = v(p_1 - p_2) = \frac{RT}{M_p} (p_1 - p_2) = u_{act}^2 / 2g \dots \dots \dots (36)$$

$$u_{act} = \sqrt{2gRT(p_1 - p_2)/M_p} = \sqrt{2g\Delta h} \dots \dots \dots (37)$$

IVa. Движение газов по каналам постоянного поперечного сечения

Рядом опытов было установлено, что движение газов по трубам при комнатной температуре можно считать с достаточной для практики степенью точности изотермическим при любом падении давления в трубах. При этом трубы не должны быть слишком короткими, вроде патрубков, для которых это утверждение неверно.

Уравнение вихревого движения потока основано на предположении,¹ что сила трения пропорциональна поверхности соприкосновения газа с трубой и приблизительно пропорциональна квадрату скорости газа. Также предполагается, что трение возрастает пропорционально плотности газа ρ . Сила трения уравновешивается перепадом (падением) давления Δp , отнесенного ко всему поперечному сечению канала. Приравнявая эти силы, получаем $\Delta p \cdot A = \alpha \rho L u^2 \times (\text{периметр})$.

Коэффициент пропорциональности α меняет свою величину в зависимости от состояния внутренней поверхности трубы; его обычно представляют в виде дроби $f/2g$, где $2g$ вводится для того, чтобы квадрат скорости выразить через скоростной напор, а f носит название коэффициента

¹ Ур-не (38) было выведено физиками из анализа размерностей; при этом было показано, что f изменяется вместе с величиной $\frac{du_p}{u}$, не имеющей размерности.

трения. Отношение площади поперечного сечения к периметру обозначается m и называется гидравлическим радиусом. Таким образом имеем:

$$\Delta p = \frac{f_p \cdot L \cdot u^3}{2gm}$$

или, выражая падение давления в метрах:

$$\Delta h = \frac{fLu^3}{2gm} \dots \dots \dots (38)$$

Эта последняя формула носит название уравнения Фаннинга. Данные о величине коэффициента трения приведены на стр. 61.

В этих условиях уравнение Бернулли для случая вихревого движения в трубе, отнесенное к 1 кг газа, принимает вид:

$$x_1 + p_1 v_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{RT}{M} \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) - \frac{fLu^3}{2gm} = x_2 + p_2 v_2 + \frac{u_2^2}{2g} \dots \dots (39)$$

Считая, что труба расположена почти горизонтально и разностью уровней можно пренебречь, а также имея в виду, что при изотермическом движении $p_1 v_1 = p_2 v_2$, можно ур. (39) переписать следующим образом:

$$\frac{u_1^2}{2g} + \frac{RT}{M} \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) = \frac{fLu^3}{2gm} + \frac{u_2^2}{2g} \dots \dots \dots (40)$$

Эту формулу можно прямо прилагать лишь к тому случаю, когда изменения давления газа и соответствующие им изменения скорости незначительны, так как потери от трения меняются вместе с изменениями скорости.

Случай малого падения давления. В этом случае разностью квадратов скоростей можно пренебречь (стр. 76) и, считая, что натуральный логарифм p_1/p_2 здесь по предыдущему равен $\frac{p_1 - p_2}{p_2}$, можно переписать ур. (40) следующим образом:

$$fLu^3/2gm = RT \frac{(p_1 - p_2)}{Mp_2} = v_2(p_1 - p_2) = \Delta h \dots \dots \dots (41)$$

Для круглых труб или каналов квадратного сечения $m = d/4$.

$$\Delta h = \frac{4fLu^3}{2gd} = \frac{2fLu^3}{gd} \dots \dots \dots (42)$$

$$Q = Au \dots \dots \dots (42a)$$

$$G = Q/v \dots \dots \dots (42b)$$

$$n = G/M, \dots \dots \dots (42b)$$

где Δh — падение давления (в виде статического напора), вызванное трением в трубе и выражаемое в m столба газа с плотностью, соответствующей меньшему давлению. Эти уравнения применимы лишь в случае малого падения давления что наиболее часто встречается на практике. О величине f см. стр. 61.

Случай значительного падения давления. Одновременно с уменьшением давления происходит увеличение скорости, при чем элементарному участку трубы dL соответствует элементарное приращение скорости du . Выражение равенства между подведенной и отнятой энергией с поправкой на трение и работу расширения имеет вид:

$$u^2/2g + pdv - fu^2dL/2gm = (u + du)^2/2g \dots \dots \dots (44)$$

Пренебрегая бесконечно малыми второго порядка, имеем:

$$fu^2dL/2gm = -udu/g + pdv \dots \dots \dots (45)$$

Так как

$$u = Gv/A, du = Gdv/A, \text{ то} \\ fG^2v^2dL/2gmA^2 = -G^2v dv/gA^2 + bTdv/v \dots (46)$$

или

$$\left[\frac{fG^2}{2gmA^2} \right] dL = - \left(\frac{G^2}{gA^2} \right) \frac{dv}{v} + bTdv/v^3 \dots (47)$$

Интегрируя ¹ (47) в пределах от 0 до L, а также от v_1 до v_2 , получаем

$$fG^2L/2gmA^2 = \frac{G^2}{gA^2} \ln \frac{v_1}{v_2} + \frac{bT}{2} \left(\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_2^2} \right) \dots (48)$$

Так как

$$p_1v_1 = p_2v_2 = bT,$$

то в случае изотермического движения уравнение (48) может быть представлено в виде:

$$fG^2L/2gmA^2 = \frac{G^2}{gA^2} \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) + (p_1^2 - p_2^2)/2bT \dots (49)$$

Умножая (49) на $(bT/p_1)^2$, получаем

$$\frac{fL}{2gmA^2} (GbT/p_1)^2 = \frac{(GbT)^2}{gA^2p_1^2} \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) + bT \frac{(p_1^2 - p_2^2)}{2p_1^2} \dots (50)$$

или

$$Q = GbT/p_1 = Au_1 = A \sqrt{\frac{gRT(p_1^2 - p_2^2)/2Mp_1^2}{\left[\frac{fL}{2m} + \ln \frac{p_1}{p_2} \right]}} \dots (51)$$

Для труб длиною по крайней мере в 200 диаметров $\ln(p_1/p_2)$ может быть не принят во внимание по сравнению с $fL/2m$ независимо от поперечного сечения:

$$u_1 = \sqrt{gmRT(p_1^2 - p_2^2)/Mp_1^2fL} \dots (52a)$$

$$Q = uA \dots (52б)$$

$$G = Q/v \dots (52в)$$

$$n = G/M \dots (52г)$$

Для труб длиною по крайней мере в 200 диаметров, если сечение таких труб круглое или квадратное, т.е. $m = d/4$, уравнение (52a) принимает вид:

$$u_1 = \sqrt{gdRT(p_1^2 - p_2^2)/Mp_1^24fL} \dots (53)$$

или, так как

$$n = u_1A/Mv_1,$$

$$n = A \sqrt{gd(p_1^2 - p_2^2)/MRT4fL} \dots (54)$$

Далее, мы имеем $p_1^2 - p_2^2 = (p_1 + p_2)(p_1 - p_2)$, и если p_1 мало отличается от p_2 , то $p_1 + p_2 = 2p_1$. В этих условиях уравнение (53) принимает вид:

$$u_1 = \sqrt{gdRT(p_1 - p_2)/Mp_12fL} = \sqrt{\frac{gd\Delta h}{2fL}} \dots (55)$$

В таком виде оно тождественно с ур. (42), выведенным для тех же условий малого падения давления в трубах круглого и квадратного сечений.

¹ Согласно сказанному на стр. 61, коэффициент трения для данного газа определенной вязкости, протекающего по трубе постоянного сечения, изменяется вместе с произведением ур. Для газов это произведение оказывается величиной постоянной. Для жидкостей как μ , так и ρ неизменны, так как жидкости несжимаемы.

Необходимо отметить, что ур. (42) выведено в предположении, что величина падения давления настолько мала, что оказывается возможным пренебречь разностью квадратов скоростей в двух рассматриваемых сечениях. Приближенное ур. (42) дает преувеличенный результат, по сравнению с точным ур. (53), при чем ошибка составляет 40% при падении давления в 50% и 80% при падении в 100%. В виду того, что коэффициент трения f берется обычно тоже с большим приближением, применение этой формулы является вполне допустимым при падениях давления вплоть до 100%. При больших падениях и в случае труб, длина которых меньше 200 диаметров, необходимо применять более сложную формулу (51). Последняя справедлива для всех случаев изотермического падения давления, при условии, что труба не настолько коротка, что ее можно рассматривать, как простое отверстие в стенке. В последнем случае формула дает совершенно неверные результаты, вследствие того, что в ней не учтены потери при входе и выходе (от сжатия и расширения).

Формула (51) дает наиболее правильные результаты в применении ее к газопроводам с умеренным падением давления; при этом общая величина падения в длинных трубопроводах (передача естественного газа и подобных продуктов) может превышать в несколько раз давление в конечном пункте. Формула (51) упрощается и переходит в (52), если $fL/2m$ достаточно велико по сравнению с $\ln \frac{p_1}{p_2}$. При применении форм. (52) к случаю трубы, длина которой составляет не менее 200 диаметров, ошибка оказывается весьма небольшой. Некоторые авторы пренебрегают величиной логарифма независимо от длины трубы, что является совершенно неправильным. Величина коэффициента трения дана на стр. 61.

IVб. Движение по каналам постоянного поперечного сечения (ламинарное движение)

Уравнения прямолинейного движения паров и газов по каналам разных поперечных сечений даны были в сводке формул [ур. (56), (57), (58)]. Их можно вывести¹ исходя из понятия об абсолютной вязкости, в предположении отсутствия движения частиц газа, прилегающих к стенкам канала.

V. Критическая скорость

Ее величину нетрудно определить, приравнявая выражения для Δp в случае вихревого и прямолинейного движения к движению при критической скорости.

Для круглых труб ур. (38) = ур. (56), а именно,

$$\Delta p_c = \frac{2f_c \rho u_c^3}{gd} = \frac{32\mu Lu_c}{gd^3},$$

откуда

$$u_c = \frac{16\mu}{f_c \rho d} \dots \dots \dots (59)$$

Для кольцевых каналов ур. (38) = ур. (57), а именно:

$$\Delta p_c = \frac{f_c \rho Lu_c^3}{g(r_2 - r_1)} = \frac{8\mu Lu_c}{g \left[r_2^3 + r_1^3 - \frac{r_2^3 - r_1^3}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \right]}$$

откуда

$$u_c = \frac{8\mu(r_2 - r_1)}{f_c \rho \left[r_2^3 + r_1^3 - \frac{r_2^3 - r_1^3}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \right]} \dots \dots \dots (60)$$

¹ См. *Lamb „Hydrodynamics“, Camb. Univ. Press, 4 изд. (1916).*

Для каналов между полками в сушилах ур. (38) = (58), а именно:

$$\Delta p_c = \frac{f_c \rho L u_c^3}{g a} = \frac{12 \mu L u_c}{g a^2},$$

откуда

$$u_c = \frac{12 \mu}{f_c \rho a} \dots \dots \dots (61)$$

Б. Вывод уравнений для воды

1. Диафрагма

Для изотермического движения

$$x_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2g} = x_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2g} \dots \dots \dots (26)$$

Вводя коэффициент истечения (по тем же соображениям, что и на стр. 76), получаем для горизонтальных труб (или с дифференциальным манометром) то же выражение, что и для газов:

$$\sqrt{u_2^2 - u_1^2} = c \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_2)}{\rho_2}} = c \sqrt{2g\Delta h} \dots \dots \dots (19)$$

Если камеры при диафрагме достаточно больших размеров, то величиной u_1^2 можно пренебречь по сравнению с u_2^2 ; в таком случае:

$$u_2 = c \sqrt{2g\Delta h}.$$

Оба эти уравнения справедливы при любом падении давления.

II. Прибор Вензури

Формула выводится так же, как и для диафрагмы, но здесь скоростью u_1 пренебрегать нельзя, так как установка больших камер для этого прибора обычно не практикуется.

III. Трубка Пито

Особого вывода формулы здесь не требуется. Отверстие трубки измеряет статический и скоростной напор, при чем при одновременном измерении статического напора скоростной определяется как разность; он представляет собой

$$u_{ac}^2 / 2g.$$

IV. Движение по каналам постоянного сечения

Вихревое движение. Для изотермического движения

$$x_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2g} = x_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2g} \dots \dots \dots (26)$$

При условии постоянства поперечного сечения, $u_1 = u_2$; согласно сказанному на стр. 79, потеря от трения F равняется $fLu^2/2gm$; для горизонтальных труб $x_1 = x_2$. В этих условиях [ур. (26)] принимает тот же вид, что и для газов, а именно:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{fLu^2}{2gm} = \Delta h \dots \dots \dots (38)$$

Это справедливо при любом падении давления.

Режим параллельных струй. Уравнения прямолинейного движения воды можно вывести, исходя из понятия об абсолютной вязкости, в предположении отсутствия движения частиц воды, прилегающих к стенкам канала.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

На стр. 80 было показано, что падение давления в канале выражается формулой $\Delta p = f \rho L u^2 / 2 g m$. При этом форма поперечного сечения канала является безразличной. Однако значения f , приведенные на стр. 61, относятся только к прямым трубам круглого сечения, и возможность их применения в случае труб других правильных сечений (с эквивалентным гидравлическим радиусом) требует дополнительной проверки. Поэтому, если поперечное сечение трубы имеет неправильную форму, то формулы сильно усложняются, и их вывод не может быть произведен с помощью ранее изложенных методов. Для решения этого вопроса можно воспользоваться принципом, положенным в основу рис. 27 и рассмотренным на стр. 60—61.¹

Предыдущее уравнение можно представить в следующем виде:

$\Delta p = \varphi \rho u^2 \cdot \frac{L}{m}$, где, согласно изложенному на стр. 60—61, φ есть функция многих отношений, не имеющих размерности, но влияющих на результат. Наиболее важной из них оказывается отношение Du/s , где D является уже не диаметром, а характеризует линейные размеры установки. Желая определить общую величину падения давления в данной сложной аппаратуре, можно воспроизвести эту установку в небольшом масштабе в виде модели и испытать эту последнюю. Если размеры модели точно пропорциональны размерам самой установки, то величина L/m в предыдущем уравнении оказывается одинаковой как для модели, так и для оригинала. Определив φ модели, легко подсчитаем величину падения давления в установке. Итак, если использовать модель в таких условиях, чтобы отношение Du/s было одинаково для модели и установки, то и φ будет иметь одну и ту же величину, которую находят при испытании модели. Испытание модели с одной и той же жидкостью или газом при одинаковой температуре и давлении обеспечивает неизменность отношения s/z . Остается выполнить условие неизменности Du . Для этого необходимо при испытании модели, линейные размеры которой, например, в десять раз меньше натуральной величины, увеличивать скорость жидкости точно в десять раз в сравнении с той которая предполагается в самой установке. Чтобы избежать чрезмерно больших скоростей, можно применить для опыта более плотную или менее вязкую жидкость.

Часто представляется весьма важным проследить путь газа (или жидкости) в данных приборах. Это можно сделать, впуская в поток газа отдельные струйки дыма или, в случае жидкости, вводя в нее окрашенные растворы.

Этот метод испытания особенно полезен при разработке сушил, насадочных башен, установок для осаждения, печей и т. п. устройств. Для целей проектирования следует модели строить так, чтобы конфигурацию их и положение поверхностей, омываемых жидкостью, можно было бы в известных пределах легко изменить, находя опытным путем наивыгоднейшие комбинации.

ГЛАВА IV

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Введение. Все химические реакции неизбежно сопровождаются характерными тепловыми явлениями. Поэтому при решении всякой химико-технической проблемы необходимо принимать во внимание условия перехода тепла от одной среды к другой.

¹ Подробнее об этом см. *A. H. Gibson* в журнале *Engineering London*, 117, 1924, стр. 325 и далее. Этот метод требует особого внимания при исследовании всех определяющих факторов, а также знания пределов, в которых эти последние могут изменяться.

Даже те процессы, которые идут в действительности без каких-либо химических превращений, обычно возбуждают вопросы, касающиеся теплопередачи. Следовательно, законы, управляющие прохождением тепла через тело и от одной среды к другой, имеют громадное значение.

В дальнейшем изложении мы ограничиваемся однородными статическими условиями теплового потока, т. е. условиями, при которых постоянное количество тепла проходит в единицу времени через каждое сечение пути и, следовательно, когда во всех точках системы температура остается неизменною. В отношении других случаев читатель найдет указания на стр. 130.

Так, в холодильнике, в котором воздух и вода протекают в противоположных направлениях, разность температуры воздуха и воды может быть очень велика у горячего конца и очень мала у холодного конца, но во всякой определенной точке аппарата температуры и, следовательно, разность температур имеют все время одну и ту же величину.

Это положение касается не только противоточного холодильника, но имеет место также во всяком непрерывном процессе, лишь только работа аппарата налажена. Даже за период времени налаживания работы аппарата температуры изменяются так медленно, что их можно считать за небольшой период времени постоянными. С другой стороны, если бы температура теплого воздуха, входящего в холодильник, со временем сильно изменялась, то вполне ясно, что температура во всех точках аппарата менялась бы в зависимости от температуры входящего воздуха, и, таким образом, одни и те же уравнения стационарного потока не нашли бы себе применения во весь период времени. Но если этот период разделить на интервалы, в которые входящее тепло практически остается неизменным, то эти уравнения остаются в силе.

В большинстве случаев, имеющих практическое значение, во всех точках аппарата температуры можно считать постоянными, если аппарат нормально работает.

СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА

Передача тепла в технике осуществляется посредством теплопроводности, конвекции и лучеиспускания.

1. *Теплопроводность* есть передача тепла одной частью тела другой части того же тела или же от одного тела другому, физически находящемуся с ним в контакте, без заметного перемещения частиц тела.

2. *Конвекция* есть перемещение тепла из одного места в другое в самом веществе (газе или жидкости) через смешивание одной части вещества с другой.

3. *Лучеиспускание* есть отдаче тепла нагретым телам в форме лучистой энергии. При встрече с другим телом часть лучей отражается, другая же часть, если это тело прозрачно или проницаемо, передается дальше. Остальная энергия поглощается и количественно превращается в тепло.¹

1. Теплопроводность

В технической практике вопрос о проводимости тепла в каком-либо однородном теле возникает сравнительно редко. В громадном большинстве случаев тепло переходит из какой-нибудь среды в какую-либо задерживающую тепло стенку, сквозь которую оно переходит в другую среду.

Прохождение чрез каждую среду составляет лишь один этап в процессе более сложном, и тепловое сопротивление отдельной задерживающей стенки является лишь слагаемым в целом ряде сопротивлений.

¹ Исключая те случаи, сравнительно редкие, когда идут фотохимические реакции, или же энергия поглощается другими специальными путями.

Необходимость основательно разобраться в механизме каждого этапа вполне очевидна, но мы сумеем правильно применить эти знания к практическим задачам только в том случае, если будем тщательно изучать и оценивать характер и сравнительное значение каждого слагаемого в суммарном термическом сопротивлении.

А. Теплопроводность в однородных твердых телах

Закон Ньютона. Явления теплопередачи в твердых телах вполне изучены, они выражаются количественно законом Ньютона: количество тепла dQ , проходящее через данное сечение под прямым углом к направлению теплового потока, прямо пропорционально площади этого сечения A , разности температур между двумя гранями этого сечения dt , времени $d\theta$ и обратно пропорционально толщине dL . Коэффициент пропорциональности k называется коэффициентом теплопроводности данного вещества.

Математически закон этот выражается уравнением.

$$dQ/d\theta = -kA \cdot dt/dL \dots \dots \dots (1)$$

Как сказано выше, все это касается только тех случаев,¹ в которых через каждое сечение в единицу времени проходит постоянное количество тепла, так что

$$dQ/d\theta = Q/\theta \dots \dots \dots (2)$$

оказывается постоянным и выражается через б. кал. в час. Таким образом уравнение (1) для всех рассматриваемых здесь случаев превращается в

$$Q/\theta = -kAdt/dL \dots \dots \dots (3)$$

В метрической системе k выражается как б. калория в час на 1 м^2 поперечного сечения и при 1 м толщины на 1°Ц , т. е. $k = \text{б. кал./м}^2\text{час } 1^\circ\text{Ц}$.

Для понимания английской технической литературы полезно заметить, что в английской системе k выражается как В. Т. И. в час на кв. фут поперечного сечения пути при разности температур в 1°F на 1 фут длины пути.²

Коэффициент теплопроводности далеко не одинаков для различных веществ, как показано на стр. 125—127. Для всякого данного вещества, величина k представляет собой лишь функцию температуры. Для большинства случаев, исследованных до настоящего времени, соотношение между коэффициентом k и температурой выражается линейной функцией на значительном интервале температуры, так что $k_t = k_0(1 + \alpha t)$, где k_t — величина коэффициента при $t^\circ\text{Ц}$, k_0 — при 0°Ц , α — температурный коэффициент.

Например, по данным Нуссельта³ для обожженной инфузорной земли (плотности 200 кг/м^3) $k = 0,06(1 + 0,0021 t)$. Поэтому при 535° , для этого вещества k равно $0,06(1,045 + 0,00252 \cdot 535) = 0,144$. Следует заметить, что для этого изолирующего вещества температурный коэффициент имеет положительный знак, т. е. k повышается сообразно с температурой. Это свойственно всему классу изолирующих веществ за немногими исключениями. Рис. 46 (стр. 127) показывает возрастание с температурой коэффициента k для изоляционных кирпичей. С другой стороны, проводимость таких хороших проводников, как металлы, обыкновенно уменьшается с температурой. Лоренц⁴ для свинца нашел $k = 30,3(0,985 - 0,00075 t)$. Исключениями из этого правила являются медь и алюминий.

¹ См. стр. 130.

² В этих определениях слова „при“ и „на“ не означают действие деления, а только указывают принятие единицы измерения.

³ Zeit. Ver. Deut. Ing. 52, 1008 (1908).

⁴ Wied. Ann., 13; 422, 582; 1881.

Изменения k с изменением температуры как для изоляторов, так и для хороших проводников бывают в большинстве случаев настолько незначительны, что можно среднюю величину теплопроводности принимать за постоянную при интегрировании дифференциального уравнения (3), выражающего закон Ньютона.

Когда же температурные границы слишком велики, введение k , как функции температуры, дает при интегрировании точную величину передаваемого тепла. Однако данные о проводимости настолько неточны, что в обычной работе введение температурного коэффициента является излишней тонкостью, если данный образец не был специально исследован.

Для неоднократно встречающихся на практике случаев, интегрирование уравнения Ньютона может быть обойдено применением интегрированной его формы для некоторых общих условий. Ниже будут рассмотрены четыре таких случая, причем большинство возникающих в технической практике задач совпадает с первыми двумя из них.

В этих четырех случаях единственной переменной величиной является площадь, которая, как будет видно, имеет несколько средних значений в зависимости от обстоятельств.

Случай I. Поперечное сечение проводника постоянно (пример — плоские стенки и хорошо изолированные печные электроды)

Для потока тепла вдоль какого-либо проводника постоянного сечения с неизменной температурой у концов этого проводника имеем уравнение:

$$Q/\theta = -kAdt/dL \dots \dots \dots (3)$$

Интегрирование уравнения (3) в промежутке L_1, L_2, t_1 и t_2 дает:

$$\frac{Q}{\theta} = \frac{kA(t_1 - t_2)}{L_2 - L_1} = \frac{kA \Delta t}{L} \dots \dots \dots (4)$$

В уравнении (4) ради удобства разность температур $t_1 - t_2$ заменена Δt , и толщина $L_2 - L_1$ заменена L . Ур. (4) показывает, что скорость передачи тепла в кал. в час прямо пропорциональна коэффициенту теплопроводности k , соответствующему данному веществу, площади поперечного сечения пути в m^2 и разности температур в $^{\circ}C$ между двумя точками, от которой и к которой течет тепло, и обратно пропорциональна длине пути в m .

Пример 1. Вычислить потерю тепла через 25 см стену (кирпич на известковом растворе) вышиной в 3 м и шириной в 2 м ($k = 0,6$), при внутренней и наружной температуре, соответственно равной $165^{\circ}C$ и $55^{\circ}C$.

Решение. По уравнению (4) имеем

$$\frac{Q}{\theta} = \frac{k \cdot A \cdot \Delta t}{L} = \frac{0,6 \cdot 6 \cdot 110}{0,25} = 1\,580 \text{ б. кал./час.}$$

При определении потери тепла в данной установке, надо иметь в виду, что температуры поверхностей зависят от других условий, кроме проводимости (см. стр. 112 и след.)

Пример 2. Вычислить в киловаттах потерю производительности, обусловленную потоком тепла по хорошо изолированному электроду — графиту (среднее $k = 90$), диаметром в 15 см, при чем температура для 2 точек, внутри и вне, удаленных друг от друга на 60 см, равняется $1100^{\circ}C$ и $250^{\circ}C$.

Решение: из уравнения (4) имеем:

$$\frac{Q}{\theta} = \frac{k \cdot A \cdot \Delta t}{L} = \frac{90 \cdot 0,0176 \cdot 850}{0,60} = 2\,240 \text{ б. кал./час.}$$

Б. кал. можно перевести в киловатты, пользуясь известными переводными множителями:

$$N = \frac{2\,240}{860} = 2,6 \text{ kW.}$$

Уравнение (4) есть простейшая интегральная форма закона Ньютона и часто предлагается, как общее выражение самого закона, предпочтительно перед дифференциальным уравнением (3), из которого оно получается, для рассмотренного сейчас специального случая.

В виду его простоты, уравнение (4) употребляется даже тогда, когда поперечное сечение пути — величина переменная, при чем пользуются средними значениями $A_{\text{ср}}$ площади A . Следующие три случая поэтому превращаются в задачи на получение правильных средних величин этой площади.

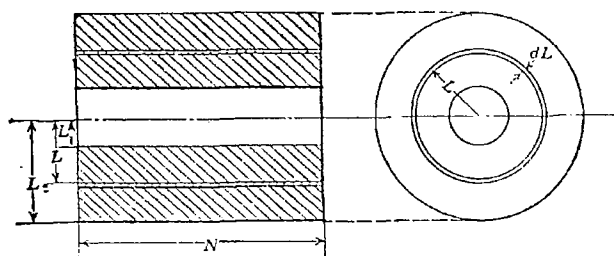


Рис. 32. Чертеж к случаю II. Логарифмическая средняя величина площади.

Случай II. Поперечное сечение пути пропорционально линейным размерам (изолированные трубы)

Там, где тепло проходит сквозь стенки закрытого цилиндрического тела с кольцевым сечением, направление тепла во всех точках радиально и перпендикулярно к оси; при этом поперечное сечение пути

пропорционально расстоянию от центра цилиндра.

Можно показать, что в таких случаях следует пользоваться логарифмической средней величиной площади.

Рассмотрим поток, идущий сквозь сечение толщиной dL (см. рис. 32) на расстоянии L от центра.

По уравнению (3) имеем $Q/\theta = -kA dt/dL$. Поперечное сечение пути $A = bLN$, где N означает длину цилиндра, а b является постоянной, величина которой зависит от поперечного сечения ($b = 2\pi$, если сечение круговое).

Таким образом

$$\frac{dL}{L} = -\frac{kbN\theta dt}{Q} \dots \dots \dots (5)$$

После интегрирования получаем

$$\ln\left(\frac{L_2}{L_1}\right) = \frac{kbN\theta(t_1 - t_2)}{Q} \dots \dots \dots (6)$$

или после преобразования

$$\frac{Q}{\theta} = \frac{kbN(t_1 - t_2)}{\ln\left(\frac{L_2}{L_1}\right)} \dots \dots \dots (7)$$

Как сказано выше, предпочтительно пользоваться упрощенной формой закона Ньютона, уравнением (4), для постоянной площади. При этом, однако, следует принимать среднюю величину площади, т. е. $A_{\text{ср}}$.

Из уравнений (7) и (4) получаем:

$$\frac{Q}{\theta} = \frac{kbN(t_1 - t_2)}{\ln\left(\frac{L_2}{L_1}\right)} = kA_{\text{ср}} \frac{t_1 - t_2}{L_2 - L_1} \dots \dots \dots (8)$$

Откуда:

$$A_{\text{ср}} = \frac{bN(L_2 - L_1)}{\ln\left(\frac{L_2}{L_1}\right)} = \frac{bNL_2 - bNL_1}{\ln\left(\frac{bNL_2}{bNL_1}\right)} \dots \dots \dots (9)$$

$$A_{\text{ср}} = \frac{A_2 - A_1}{\ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right)} = \frac{A_2 - A_1}{2,3 \log_{10}\left(\frac{A_2}{A_1}\right)} \dots \dots \dots (10)$$

Уравнение (10) требует, чтобы средняя величина площади поперечного сечения, через которое в таком случае проходит тепло, вычислялось бы посредством деления разности площадей наружной и внутренней поверх-

ностей на натуральный логарифм их отношений. Получаемое таким способом среднее двух количеств носит название логарифмического среднего и является величиной, которая, как видно будет дальше, часто употребляется в задачах. Уравнение (9) показывает, что A_{cp} можно так же вычислять, как произведение среднего логарифмического радиуса на 2π и на длину трубы в m , вместо того, чтобы брать среднее значение для отдельных величин A_2 и A_1 . В основе этого правила лежит предположение, что от каждой точки тепло идет радиально. В действительности подобное радиальное течение тепла можно наблюдать только в цилиндре с круговым поперечным сечением, и для таких случаев это правило вполне подходит. Для сечений, ограниченных плавными кривыми, это уравнение оказывается только первым приближением, но для прямоугольных форм найдены иные, более точные выражения; они будут указаны при рассмотрении случая IV. Следует заметить, что среднее арифметическое площадей

$$A_{cp} = \frac{A_1 + A_2}{2} \dots \dots \dots (11)$$

дает величину средней площади с ошибкой против логарифмической средней в пределах 4% в том случае, если величина отношения A_1/A_2 не превосходит двух единиц.

Точность эта считается достаточной для задач по теплопередаче.

Средняя логарифмическая величина площади применяется, главным образом, в вычислениях, касающихся теплопередачи в изолированных трубах и в изолированных проволоках, когда внешний диаметр обмотки (изолирующего слоя), по крайней мере, вдвое больше диаметра трубы.

В случае паровых труб, изолированных стандартным слоем магнезии, толщина покрова для линий высокого давления берется равной: ¹ 1) 50 мм для железных или стальных труб, номинальный диаметр которых не превышает 5 см; 2) 65 см слоя для труб с диаметром размером от 5 до 20 см; 3) 75 мм для диаметра, превышающего 20 см. Если сравнить уравнения (10) и (11), то оказывается, что, применяя арифметическую среднюю вместо логарифмической (10), получаем ошибку более 4% исключительно для труб размером до 10 см, при упомянутой изоляции. И, следовательно, для размеров, превышающих 10 см, $A_{cp} = (A_1 + A_2) : 2$, с ошибкой меньше чем 4%. Оптимум толщины покрова можно определить, как толщину, дающую наибольшую чистую экономию, т.е. разницу между стоимостью сохраненного тепла и суммой затрат на изоляцию.

В литературе имеется множество примеров подобных вычислений (см., напр., рис. 33²). Очевидно, оптимум толщины изоляции для данного размера труб варьирует в зависимости от количества тепла и стоимости изоляции.

Пример 3. Вычислить 24-х часовую потерю тепла стальной трубой 30 м длины, диаметром в 25,4 мм, передающей пар под давлением 10 атм. (избыточных), если эта труба обложена изоляцией из магнезии в 50,8 мм. ($k = 0,06$ б. кал./м час m^2 $1^\circ C$). Температура у самой ткани равняется $38^\circ C$.

Решение. Внутренний диаметр трубы равняется 25,4 мм, наружный диаметр — 33,4 мм. Как показано будет на стр. 119, температуру внешней поверхности стальной трубы можно принять без большой погрешности за температуру пара = $180,0^\circ C$. Наружный диаметр изоляции магнезии равен 135,0 мм, а потому логарифмическая средняя площади, согласно уравнению (9), будет:

$$A_{cp} = \frac{30\pi(135,0 - 33,4)}{\ln \frac{135,0}{33,4}} = 6,9 m^2.$$

¹ Marks, Mech. Eng. Handbook.

² McMillan, Trans. A. S. M. E., 37, 961 (1915).

Примечание. Логарифмическая средняя площади взята взамен арифметической, так как отношение диаметров больше, чем 2 к 1.
Согласно уравнению (4),

$$Q = \frac{\Theta \cdot k \cdot A \cdot \Delta t}{L} = \frac{24 \cdot 0,06 \cdot 6,9 \cdot 142}{0,0508} = 27\,800 \text{ б. кал.}$$

Так как скрытая теплота конденсации пара этого давления равна 482,6 б. кал. на кг, то искомая потеря тепла эквивалентна $27\,800/482,6 = 57,6$ кг пара в 24 часа, или

$$\frac{27\,800}{860 \cdot 24} = 0,35 \text{ kW.}$$

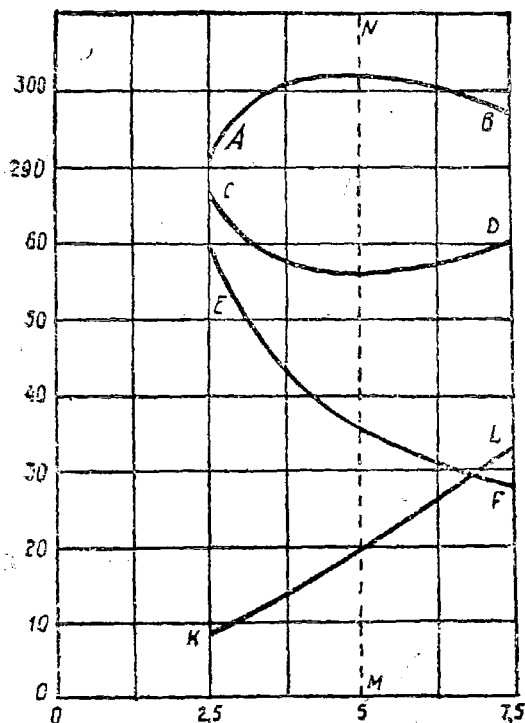


Рис. 33. Определение оптимальной толщины изоляции труб. Абс.—Толщина изоляции в дюймах. Орд.—Стоимость в долларах в год. CD—общая стоимость. АВ—полученная экономия. NM—оптимальная толщина. KL—стоимость изоляции в долларах. EF—тепловые потери.

Возможен случай, когда потеря тепла растет гораздо скорее, чем уменьшается толщина изоляции (см. рис. 34). Однако это может иметь место только при специальных условиях, например, в случае недостаточной толщины изоляции и небольшого размера трубы. Наибольшая потеря бывает тогда, когда наружный диаметр (d в м) изоля-

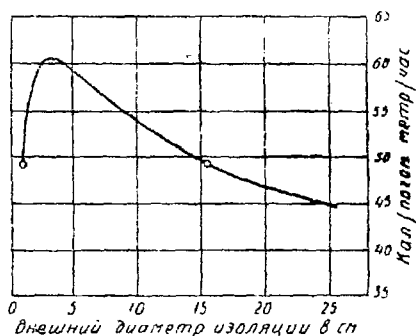


Рис. 34. Диаграмма потерь тепла трубой небольшого диаметра в зависимости от толщины изоляции. Абс.—Внешний диаметр изоляции в см. Орд.—Б. кал. на пог. м в час. Температура трубы 120°C и воздуха 20°C .

ции вдвое больше, чем коэффициент теплопроводности изоляции, разделенный на полный коэффициент¹ теплопередачи изоляции трубы,² т. е.

$$d = \frac{2k}{h_c + h_r} \quad \dots \dots \dots (12)$$

¹ Величины этого коэффициента $h_c + h_r$ даны на стр. 119

² Это можно доказать так: для того, чтобы потеря тепла с наружной поверхности A_2 обложенной изоляцией трубы радиуса r была бы максимальной, необходимо, чтобы все сопротивление R изолированной трубы было бы минимумом. Так как

$$R = \frac{L}{K \cdot A_{cp}} + \frac{1}{(h_c + h_r) A_2}, \text{ где}$$

$$A_1 = 2\pi N r, \quad L = r - r_1 \text{ и } A_{op} = (\text{уравн. 9}) = \frac{2\pi N (r - r_1)}{\ln \frac{r}{r_1}},$$

то, подставляя эти величины и приравнявая производную $\frac{dR}{dr}$ нулю, получаем ур. (12).

Например, на рис. 34 ординаты показывают вычисленную потерю тепла в б. кал. в час с пог. м трубы с наружным диаметром¹ 15 мм, а абсциссы — соответствующий диаметр изоляции. Из графика видно, что потеря тепла для такой изолированной трубы при $k_{\text{изоляция}} = 0,25$, как, напр., плотный асбест, больше потери тепла неизолированной трубы и не спускается до потери тепла этой последней, пока наружный диаметр не будет равен 15 см. Наибольшая потеря на 27% превышает потерю трубы, не покрытой выбранной изоляцией, и имеет место, когда $d = 4,1$ см.

Этим фактом пользуется инженер-электротехник при изолировании проводов, имея в виду соединенное действие электрической изоляции и усиленного охлаждения на перегруженном проводе.

Случай III. Поперечное сечение пути пропорционально квадрату линейных размеров

Примечание. Настоящий случай разбирается только для большей полноты изложения: должно быть ясно, что пользоваться выведенным для данного случая уравнением ни в каких практических расчетах не приходится.

Рассмотрим случай любого закрытого твердого тела, через которое проходит тепло изнутри наружу или обратно по радиусам всех направлений. Если твердое вещество заключено в концентрические сферы с радиусом равным L , то поверхность, через которую протекает тепло, представляет собой сферу, именно:

$$A = bL^2, \dots \dots \dots (13)$$

при чем b для сферы $= 4\pi$.

Если подставить эту величину в общее дифференциальное уравнение, то уравн. (3) примет вид

$$\frac{Q}{\theta} = - \frac{kbL^2 dt}{dL} \dots \dots \dots (14)$$

Интегрируя в пределах L_1, t_1 и L_2, t_2 имеем:

$$\frac{Q}{\theta} = kbL_1L_2 \frac{t_1 - t_2}{L_2 - L_1} \dots \dots \dots (15)$$

Если требуется, как и раньше, вычислить поток тепла, принимая за среднюю площадь величину $A_{\text{ср}}$, то можно взять уравнения (15) и (4):

$$\frac{Q}{\theta} = kbL_1L_2 \frac{t_1 - t_2}{L_2 - L_1} k = A_{\text{ср}} \frac{t_1 - t_2}{L_2 - L_1} \dots \dots \dots (16)$$

Следовательно,

$$A_{\text{ср}} = bL_1L_2 = \sqrt{b^2L_1^2L_2^2} = \sqrt{bL_1^2bL_2^2} \dots \dots \dots (17)$$

$$A_{\text{ср}} = \sqrt{A_1A_2} \dots \dots \dots (18)$$

Итак, в том случае, когда поверхность поперечного сечения пропорциональна квадрату линейного размера, средней площадью является, при вычислениях теплового потока, геометрическое среднее поверхностей — внутренней и наружной, как и показывает уравн. (18). Хотя уравнение строго верно только в отношении шаровых поверхностей, им приближенно можно пользоваться для всякой формы тела, три измерения которого не очень различны.

У теплового потока, идущего через пустые кубы, как, например, кубические печи, площадь поперечного сечения пропорциональна квадрату линейного измерения; но не к всей поверхности тепло идет под прямым углом. И потому площадь сечения теплового потока, выражаемая через геометрическое среднее поверхностей $\sqrt{A_1A_2}$, в отношении куба была бы чересчур велика. Прохождение тепла через кубы и еще чаще через прямоугольные тела, у которых стенки довольно толсты по сравнению с емкостью, рассмотрено в этой главе отдельно.

К коксовым печам обычной (прямоугольной) конфигурации подходит теоретически геометрическое среднее; арифметическое же среднее всего одним процентом меньше геометрического. Там, где наружный диаметр вдвое больше внутреннего, арифметическое среднее поверхностей — внутренней и наружной — было бы на 25% выше, но такие случаи в промышленной практике не встречаются. Следует заметить, что величины как логарифмического, так и геометрического среднего всегда бывают ниже, чем среднее арифметическое.

Случай IV. Прямоугольные тела со стенками толщиной не меньше половины наименьшего внутреннего размера

¹ Температура труб берется на 100° выше температуры помещения.

Этот случай очень важен для расчета потери тепла в электрических печах, имеющих часто очень толстые стенки. Однако, если только читатель не особенно заинтересован в устройстве электрической печи, случай этот он может оставить без внимания.

Если за поверхность в уравн. (4) (стр. 87) принимать внутреннюю поверхность, такое выражение потери тепла будет несколько низко. С другой стороны, если пользоваться наружной поверхностью или даже суммой поверхностей — внутренней и наружной, деленной пополам (среднее арифметическое), то вычисленная потеря тепла будет слишком высока. Тепло подходит ко всей внутренней поверхности, не только под прямым, но и под различными углами и течет через края и углы наружных стен в атмосферу. Для подобных случаев интегрирование основного дифференциального уравнения (3)

$$\frac{Q}{\theta} = k A \cdot \frac{dt}{dL}$$

становится затруднительным, а иногда просто невозможным. Лангмюр¹ эмпирически обосновал приводимые ниже уравнения² для приближенного определения средней площади A_{cp} , которую следует вводить в интегральную форму только что приведенного закона Ньютона.

Рассматривая далее только тела, ограниченные прямоугольниками при параллельности внутренней и наружной поверхностей и во всех случаях находящиеся на одинаковом друг от друга расстоянии L , приводим пять случаев. Полагаем, что уяснение их поможет читателю разобраться в любых подобных условиях, могущих встретиться у него на практике.

Случай IVa. Длины всех внутренних кромок составляют от 0,2 до 2 L (толщина) стенок

Пусть общая сумма длин всех внутренних кромок (ребер) = Σe . К действительной внутренней площади следует прибавить тогда 0,54 $L \Sigma e$ для учета размеров внешних ребер и 0,15 L^2 на каждый из восьми углов, при чем сумма эта будет так называемой средней площадью A_{cp}

$$A_{cp} = A_1 + 0,54 L \Sigma e + 1,2 L^2 \dots \dots \dots (19)$$

Случай IVб. Длина одного внутреннего ребра менее 0,2 толщины L стенок.

В этом случае, при определении Σe длинами четырех внутренних ребер меньших 0,2 L можно пренебречь. Поэтому

$$A_{cp} = A_1 + 0,465 L \Sigma e + 0,35 L^2 \dots \dots \dots (20)$$

в котором Σe есть общая сумма всех оставшихся восьми внутренних ребер, из коих каждое больше 0,2 L .

Случай IVв. Из внутренних ребер 2 имеют каждое в отдельности длину меньше 0,2 толщины стенок.

Тут два коротких ребра не имеют значения, и рассматриваемое тело можно считать эквивалентным прямой длиной в L , при чем E является наибольшим внутренним измерением

$$A_{cp} = \frac{2,78 E L}{\log_{10} \left(\frac{A_2}{A_1} \right)} \dots \dots \dots (21)$$

Случай IVг. Все три внутренних измерения меньше 0,2 толщины стенок

Пользуясь теми же обозначениями, имеем:

$$A_{cp} = 0,79 \sqrt{A_1 A_2} \dots \dots \dots (22)^3$$

¹ Langmuir, Adams and Meikle, Trans. Amer. Electrochem. Soc. 24, 53 (1913). Форма уравнений определялась тщательным анализом влияющих факторов, а коэффициенты были установлены при помощи конструирования моделей изучаемых тел или симметричных частей этих тел, при чем внутренняя и наружная поверхности этих моделей были из медных пластинок, служивших в качестве электродов для раствора сульфата меди известной концентрации и проводимости. Самые стенки были стеклянные. Сопоставление проводимости этой камеры с камерой постоянного поперечного сечения, содержащей тот же раствор, сразу же дает требуемый результат.

² Данные ниже эмпирические множители близки к полученным Лангмюром с помощью тщательного теоретического анализа.

³ Формула эта дает величину поверхности на 21% меньше обыкновенной средней геометрической поверхности (ур. 18).

Случай IV. Стенки неодинаковой толщины

Если печь имеет стенки неодинаковой толщины, то для получения общей потери тепла должно сложить вместе потери тепла каждой отдельной стенкой, т. е. $A_{\text{ср}}$ следует брать отдельно для каждой стены и подставлять в уравнение (4). Таким образом поправки на ребра будут введены дважды, а на углы — трижды. Потому в этом случае уравнение (19) будет иметь вид: $A_{\text{ср}} = A_1 + 0,27 L_{\Sigma} + 0,4 L$,² уравнение (20): $A_{\text{ср}} = A_1 + 0,233 L_{\Sigma} + 0,12 L$,².

Следовательно, вся потеря тепла для печи равняется $\Sigma Q/\theta$, т. е. сумме потерь тепла от отдельных стенок.

Б. Теплопроводность в жидкостях и газах

Все проводники тепла — как жидкости, так и газы, следуют тем же законам, что и твердые тела, только значения коэффициента k для них очень малы.¹ Например, при комнатной температуре для покоящейся воды k в б. кал./м/час./°Ц равно 0,52, а для покоящегося воздуха 0,021, в то время как для стали и огнеупорного кирпича оно в тех же единицах равно соответственно 57,0 и 0,4. Трудно, а в условиях машиностроительного дела и совсем невозможно, устранить в жидкостях и газах влияние конвекции, т. е. передачу тепла движением самой среды, а потому теплопередача в жидкостях и газах теплопроводностью в покоящейся части этой среды сопровождается одновременным переносом тепла конвекцией в движущейся ее части. Такой соединенный эффект будет рассмотрен ниже в главе о поверхностных пленках.

В. Понятие о потенциале и теплопередаче ряда твердых прослоек

Большинство превращений как вещества, так и энергии можно рассматривать как происходящие под влиянием двух факторов: потенциала и сопротивления.

Получающийся общий эффект обычно пропорционален частному от деления этих двух факторов. Ясно, что так как направление превращения зависит от потенциала, то состояние равновесия обусловлено разностью потенциалов, равной нулю.

А так как, кроме того, скорость превращения имеет для инженера первостепенное значение, давая возможность определить производственную мощность каждой отдельной машины, т. е. количество продукции, которое можно получить в единицу времени, то обстоятельство, что скорость эта зависит от потенциала, еще более увеличивает и без того большую важность этого понятия.

Частное приложение понятия о потенциале мы имеем в электричестве. Электрический ток возникает только при наличии разности потенциалов, при чем направление потока обусловлено знаком этой разности, а скорость его, т. е. сила тока, пропорциональна этой разности.

Другой пример потенциала мы имеем в теплоте. Тепло не переходит от одного тела к другому (от одной точки к другой), если не имеется разницы в температурах этих тел или точек. Направление, по которому течет тепло, зависит от знака разности температур, а скорость распространения тепла пропорциональна величине этой разности.

Случай I. Теплопередача через сложную стенку. Когда тепло переходит подряд через несколько тел, то удобнее всего бывает пользоваться понятием потенциала. Если мы имеем ряд электрических сопротивлений, то скорость потока выражается в амперах (J) или кулонах в секунду и зависит от электродвижущей силы (разности вольтажа) Δv , деленной на сумму сопротивлений R , выраженной в омах.

¹ См. стр. 125—127.

$R = r_1 + r_2 + \dots + r_n =$ сумме всех отдельных сопротивлений. Далее, r пропорционально длине проводника L и обратно пропорционально поперечному сечению A проводника и его удельной электропроводности k , т. е. $r = L/kA$.

Таким образом основное в учении об электричестве уравнение, выражающее закон Ома, будет иметь вид:

$$J = \frac{\Delta v}{R} = \frac{\Delta v_1 + \Delta v_2 + \dots + \Delta v_n}{r_1 + r_2 + \dots + r_n} =$$

$$= \frac{\Delta v}{\frac{L_1}{k_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2} + \dots + \frac{L_n}{k_n A_n}} = \frac{\text{кулоны}}{\text{секунды}} \dots \dots \dots (23)$$

По аналогии мы имеем для потока тепла:

$$\frac{Q}{\theta} = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n}{r_1 + r_2 + \dots + r_n} =$$

$$= \frac{\Delta t}{\frac{L_1}{k_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2} + \dots + \frac{L_n}{k_n A_n}} = \frac{\text{б. кал.}}{\text{часы}} \dots \dots \dots (24)$$

Таким образом мы видим, что разность температур заняла место разности вольтажа; вместо кулонов, деленных на секунды, мы имеем б. кал. и часы, но выражение для сопротивлений в обоих случаях одно и то же.

Пример 4. Стена печи в плоском сечении состоит внутри из слоя карборундового кирпича толщиной 11,4 см ($k = 8,4$), затем из слоя огнеупорного кирпича в 22,8 см ($k = 1,5$) и, наконец, снаружи, из слоя шлаковой ваты толщиной в 5,08 см ($k = 0,052$). Все значения k выражены в б. кал./м/час. /°Ц. Температура внутренней поверхности стенки 1100° Ц, а наружной 93° Ц.

а) Какова потеря тепла в час на м² поверхности стенки?

б) Каковы температуры (в ° Ц) на границе каждого двух слоев?

Решение. Часть а)

Подставляя в уравнение (24) наши данные, получаем для 1 м²

$$\frac{1100 - 93}{\frac{0,114}{8,4} + \frac{0,228}{1,5} + \frac{0,0508}{0,052}} = 880 \text{ б. кал./м}^2$$

Решение. Часть б)

Так как одно и то же количество тепла последовательно протекает через все упомянутые материалы, то

$$Q/\theta = \Delta t/r = \Delta t/R = 880 \text{ б. кал./м}^2 \text{ в час,}$$

$$\text{откуда } \Delta t_1 = 880 \cdot \frac{0,114}{8,4} = 12^\circ \text{ Ц.}$$

Температура на границе карборунда и огнеупорного кирпича будет в этом случае 1100 — 12 = 1088° Ц. Равным образом температура в месте соприкосновения огнеупорного кирпича со шлаковой ватой будет 955° Ц.

Пример 4а. Какова будет потеря тепла в предыдущей задаче, если стены будут цилиндрическими, при чем внутренний диаметр равен 91,5 см.

Решение. В этом случае поверхности различных материалов не равны. Внутренний диаметр карборундового слоя равен 91,5 см, а внешний 114,3 см. Так как отношение диаметров менее 2, то ошибка при пользовании средними арифметическими величинами, вместо теоретически более правильных, средних логарифмических, будет очень незначительной. Так как наши вычисления исходили из 1 м² наружного слоя стены, диаметр коего равен 170 см, то средняя величина карборундовой поверхности, через которую идет тепло, может быть принята в $\frac{91,5 + 114,3}{2} \text{ м}^2$. Равным образом, для огнеупорного кирпича средняя величина

поверхности может быть принята в $\frac{104,3 + 22,8}{2} \text{ м}^2$, а для шлаковой ваты в $\frac{160 + 5,08}{2} \text{ м}^2$.

Подставляя в уравнение (24) эти значения, получаем:
 $Q/\theta = 827 \text{ б. кал./м}^2/\text{час.}$ наружной поверхности стены, или 1535 б. кал./м²/час. внутр. поверхн.

Случай II. Параллельные потоки. В электрическом токе, идущем через отдельные сопротивления, включенные параллельно, одна и та же разница вольтажа заставляет ток идти через каждое сопротивление так, как если бы существовало оно одно. В этих случаях принято вычислять силу тока, суммируя обратные величины сопротивлений и умножая полученную сумму на разность вольтажа в двух точках, т. е.

$$J = \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_1} \right) (\Delta v) \dots \dots \dots (25)$$

Для потока тепла мы имеем аналогичное уравнение, которым пользуются вместе с упрощенным уравнением для радиации (см. стр. 118).

Г. Теплопередача от одного твердого тела к другому

Когда тепло проходит чрез поверхность, отделяющую одно твердое тело от другого, то, по всей вероятности, на границе этих тел не имеется падения температуры, как это и было принято в предыдущих численных примерах. Но это допущение предполагает полный контакт между твердыми телами и отсутствие между ними воздуха (или газов) или пустот, пузырей, шероховатостей и т. д., как это легко может случиться, когда складываются друг с другом два твердых тела. Даже только следы плохо проводящего материала между металлами, например, слой окиси на поверхности, вызывают резкие скачки температур. Обыкновенно нет возможности принять во внимание толщину такого тончайшего слоя, а между тем действие его бывает подчас весьма ощутительным. Поэтому, например, для того, чтобы предусмотреть влияние теплопроводности известкового раствора в кирпичных стенах, обыкновенно в лабораториях воспроизводят опытную стенку и определяют потерю тепла в ней. Полученное значение для теплопроводности данной кирпичной кладки заключает в себе тогда и теплопроводность извести.

2. Конвекция

Понятие о пленке. Когда жидкость или газ приходят в соприкосновение с твердым телом, то существуют веские основания предполагать образование на поверхности твердого тела относительно прочного слоя жидкости, делающегося все более тонким, по мере увеличения скорости движения жидкости параллельно поверхности тела и отрывающегося от твердого тела при очень больших скоростях, если только эта пленка вообще отрывается. Через такой тонкий слой — пленку — теплота может передаваться одной лишь теплопроводностью, хотя раз теплота прошла пленку, то более теплые молекулы в соседстве с пленкой подхватываются и механически уносятся вихревым движением главной массы среды, т. е. передача тепла является главным образом следствием конвекции, и в этом случае сопротивлением жидкости можно пренебречь. Так как большинство жидкостей и газов исключительно плохие проводники тепла, то нет ничего удивительного в том, что на границе между твердым телом и средой (а также и между жидкостью и газом) сопротивление потоку теплоты очень велико. Именно в этом месте наблюдается резкое падение температуры.¹ Изменение температуры вблизи границы между твердым телом и средой показано на рисунке 35 (стр. 96).

В самом твердом теле падение температуры $t_2 - t_3$ сравнительно с падением температуры в пограничном слое обычно незначительно. Падение температуры в поверхностном слое $t_3 - t_4$ очень велико, но вне этого слоя температура быстро достигает температуры главной массы среды t_5 .

¹ См. главу II.

При разборе этого чрезвычайно важного случая переноса тепла допущено предположение, что поверхностный слой среды — пленка — обладает определенной, хотя и неизвестной толщиной и что поэтому количество тепла, передаваемого в единицу времени, может быть выражено уравнением:

$$\frac{Q}{\theta} = hA(t_3 - t_5) = hA \Delta t, \dots \dots \dots (26)$$

где коэффициент h заменяет член k/L в уравнении (4) (стр. 87), в котором k означает коэффициент теплопроводности среды, а L — неизвестная толщина поверхностного слоя. Этот коэффициент h часто называется (в американской и английской литературе) „пленочным“ или „поверхностным“ коэффициентом. В метрических единицах h выражается в б. кал./час/м²/°C температурной разницы. В отличие от k — ранее рассмотренного удельного „коэффициента теплопроводности“ — „поверхностный коэффициент“ h не содержит элементов толщины.

Из того, что было сказано о механизме передачи тепла, можно сделать вполне естественный вывод, что этот столь важный коэффициент h для

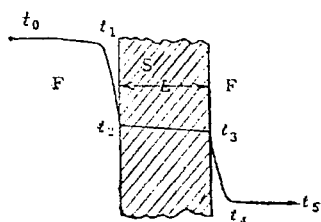


Рис. 35. Схема, иллюстрирующая понятие о пленке. S — твердое тело, F — жидкость.

одной и той же среды не постоянная величина, а сложная функция многих переменных: физических свойств среды, природы и формы твердой поверхности и скорости, с которой среда проходит по границе твердого тела. Во многих важных случаях пока еще невозможно вычислить более или менее точно изменение этого коэффициента под влиянием разных условий; эта задача одна из самых трудных, с которыми приходится инженеру встречаться на практике, и самых важных, потому что сопротивление потоку тепла через такие пограничные пленки обыкновенно бы-

вает наиболее значительным и главным условием передачи тепла. Все исследования, направленные к уменьшению пограничного сопротивления между средой и твердым телом, установили, что наиболее действительным средством является уменьшение толщины слоя — пленки. Таким образом очень быстрое движение, с которым жидкость или газ проходят вдоль поверхности стенки, может значительно уменьшить это сопротивление, срывая частично этот слой. В важном специальном случае передачи тепла в кипящую жидкость образование и выделение пузырьков на нагревательной поверхности, равно как и конвекционные токи в самой жидкости, очень способствуют уменьшению и разрывам этого поверхностного слоя, так что оказалось возможным определить, что поверхностный коэффициент в кипящей жидкости в шесть раз больше, чем таковой в той же жидкости при температуре ниже точки кипения. С другой стороны, когда разница температур между поверхностью тела и кипящей массой жидкости невелика, делается возможным образование более или менее постоянного слоя пара на нагревательной поверхности, движение которого очень незначительно и который служит как бы изолирующим слоем между твердым телом и жидкостью. При этих условиях коэффициент может быть очень мал, но станет чрезвычайно быстро возрастать с повышением температуры и ускорением движения жидкости, вызванным бурным образованием пузырьков.

Следующее уравнение, составленное на основании понятия о потенциале для тока через ряд проводников, можно приложить к важному случаю двух жидких пленок, разделенных твердой стенкой.

$$\frac{Q}{\theta} = \frac{\Delta t}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{L}{k_2 A_2} + \frac{1}{h_3 A_3}} = \frac{\Delta t}{R} = K A_{cp} \Delta t \dots \dots \dots (27)$$

$$KA_{cp} = \frac{1}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2} + \frac{1}{h_3 A_3}} \dots \dots \dots (28)$$

Здесь K полный коэффициент теплопередачи от более горячей к более холодной среде. За среднюю площадь A_{cp} , по отношению к которой вычисляется этот коэффициент, может быть принята одна из трех отдельных площадей; в целях точности следует предварительно установить это основание расчета.

Для плоских стенок или в случае, если разницей между поверхностями двух пленок стенки можно пренебречь, уравнение (27) принимает вид.

$$\frac{Q}{\theta} = \frac{A \Delta t}{\frac{1}{h_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{1}{h_3}} = KA(\Delta t) \dots \dots \dots (29)$$

Общие замечания о коэффициенте теплопередачи пленки. Рассмотрим случай, когда водяной пар сконденсирован при постоянном давлении на внешней поверхности трубы, через которую течет с данной скоростью охлаждающая вода. Каждое из трех сопротивлений будет иметь при данных условиях определенное значение, обуславливая таким образом величину полного коэффициента K . Если мы теперь удвоим скорость воды, то толщина неподвижного слоя воды на поверхности трубы уменьшится. Опытным путем найдено, что толщина слоя не уменьшается ровно в 2 раза и h_3 , следовательно, не удвоится; вообще коэффициент проводимости h_3 между трубой и водой изменяется, как какая-то дробная степень n от скорости. Два других сопротивления практически останутся без изменения, так что, если попытаться выразить K как функцию от скорости воды, то в результате это сведется к введению этой переменной в иной степени, чем истинное значение n . Хотя в литературе имеется много примеров таких расчетов, и уравнения, предложенные различными авторами, должны бы были дать правильные результаты в случае повторения всех условий опыта, тем не менее для инженера, заинтересованного в получении численного значения K для случая с подобным же процессом, трудно почерпнуть достаточно точные данные из литературных материалов. Это тем более так, когда мы имеем дело с различными комбинациями среды и стенок разного рода. Далее авторы обычно пренебрегают одним или несколькими переменными в своих уравнениях (как, например, вязкость), и потому следует принять во внимание, что зависимость K и введенных ими в уравнения для K переменных искажена колебанием значений переменных, ими упущенных. Так как вязкость очень быстро меняется с температурой, то на практике невозможно получить одни и те же результаты, даже при работе с теми же самыми средами и разъединяющими стенками, если только не соблюдены температурные условия опыта.

Самым простым и логическим выходом из этого положения являются вывод и систематизация уравнений коэффициентов теплопередач различных слоев. Имея в своем распоряжении достоверные данные, проектировщик может вычислить коэффициент пленки для интересующего его случая и пользоваться им при применении уравнения (27).

Когда выяснилось, что полный коэффициент K в важном случае теплопередачи в холодильниках зависит от девяти или более переменных, то стало ясным, что получить на практике точное выражение для K дело безнадежное, если только не прибегнуть к упрощению; а именно: вычислять значение K для каждого специального случая посредством уравнений, в которые входят и h_1 и h_3 , каждое из которых определяется меньшим числом переменных, чем K . Правильность этого положения будет показана на примере некоторых уравнений, приведенных ниже. Следует признать

что наблюдаемые сейчас в технической литературе недостаточность и неточность уравнений, по которым можно было бы вычислять указанные частные коэффициенты h_1 и h_2 , вызваны, во-первых, вошедшим в привычку пренебрежением понятия о сопротивлениях, а, во-вторых, недостаточным количеством работ по собиранию и научному анализу данных, относящихся к различным случаям термических сопротивлений.

Коэффициенты для различных пленок будут рассмотрены в следующем порядке:

А. Жидкая пленка, жидкость некипящая (нагревание и охлаждение)

1. Естественная конвекция
2. Усиленная (искусственно) конвекция
 - а) внутри труб
 - б) вне труб

Б. Жидкая пленка, жидкость кипящая (выпаривание и перегонка)

В. Газовые пленки (нагревание и охлаждение)

1. Естественная конвекция
2. Усиленная конвекция
 - а) внутри труб
 - б) вне труб

Г. Ожижение паров (конденсаторы)

Все данные для коэффициентов h даются в следующих единицах: б. кал. в час на 1°C падения температуры в пленке и на м^2 ее поверхности. Уравнения, исходные данные и обозначения приведены на стр. 122—130. Средние разницы температур рассмотрены на стр. 121—122.

А. Жидкая пленка, жидкость некипящая

1. *Естественная конвекция.* При отсутствии видимого принудительного движения, вызванного в жидкости, соприкасающейся с нагретой поверхностью, какой-либо посторонней силой, мы можем обнаружить в ней, однако, движение, вызываемое естественной конвекцией, т. е. механическими конвекционными токами, вызванными в жидкости разницей плотности ее в различных ее точках. Скорость движения токов варьирует в широких пределах в зависимости от формы сосуда, вязкости жидкости и разности температур. По мере нагревания как разница в температурах, так и вязкость жидкости уменьшаются, а так как эти переменные имеют противоположное влияние, то для пленки значение коэффициента остается почти постоянным в течение всего нагревания. Для воды со свободными потоками для естественной конвекции были найдены средние значения для h от 250 до 1500. Для очень вязких жидкостей, с плохими условиями для конвекции, возможны малые значения h от 50 до 100. Значение K для любого возможного случая, очевидно, зависит от числа и рода сопротивлений.

Стоз (Stose) и Виттемор (Whittemore), исследовавшие нагревание растворов сахара и мелассы различной плотности и вязкости, вывели следующее эмпирическое уравнение для естественной конвекции:

$$h = 245 \sqrt[3]{J \Delta t}, \dots \dots \dots (30)$$

Значения h получались от 300 до 1300. В их опытах Δt —скачок температуры в жидкой пленке менялся от $15,5^\circ\text{C}$ до $53,5^\circ\text{C}$ а J —текучесть раствора¹ по отношению к воде при 20°C от 0,05 до 1,6. Нагревание

¹ Более детальное рассмотрение явлений вязкости и ее обратной величины — текучести см. стр. 56 и сл.

производилось паром, проходившим по медному змеевику, диаметром в 9,5 мм, погруженному в бак, емкостью в 45 л, содержащий столб жидкости, высотой 30 см. Температура внешней стенки трубы измерялась непосредственно термпарой.

2а. Усиленная конвекция внутри трубы. В результате критического обзора¹ соответствующей литературы и теоретического анализа опытного материала найдено, что коэффициент² пленки зависит от теплопроводности k жидкости, внутреннего диаметра D трубы и отношения длины трубы к ее внутреннему диаметру l/r является функцией группы переменных — модууса. Модуус (Dv/z) зависит от трех факторов, а именно от массовой скорости v жидкости (кг на секунду на m^2 поперечного сечения), от диаметра трубы D в м и средней вязкости z пленки жидкости на внутренней стенке трубы. Уравнение Фроста для турбулентного движения воды внутри гладкой трубы имеет вид:

$$\frac{hD}{k} = 8,2 \left(1 + \frac{50}{r}\right) \left(\frac{Dv}{z}\right)^{0,8} \dots \dots \dots (31)$$

где k для воды принято равным 0,52. $\frac{kD}{h}$ называется параметром Нуссельта (Nu) .³

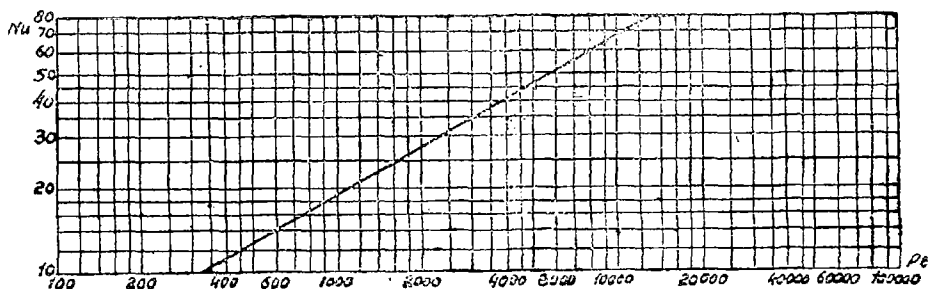


Рис. 36. Коэффициенты теплопередачи через пленки газа при обтекании им пучка труб перпендикулярно к оси.

Абс.—Параметр Пекле (Pe), равный произведению параметра Рейнольдса на параметр Стантона ($Re \cdot St$), где $St = \frac{zc}{k}$. Орд.—Параметр Нуссельта, (Nu) , равный $\frac{hD}{k}$.

При большем количестве данных, входящих в определение постоянных уравнения 31, значение r принималось равным 100; в этом случае

$$h = \frac{220}{D^{0,2}} \left(\frac{u}{z}\right)^{0,8} \dots \dots \dots (32)$$

При тщательной чистке трубы можно получить для h значения больше, чем следует из уравнения 32. Если в трубе накопится много накипи, шлама или каких-либо других отложений, как это часто случается, то следует принимать в расчет термическое сопротивление этих отложений, пользуясь понятием о сопротивлении (стр. 93 и сл.).

¹ McAdams and Frost, Refrigerating Engineering, 10, № 9 (март, 1924).

² Коэффициент пленки найден путем деления наблюдаемой скорости потока тепла через m^2 поверхности пленки на наблюдаемое падение температуры в пленке. Последнее получалось вычитанием падения температуры в стенке трубы из наблюдаемого падения ее от наружной стенки трубы до жидкости, протекавшей в трубе, при чем температура наружной стенки трубы определялась термпарой. Температура пленки получалась вычитанием из температуры внутренней стенки половины средней температурной разницы между температурой внутренней стенки и главной массы жидкости, протекавшей по трубе.

³ При нагревании масел при значениях модууса, меньших критического, повышение средней температурной разницы между трубой и маслом явным образом отражается на повышении h . Это может быть объяснено следующим образом. В случае изотермического потока, т. е. когда температурная разница равна нулю, имеется собственно вязкое (ламинарное) движение, и скорость жидкости не имеет радиальной составляющей, а потому пленка распространяется вдоль трубы (см. главу 2). Но когда жидкость нагревается, температура ее около стены делается выше, чем в центральной области, вызывая при этом изменение вязкости.

Оррок¹ нашел большие расхождения при испытании новых и бывших в употреблении металлических холодильников.

Для накипи в старой трубе найдено,² что $k/L = 9550$, при чем это значение не зависит от скорости воды. Так как частное сопротивление воды, а, следовательно, и полное сопротивление меняются вместе со скоростью воды, то нет разумного основания делать поправку на накипь путем помножения полного коэффициента на коэффициент чистоты. Поэтому сопротивление отложений следует вычислять, исходя из теплопроводности их и вероятной толщины слоя этих посторонних веществ.

Так как данные для турбулентного потока для всех жидкостей дают по

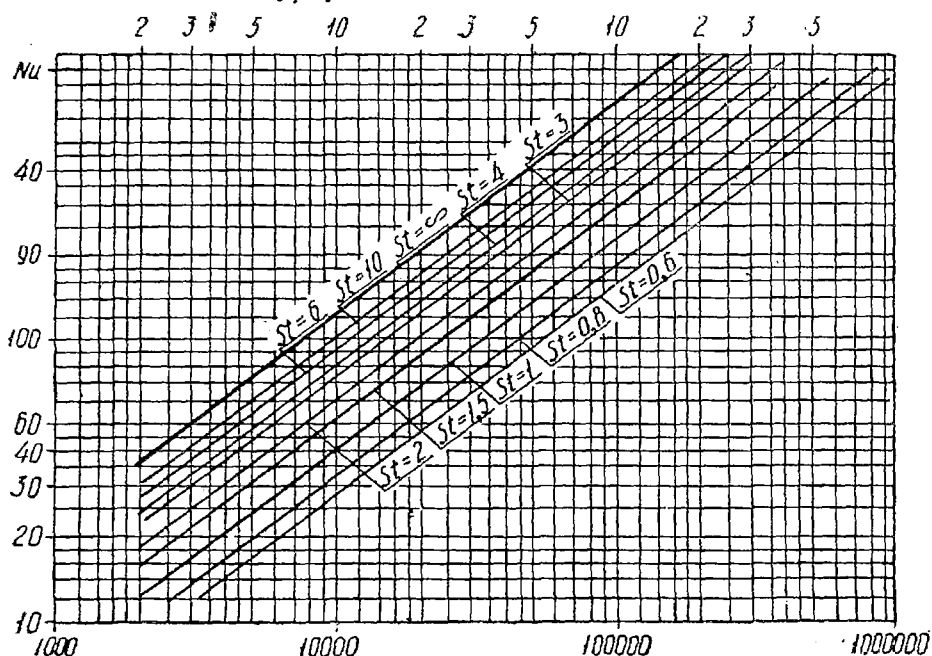


Рис. 37. Зависимость Nu от Re .

уравнению одну общую кривую, то это означает, что единственными переменными, обуславливающими теплопередачу, являются: диаметр, скорость, вязкость, теплопроводность жидкости и отношение длины трубы к диаметру. Следует считать, что и другие переменные оказывают свое влияние, в частности, удельная теплоемкость жидкости. Весьма вероятно, что различные результаты, полученные для разных жидкостей, вызваны прежде всего их различными удельными теплоемкостями, это однако должно бы было отразиться в некоторых других имеющихся измерения отношения, как, например, на cz/k (параметр Стантона). Другими словами, различие в расположении линий для этих жидкостей вызвано по всем вероятностям, разницею в значениях cz/k . С учетом этого фактора в результате обработки опытных данных была выведена общая для газов и для жидкостей формула (С. Л. Лейбензон).

$$Nu = 0,1187 R^{0,75} \frac{St}{St+2}$$

Зависимость эта графически представлена на рис. 37.

В результате уменьшения вязкости около стены скорость жидкости здесь увеличивается, вызывая снижение скорости в областях, более близких к оси трубы. Образование радиальной составляющей скорости жидкости вызывает конвекционные потоки, вследствие чего увеличивается и h .

¹ Trans. A. S. M. E. 32 (1910).

² Mc Adams, Sherwood and Turner, Trans. A. S. M. E., 48 (1926).

³ Все параметры (Nu , Re и St) берутся в одних и тех же единицах, напр., CGS.

В некоторых случаях поправочный множитель $\frac{St}{St+2}$ можно представить степенной¹ функцией от cz/k . Показатель степени 0,25 весьма подходит для воздуха и воды, но самые лучшие данные, которые можно получить для масел, оказываются несколько меньшими, чем получаемые при таком показателе степени. Проведенные на рис. 37 линии представляют наилучшие опытные данные, полученные ныне для этих жидкостей. Если кому-либо придется иметь дело с веществами, имеющими некоторые средние значения для cz/k , то ему следует интерполировать между этими кривыми. Для газов также вполне подходит уравнение Диксона (см. стр. 105). Зависимость тех же параметров для потока газа вне труб дана на рис. 36.

Рассмотрение рис. 38 показывает, как вместе с температурой увеличивается коэффициент теплопередачи слоя в случае турбулентного течения жидкости внутри трубы.

(Относительно текучести и вязкости различных жидкостей и соотношения единиц вязкости см. стр. 56 и сл.).

Для масел как k , так и J имеют меньшие значения. Для очень тяжелых масел J составляет лишь небольшую дробь от значения J для воды. Поэтому коэффициент для пленки масла, особенно холодного, очень мал по сравнению с h для воды.

Пример 5. Обмен тепла между маслами в постоянно действующей установке для регенерации растворителей происходит следующим образом. Во внутреннюю трубу обычного двухтрубного стального холодильника с диаметром труб в 32 мм и 51 мм в одну минуту поступает 455 л горячего парафинового масла при температуре в 121° а выходит оно при 49°. В кольцеобразное пространство при 21° в минуту поступает 480 л „богатого“ масла, содержащего 50% газаolina и текущего в направлении, противоположном горячему маслу. Для упрощения примера предположим, что труба диам. 50,8 мм так изолирована, что можно пренебречь потерей тепла в окружающее пространство. Для того, чтобы трение не было слишком значительным, скорость масел во внутренней трубе не должна превышать 1,2 м в секунду. Требуется вычислить необходимую полную линейную длину двойной трубы и дать краткую спецификацию самой холодильной установки.

Данные. По каталогам заводов внутренние и наружные измерения для 31,7 мм стандартной трубы составляют 35,0 мм и 38,4 мм, а для 51 мм — 52,5 и 60,5 мм. Стандартная длина такой трубы 5,65 м. Удельная теплота чистого масла и масла с газолитом равна 0,5, а удельный вес обоих масел 0,91. Поперечное сечение внутренней трубы равно 0,00097 м², площадь сечения кольцеобразного пространства равна 0,000775 м², и k для стали равно 37,0.

Теплопроводность как горячего масла, так и горячей смеси может быть принята равной 0,122. Нижеследующая таблица дает величины z для вязкости в сантипуазах.

Температура в °C. . .	49	60	71	82
Вязкость бедного масла	2,00	1,66	1,42	1,25
Вязкость богатого масла	1,80	1,50	1,28	1,13

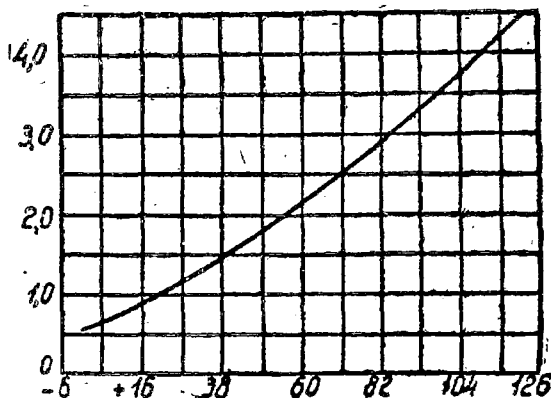


Рис. 38. Текучесть воды. Абс.—Температур в °C.
Орд.—Текучесть воды.

Решение. В каждой внутренней трубе обращается 0,00097. 1,2 · 60 = 0,07 м³ в минуту. Следовательно, для обращения 455 л в минуту необходимо иметь параллельно 0,455/0,07 или 6 двойных труб. Поэтому действительная линейная скорость в 31,7 мм-ой трубе равна 0,455/6. 60. 0,00097 = 1,09 м в сек. и 1,43 м в сек. в кольцеобразном пространстве.

¹ McAdams and Frost, Ind. Eng. Chem., 14, № 1 (январь, 1922) 12; C. W. Rice, Ibid., 16, № 5 (май, 1924), 454.

Для того, чтобы определить необходимую (теоретически) длину трубы, надо сначала определить поверхность теплопередачи из уравнения (27). Богатое масло нагреется на $(121,0 - 49)/1,053 = 68^\circ\text{C}$, выходя из установки при 90°C . Разница в температурах масел будет $121 - 90 = 31^\circ\text{C}$ на горячем конце установки и $49 - 21 = 28^\circ\text{C}$ на холодном, а отсюда полная разность температур Δt , для всего процесса в среднем равняется $29,5^\circ\text{C}$. Тепло, которое должно быть передано, равно теплу, отдаваемому горячим маслом или

$$Q/\Theta = 455 \cdot 60 \cdot 68 \cdot 0,91 \cdot 0,5 = 745\,000 \text{ б. кал. в час.}$$

Для определения температур пленки предположим, что $2/3$ общего падения температуры ($29,5^\circ\text{C}$) приходится на внутреннюю пленку. Считая это падение в $19,7^\circ\text{C}$, а падение во внешнем слое в 9° , для самой стенки остается $0,8^\circ\text{C}$. Средняя температура масла в кольцеобразном пространстве равна $(21 + 90):2 = 55,5^\circ\text{C}$; отсюда температура внешней пленки равна $55,5 + 9/2$ или около 60°C , а средняя температура внутренней пленки: $185 - (34:2) = 76,6^\circ\text{C}$. Из таблицы величин вязкости соответствующие значения находятся равными 1,48 для наружного (богатого) масла и 1,35 для внутреннего (бедного) масла. Богатое — масло насыщенное улавливаемыми углеводородами, бедное — освобожденное от них.

Для внутренней масляной пленки пользуясь графиком (рис. 37) находим $h \approx 860$. ($Re = 25\,700$, $St = 20$, $Nu = 245$). Для внешней пленки $Re \approx 12\,000$, $St = 22$, $Na = 120$ и соответствующее $h \approx 1070$. k для стали = $10\,800$. Пусть N будет полная линейная длина двойной трубы. Полное сопротивление может быть вычислено из уравнения (27), h фактически приравняем 60° от вычисленного (загрязнение).

$$R = r_1 + r_2 + r_3 = \frac{1}{515 \cdot 0,035 \cdot \pi \cdot N} + \frac{1}{10.800 \cdot 0,088 \cdot \pi \cdot N} + \frac{1}{640 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot N} = \frac{\Delta t}{Q/\Theta} = \frac{22,5}{745\,000}$$

Отсюда $N = 763 \text{ м.}^1$

Так как этот результат нужно разделить на шесть параллельных колен, то каждое колено будет содержать 125 м труб или 23 трубы стандартной длины по 5,65 м.

Всякая нагревательная поверхность, установленная дополнительно к теоретической в целях запаса, должна быть присоединена к основной последовательно, так как если ее присоединить параллельно, то получаемое в результате уменьшения скорости уменьшение коэффициента теплопередачи почти всецело поглотит этот гарантийный фактор. Для этого случая советуют последний брать в размере 50% , т. е. вычисленную по теоретическим коэффициентам длину трубы следует помножить на 1,5.

26. *Усиленная конвекция вне труб.* Для потока жидкостей в кольцеобразном пространстве между концентрическими трубами, столь часто применяемыми в холодильниках, мы располагаем лишь скудными данными. Возможно для этого случая пользоваться рис. 37, придавая D значение диаметра, имеющего тот же „гидравлический радиус“, что и кольцеобразное пространство. Гидравлический радиус круглой трубы равен одной четверти внутреннего диаметра, в то время как для кольцеобразного пространства он равен половине междутрубного прозора. Это предположение было использовано при решении предыдущей задачи: эквивалентный диаметр для кольцевого пространства $D - d = 52,5 - 38,4 = 14,1 \text{ мм.}$

Б. Жидкие пленки, жидкость кипящая

Для значения h_b (передача тепла между металлами и кипящей жидкостью) мы располагаем скудными данными. Однако полные значения для K можно получить, при чем это K включает поверхностный коэффициент пленки сгущенного пара, теплопроводность металла и пленку кипящей жидкости. Главными факторами, которые, повидимому, влияют на значение K , являются разность температур металла и жидкости, вязкость и плотность последней, устройство нагревательной поверхности и чистота² ее, т. е. покрыта ли она кристаллами, накипью и пр. Большое число испытаний,³ проведенных над шестью типами промышленных выпарных аппа-

¹ Значение $r_1/R = 0,592$, отсюда падение температуры во внутреннем слое равно $0,588 \cdot 0,592 \cdot 29,5 = 10,5$ против предположенных $19,7$. Это незначительное расхождение представляет ошибку, находящуюся в пределах точности исходных данных; поэтому нет нужды пересматривать примененные температуры, взятые предположительно.

² Pridgeon and Badger, Ind. Eng. Chem., 16 (май 1924), 468; McCabe and Robinson, Ibid., 472.

³ Kerr, Trans. A. S. M. E., 38, 67 (1916).

ратов на сахарных заводах, дало нам ряд значений для K (от конденсирующегося пара к кипящему сахарному раствору); сообразно различным условиям их эксплуатации, K колеблется в пределах от 650 до 750.

В выпаривателе или опреснителе замена стальной трубы трубой из другого материала с большей теплопроводностью и меньшей толщиной стенки вовсе не дает пропорционального возрастания мощности установки, как это будет показано на следующем примере.

Пример 6. В открытом баке кипятится раствор, нагреваемый отработанным паром; нагревательная поверхность — 30 мм стальная труба, толщина стенок которой 3,4 мм; теплопроводность стали 37,0 кал./м/час/°Ц. Предположено заменить стальную трубу медной того же внешнего диаметра (33,4 мм), со стенками толщиной 1 мм и коэффициентом теплопроводности 330 кал./час/м/°Ц. Так как теплопроводность меди приблизительно в 9 раз больше, а толщина стенки составляет $\frac{1}{3}$ толщины стенки стальной трубы, то казалось бы можно ожидать от замены увеличения мощности установки в 27 раз, если только материал трубы является решающим в этом вопросе.

Полагая полный коэффициент K от пара к кипящему раствору равным 1470 кал./м² час/°Ц внешней поверхности стальной трубы, требуется узнать на какой процент действительно возрастет производительность аппарата при замене стали медью?

Решение. Основание: 1 м² внешней стенки. Внутренняя поверхность равна в м² 0,797 для стали и 0,940 для меди, и средняя поверхность для стали 0,898 м² и для меди 0,970 м². Для поверхностного коэффициента паровой пленки в обоих случаях мы принимаем 9800 кал./м²/час/°Ц.

Приравняем сумму частных сопротивлений полному сопротивлению для случая стали и отсюда вычисляем:

$h = 2220$ для кипящей пленки вне трубы. Та же самая пленка будет существовать вне трубы, когда будет произведена замена материала, так что полное сопротивление при замене стали медью будет:

$1/9800 \cdot 0,940 + 0,001/330 \cdot 0,970 + 1/2220 = 1/1780$ при медных трубах. Так как полное падение температуры от пара к кипящей жидкости Δt в обоих случаях одно и то же, то скорость теплового потока, а следовательно и мощность установки будет обратно пропорциональна полному сопротивлению. Отсюда вытекает, что производительность при медных трубах будет на 21% больше, чем при стальных.

В эмалированном аппарате (конденсация водяного пара низкого давления снаружи чугунной или стальной стенки, внутренняя сторона которой покрыта эмалью, вода кипит внутри аппарата) полный коэффициент теплопередачи K в некоторых случаях равняется примерно 1000. Обыкновенное давление в эмалированных аппаратах не превышает 3,5 атм. по манометру, что соответствует температуре в 148° в рубашке аппарата, а температура жидкости в аппарате, конечно, немного ниже. Если желательны более высокие температуры, то через нагревательную рубашку пропускается горячее масло. Так как скорость масла незначительна, то полный коэффициент теплопередачи от масла к жидкости равен всего 50—100.

Хотя данные относительно коэффициента h_b от металла к кипящей жидкости и скудны, все же следует думать, что в случае воды он колеблется между 1000 и 15000.

В. Пленки газа

1. *Естественная конвекция.* Сопротивление пленок газов потоку тепла значительно превосходит сопротивление жидких пленок.

Поверхностный коэффициент h газовой пленки зависит от ее толщины и теплопроводности газа, которая, в свою очередь, зависит от температуры газового слоя. В случае, если токи, стремящиеся уменьшить газовые пленки, принадлежат только газу и вызваны естественными причинами, то конвекция называется естественной. Иллюстрацией такого случая может служить паровая труба, передающая свое тепло воздуху в комнате. Как уже раньше было установлено, тепло течет сквозь пленку, благодаря теплопроводности, а уносится прочь от слоя конвекцией.¹ Коэффициент для этого случая часто называется коэффициентом конвекции

¹ Тепло также теряется другим независимым путем—радиацией (см. стр. 112 и следующие).

В последующих рассуждениях он будет обозначаться h_g . Значение h_g зависит от большого числа факторов, как, например, от положения, формы, состояния и величины поверхности, от плотности газа, от температуры газового слоя и от разницы температур между поверхностью твердого тела и главной массы газа. Как известно, твердые тела от воздействия более холодного газа теряют свое тепло не только путем конвекции в газ, но и излучением на окружающие предметы. Если известна величина радиации твердого тела, то потеря конвекцией, а, следовательно, и коэффициент конвекции h_g могут быть получены по разности. К несчастью, как это будет показано ниже, величины радиации для большинства твердых тел определены не достаточно точно, а, следовательно, мало достоверными являются и получаемые для h_g значения. Для того, чтобы уменьшить поправки на радиацию в опытах для определения коэффициентов конвекции, Лангмюр¹ остановился на серебре, как на твердом теле, имеющем меньшую радиацию, чем любой другой доступный материал. Результаты опытов Лангмюра над серебряным, диском с диаметром в 15 см, одной стороной обращенным к воздуху в комнате, могут быть выражены формулой:

$$h_g \text{ (от вертикальной поверхности)} = 1,6 \Delta t^{0,25}, \dots \dots (33)$$

где Δt — разность температур поверхности пластинки и главной массы воздуха — колеблется между 5 и 470.

Пользуясь тем же самым диском, Лангмюр² при горизонтальном положении диска нашел, что h_g на 10% больше на верхней стороне диска, чем при вертикальном его положении.

Принимая во внимание другие доступные данные, можно для оценки коэффициента конвекции вертикальных стен заводских аппаратов пользоваться следующим уравнением

$$h_g = 3,4 + 0,024 \Delta t, \dots \dots (34)$$

где Δt колеблется в пределах от 5°C до 200°C разности температур поверхности стен и воздуха в помещении.

Следует помнить, что некоторые волокнистые материалы дают возможность образоваться несколько более толстым поверхностным слоям пленки, чем найденные на гладких стенах, но вероятно коэффициент теплопередачи не зависит от материала, если только последний не обуславливает состояние поверхности.

Потери тепла в воздух конвекцией горизонтальными паровыми трубами как открытыми, так и изолированными, могут быть вычислены по уравнению (34), но для труб, с диаметром меньшим 10 см, эта величина должна быть увеличена, а для более широких — уменьшена. При исчислении h_g для изолированной трубы следует обращать внимание на то, чтобы для Δt бралась разность температур поверхности изоляции и воздуха, а не металлической трубы и воздуха.

¹ Trans. Am. Electrochem. Soc. 23, 299 (1913).

² Loc. cit. Наблюдая изменение теплопроводности газовой пленки в связи с уменьшением температуры, Лангмюр нашел, что полученные им из опытов величины потери тепла могут быть предсказаны, если принять предположение, что покоящийся воздушный слой пленки на поверхности серебра имеет постоянную толщину в 0,4 см. Эта величина действительна в пределах от 150 до 500°C. Радиация составляет лишь незначительную часть общей потери тепла серебряной поверхности. Было определено, что руку приходится приближать на расстояние 0,4 см от серебряной поверхности, чтобы установить явное повышение температуры. Это доказывает также существование воздушного слоя (см. главу II).

Численные примеры помещены на стр. 118—119 под заглавием: „Упрощенное уравнение лучеиспускания“. Это объясняется тем, что потери конвекцией неизбежно сопровождаются потерями радиацией.

2а. *Усиленная конвекция; газ протекает внутри труб.* Когда воздух обтекает твердое тело, скажем, движимый вентилятором, то значения для h_g получаются тем большие, чем тоньше делается пленка. Такая конвекция называется усиленной. Для проектирования кипятильников, подогревателей воды в котельных, пароперегревателей, газовых теплообменников и других приборов, в которых применяется усиленная циркуляция газов, знание коэффициента теплопередачи между газом и твердым телом путем проводимости совместно с конвекцией при любых принятых условиях весьма существенно. Поэтому вследствие важности практического определения h_g для газов, текущих внутри труб с круглым сечением при заводских условиях (так как исследования велись по поручению промышленных объединений), рядом экспериментаторов¹ проделано множество опытов. Результаты своих наблюдений они пытались придать вид уравнений, многие из которых чрезвычайно сложны и неудобны. Выведенные ими формулы заключают в себе погрешности наблюдений, произведенных при специальных условиях опытов, и неприменимы для условий, значительно отличающихся от опытных.

Диксон изучил все результаты, полученные различными исследователями, и предложил следующее уравнение, общее для всех исследованных газов. Оно является обобщением всех достоверных данных и рекомендуется как лучшее уравнение, выведенное для турбулентного² потока газа внутри труб или кольцеобразного пространства между концентрическими трубами.

$$h_g = 0,22 \frac{C_p (Du\gamma)^{0,8} T_f^{0,66}}{D}, \dots \dots \dots (35)$$

где u — скорость газа $м/сек.$; γ — плотность его в $кг/м^3$ при данных t и p ; C_p — средняя теплоемкость при постоянном давлении; T_f — средняя абсолютная температура газового слоя, выраженная в $^{\circ}C$; D — эквивалентный диаметр прохода газа, выраженный в $м$. Уравнение (35) основано на опытных данных многочисленных исследователей для эквивалентных диаметров от 1 $см$ до 10 $см$, для средних температур слоя от 20 до 1100 $^{\circ}C$, для скоростей от 2,5 до 130 $м$ в $сек.$ и на данных, характеризующих светильный газ, воздух и двуокись углерода. Массовая скорость³ $u\gamma$ равна средней линейной скорости ($м$ в секунду) через свободное сечение, помноженной на плотность ($кг/м^3$) газа при данных температурах и давлении, т. е.

$$v = u\gamma \dots \dots \dots (36)$$

Для обыкновенных вычислений с воздухом в 25 $мм$ трубах, более или менее точный коэффициент получается из уравнения

$$h_g = fv^{0,8}, \dots \dots \dots (35a)$$

где f зависит от температуры плёнки. Если последняя порядка 100 $^{\circ}C$, то $f \approx 5$. Этим уравнением нельзя пользоваться, когда употребляемые трубы очень узки или температура процесса очень велика, в этих случаях необходимо прибегать к общему уравнению (35).

¹ W. Nusselt, Z. Verein Deutscher Ing., 89 (1910); Fessenden and Haney, Univ. of Mo. Bull., 17, № 26 (1916); Babcock and Wilcox, 35 изд. „Steam“, 328 (1913), (1916) „Experiments“ H. P. Jordan, Inst. Mech. Eng. (1909).

² См. стр. 61. Уравнение (35) неприменно для ламинарного режима.

³ Reynolds (Phil. Trans., 1883) был первый, который указал на большее удобство выражения скорости газа через массу по сравнению с линейной скоростью. Все более или менее верные формулы, предложенные за последние 10 лет, пользуются понятием массы-скорости.

Пример 7. Газы от горения серы (18% SO_2 , 2,9% O_2 , 79,1% N_2) с температурой 870°C должны быть охлаждены до 24°C путем пропуска через свинцовые трубы (с 10,2 см внутренним диаметром и 0,6 см стенкой), уложенные горизонтально в деревянном чане, в котором циркулирует охлаждающая вода. Каждая труба соединена коленом с трубой, находящейся непосредственно под ней, а верхняя и нижняя снабжены горизонтальным краном для впуска газа наверху и выпуска его из охладителя внизу. Охлаждающая вода поступает в чан у дна его с температурой в 21°C и уходит с $t = 82^\circ \text{C}$.

а) Сколько потребуется воды для обработки в час 565 м³ (измеренных при 24°C и атмосферном давлении) и б) сколько потребуется труб, если известно, что наибольшая скорость газа при выходе из охладителя не превышает 4,6 м в сек. в каждой 10,4 см трубе?

Решение. а) Молекулярные теплоемкости¹ указанных газов имеют следующее значение:

$$MC_p(\text{SO}_2) = 7,0 + 0,0071T - 0,00000186T^2,$$

$$MC_p(\text{O}_2, \text{N}_2) = 6,5 + 0,001T,$$

где T абс. темп. в данный момент. Полные количества тепла, отнимаемые в горелке у каждого газа, входящего в состав одной молекулы смеси, могут быть вычислены путем интегрирования этих уравнений в пределах $T_1 = 1143^\circ$ абс. и $T_2 = 297^\circ$ абс., но проще получить их из кривых для полных теплоемкостей, вычерченных на рис. 4 (стр. 14). Так тепло, теряемое 1 кг-молекулой SO_2 при охлаждении от 870 до 24°C , равняется $9500 - 200 = 9300$ б. кал., в то время как для молекул O_2 или N_2 это количество будет всего 6100 б. кал. Полное количество молекул сгоревшего в час газа, подлежащего охлаждению, равняется:

$$\frac{273 \cdot 565}{297 \cdot 22,4} = 23,1 \text{ кг-мол. в час.}$$

$$Q/\Theta = 23,1 \cdot 0,18 \cdot 9300 + 23,1 (0,791 + 0,029) 6100 = 193\,000 \text{ б. кал.}$$

Так как вода имеет удельную теплоту, равную 1,0, и нагревается до 82°C при прохождении через кожух холодильника, то общее потребное количество воды будет равняться

$$193\,000/60 (82 - 21) = 53 \text{ литра в мин.}$$

Решение б) Начальная разность температур газа и воды равна 827°C , конечная $\cong 2^\circ \text{C}$, а средняя, как будет показано на стр. 120, равна:

$$\frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \log_{10} \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = 152^\circ \text{C} \dots \dots \dots (52)$$

Так как поперечное сечение трубы с внутренним диаметром в 10,2 см равно 0,0081 м² то количество труб параллельно соединенных, необходимых для обработки всего количества газа при скорости газа в 4,5 м в секунду, будет равно $565/4,5 \cdot 3\,600 \cdot 0,0081 = 4,3$. Следовательно, придется взять 5 труб, что даст действительную скорость газа на выходе в 3,88 м в секунду в каждой 10,2 см трубе.

Средний молекулярный вес (M) газа равняется

$$0,18 (M \text{ для } \text{SO}_2) + 0,791 (M \text{ для } \text{N}_2) + 0,029 (M \text{ для } \text{O}_2) = 34,6.$$

Массовая скорость газа в трубах будет

$$v = \frac{45 \cdot 273 \cdot 34,6}{(273 + 24) 22,4} = 5,5 \text{ кг/м}^2$$

Значение h_G от газа к трубе, получаемое из уравнения Диксона (35)

$$h_G = \frac{0,22 \cdot 0,227 \cdot 5,5^{0,8} \cdot 400^{-0,68}}{0,102^{0,2}}.$$

Значения величин, входящих в уравнение (35), могут быть вычислены следующим образом

$$C_p = \frac{\text{б. кал. (отданные)}}{^\circ \text{C падения температуры (кг газа)}} = \frac{0,227 \text{ б. кал. на кг.}}{^\circ \text{C}}$$

Пренебрегая падением температуры в стене трубы и в водяной пленке, температуру газовой пленки мы сможем вычислить прибавлением половины среднего падения температуры в газовой пленке к средней температуре воды:

$$\frac{152}{2} + \frac{21 + 82}{2} + 275 = 400.$$

Таким образом, подставляя эти значения в уравнение (35), находим $h_G \cong 16,2$.

¹ G. N. Lewis and M. Randall, J. Am. Chem. Soc. 34, 1128 (1912).

Так как h для движущейся воды вне труб будет больше 1000, то это сопротивление оказывается менее $1/1000$, и им можно будет пренебречь наряду с сопротивлением в $1/16,2$. Равным образом сопротивлением трубы L/k или $1/960$ можно пренебречь по сравнению с $1/16,2$. Таким образом газовый слой можно рассматривать как полное сопротивление, и потому

$$A = \frac{Q/\theta}{h_g \Delta t} = \frac{193\,000}{16,2 \cdot 152} \cong 80 \text{ м}^2 \text{ внутренней поверхности.}$$

Так как линейный метр имеет внутреннюю поверхность в $0,32 \text{ м}^2$, то потребная полная длина трубы будет 250 м (10,4 см трубы).

Так как мы имеем пять труб, соединенных параллельно, то длина каждого параллельного ряда должна быть 50 м. Каждый из пяти параллельных рядов должен иметь эту необходимую длину, чтобы была обеспечена охлаждающая поверхность (50 м), и сверх того добавочную длину для фланцев и колен, которые должны находиться вне деревянного чана, образующего кожух аппарата.

Для введения поправки на отложение серы, в трубах вводится множитель 2, т. е. прибор должен состоять из пяти параллельных ветвей, содержащих каждая, скажем, 1000 погонных метров, не считая колен.

26. Усиленная конвекция (газ течет под прямым углом к трубам).

Случай теплопередачи газа, текущего вне труб, исследован только в отношении воздуха.

Основываясь на данных Кинга, Кенели и Гьюга (Hughes), Чэппель¹ вывел следующее уравнение для воздуха, текущего под прямым углом к одной отдельной трубе:

$$h_g = \frac{T^{1/2}(\gamma u)^n}{1,5 (486)^n D^{0,53}}, \dots \dots \dots (37)$$

где $n = 0,73 + 0,08 \log_{10} D$, а T — средняя температура слоя в градусах Цельсия; γu — означает 1 кг газа в сек. на м^2 свободной площади, а D — внешний диаметр трубы в метрах. Общее изменение различных факторов не выходит из пределов: T от 360° абс. до 770° абс. u от 0,18 до 46, D от 3 мм до 0,6 м и h_g от 17 до 2000.

Для малых скоростей можно вычислить значение h_g для свободной конвекции (см. стр. 104), пользуясь большим из коэффициентов $= h_c$ и h_g . Равным образом и радиация должна быть вычислена отдельно (см. стр. 113 и сл.).

Для воздуха, текущего под прямым углом к расположенным в шахматном порядке трубам, сравнение уравнения (37) с данными Карье, Стюртевант, Рейера (Carrier, Sturtevant, Reiher) и других показывает, что уравнение должно быть изменено следующим образом

$$h_g = \frac{T^{1/2}(\gamma u)^n}{1,5 (4,86) D^{0,53} \left(1 + \frac{D}{W}\right)}, \dots \dots \dots (38)$$

где W есть расстояние в метрах между центрами смежных труб в ряду, взятом под прямым углом к направлению потока воздуха, а γu означает число кг воздуха в секунду на м^2 минимума свободной площади между трубами в плоскости, проведенной под прямым углом к потоку воздуха. Добавочный член для учета особого расположения труб $1 + \frac{D}{W}$ применяется лишь, когда трубы расположены на равных расстояниях друг от друга.

Для других газов предполагается, что величину h_g , найденную из уравнений (37) и (38), нужно умножить на отношение удельных теплоемкостей газа и воздуха, взятых при средней температуре газа.

Так, подогреватель Буффало для горячего дутья, которым пользовался Карье (Carrier), состоял из стандартных однодюймовых труб из серого чугуна. Расстояние центров труб одного и того же ряда составляло 67 мм, расстояние между линиями центров смежных рядов было 48 мм,

¹ E. L. Chappell and W. H. M. McAdams, Trans. A. S. M. E., 48 (1926).

а минимум свободной площади в первом ряду был около 50% общей площади. Для этих условий уравнение Карье¹ приняло вид:

$$h_G = \frac{22,3 \cdot u \gamma}{0,205 u \gamma + 1,42} \quad (39)$$

где u — скорость в м/сек., γ — уд. вес. в кг/м³, $u \gamma$ меняется в пределах от 1,1 до 6,8 кг/м² минимальной свободной площади. Сравнивая наблюдения над различными типами воздухонагревателей, Карье нашел, что взятая стандартная конструкция, увеличивающая трение воздуха, увеличивает h_G .

Пример 8. 28,3 м³ воздуха в минуту (измеренных при 20° Ц) надлежит нагреть с 20° до 100° Ц, продувая его извне и перпендикулярно к стандартным стальным паровым трубам, у которых линия центров расположена в виде равностороннего треугольника, так что между поверхностями труб получается 26,4 мм просвета. Скорость воздуха (фиктивная) равняется 3,05 м в секунду при 20° Ц. Спрашивается, сколько метров трубы потребуются для нагревания, если давление пара равно 1040 мм рт. ст. (1,41 атм. манометра).

Примечание. Удельная теплоемкость воздуха равна 0,241, при нормальном давлении.

Решение. К таким условиям, встречающимся в инженерной практике, применимо уравнение (39).

Фиктивная скорость такая же, какая была бы при отсутствии труб. Внешний диаметр 26,4 мм трубы равен 31,4 мм, так что на каждые 31,4 + 26,4 мм приходится 26,4 мм просвета или 43% свободной площади. Тогда действительная скорость через минимальную свободную площадь будет равна

$$u = 3,05 \cdot 57,8 / 26,4 = 7,1 \text{ м в сек. при } 20^\circ \text{ Ц.}$$

Объем молекулярного веса всякого постоянного газа при стандартных условиях (Н. У.), т. е. при 0° Ц и норм. давлении, равняется 22,4 м³. Молекулярный вес М воздуха равен 29. Чтобы превратить градусы стогоградусной шкалы в абсолютные, нужно к первым прибавлять 273, а объем газа меняется прямо пропорционально абсолютной температуре. Давление p взято нормальное, а именно 760 мм Нг.

Массовая скорость, требуемая для уравнения (39), будет:

$$v = 7,1 \frac{273 \cdot 29 \cdot 760}{293 \cdot 22,4 \cdot 760} = \text{в кг/сек. на м}^2 \text{ свободной площади минимального поперечного сечения} = 7,4 \text{ кг/сек./м}^2.$$

Из уравнения (39) находим:

$$h_G = \frac{22,3 v}{1,42 + 0,205 v} = 60,3 \text{ б. кал./час./м}^2/^\circ \text{ Ц.}$$

$$v = u \gamma.$$

	м ³ в мин.	м ³ в час.	м ³ в час при Н. У.	кг мол. в час	кг в час.	
$\frac{Q}{\theta}$	28,3	60	273	1	29	$0,241 (100 - 20) = 39\,800 \text{ б. кал. в час.}$
			293	22,4		

Температура пара, отвечающая 2,4 атм. абсолютного давления, равна 126° Ц, так что разность между температурами пара и воздуха будет равна 126—20 = 106° Ц на холодном конце прибора и 126—100 = 26° Ц на горячем.

Как будет показано на стр. 128, средняя разность температур для такого случая получается из уравнения (52)

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \log_{10} \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = \frac{106 - 26}{2,3 \log \left(\frac{106}{26} \right)} = 57^\circ \text{ Ц.}$$

На стр. 119 будет показано, что в этом случае нет заметного падения температуры в слое сгущенного пара и в металлической трубе

$$A = \frac{Q/\theta}{h_G \Delta t} = \frac{39\,800}{60,3 \cdot 57} = 11,5 \text{ м}^2.$$

Так как для 1 м² внешней поверхности 25,4 мм (1") трубы требуется 12,5 пог. м то потребная длина труб будет 145 м стандартной 25,4 мм стальной трубы.

¹ W. H. Carrier, Trans. A. S. M. E., 33 (1911).

Г. Пленка конденсирующегося пара

Когда пар приходит в соприкосновение с твердым телом, температура которого ниже точки росы (т. е. температуры конденсации пара при данном давлении в аппарате), то пары будут сгущаться на поверхности твердого тела и при этом выделять при постоянной температуре теплоту конденсации (равную теплоте парообразования). Теплота эта количественно весьма велика. Если прибор не настолько узок, что могут произойти разные нарушения процесса, то конденсация будет происходить при постоянной температуре, так как иначе на различных частях конденсирующей поверхности образовывались бы различные давления, разницу между которыми, разумеется, нельзя было бы сохранить при возможности свободного передвижения пара между этими частями.

Для сгущения паров, содержащих воздух лишь в тех количествах, в каких он содержался в исходной жидкости, точные данные имеются лишь для пара, сгущающегося на внешней поверхности труб. Вебстер¹ нашел значения для пара в пределах от 7 000—10 000, при чем коэффициенты возрастали вместе с изменением средних арифметических скоростей пара от 4,5 до 32 кг в сек. на м². При данной скорости пара увеличение абсолютного давления от 1,5 до 7 кг на см², повидимому, несколько понижало коэффициент.

Жордан² получил подобные же результаты для пара, но его коэффициенты, полученные для определенных скоростей давления пара, немного ниже найденных Вебстером.

Клемент (Clement) и Гарланд (Garland)³ определили коэффициенты для пара в пределах от 7 000 до 12 000. Более новые исследования⁴ водяного пара при атмосферном давлении дают коэффициенты в пределах от 10 000 до 16 500. Так как количественно действие различных переменных, влияющих на пленку пара, не определено, то для обычных вычислений принимается значение 10 000. Эта величина предполагает, однако, присутствие не конденсирующегося газа лишь в незначительном количестве и требует принятия мер к быстрому и эффективному удалению конденсата с нагреваемой поверхности и неконденсирующегося газа из конденсатора, т. е. условий, имеющих обычно налицо в хороших установках и, во всяком случае, технически легко осуществимых.

Хотя действительные значения для h_n весьма различны для отдельных случаев, к счастью, коэффициент теплопередачи со стороны пара не является решающим фактором для работы конденсаторов, выпаривателей и опреснителей. В нагревателях для воздуха или других газов сопротивление со стороны газа обычно так велико, что по сравнению с ним сопротивлением водяного пара можно пренебречь.

Для паров других веществ найдены значительно низшие коэффициенты. Это объясняется тем, что коэффициенты зависят от теплопроводности и текучести конденсата.

Это поясняет приведенная здесь таблица.

	h_n	J	k	$\frac{h_n}{J \cdot k}$
Пар	10 700	3,05	0,49	7200
	16 500	3,86	0,49	8700
	12 000	3,16	0,49	7800
Четыреххлористый углерод	1 400	1,85	0,09	8250
Бензол	1 500	2,81	0,12	4500
	1 800	2,87	0,12	5230

¹ Trans. Inst. Engrs. and Shipblds. in Scotland, 57 (1913—14).

² Engineering (London), 1909.

³ Univ. of Ill., Eng. Expt. Sta. Bull. 40, 1909.

⁴ McAdams and Frost, J. Ind. Eng. Chem., 14, № 1 (1922).

Таким образом, большей частью почти восьмикратное отношение коэффициентов водяного пара и органических паров объясняется более низкими значениями теплопроводности k и текучести J для органического конденсата. Для определения влияния других переменных, например, скорости паров, надлежит сделать дополнительные наблюдения.¹ За неимением отдельных данных для других паров можно в виде приближения пользоваться следующим уравнением:

$$h_n = 7250 k \cdot J \dots \dots \dots (40)$$

Прибавление неконденсирующихся газов к охлаждаемому водяному пару явно влияет в сторону понижения коэффициента h_n от пленки пара к металлу. К счастью, на практике можно держать процент неочищенных газов на низком уровне даже при многократном выпаривании, где водяной пар сгущается под вакуумом. Это равным образом возможно в нагреваемых

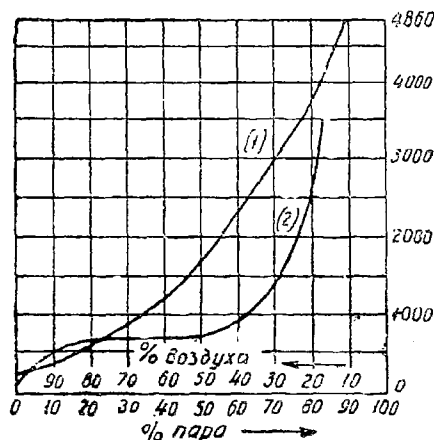


Рис. 39. Влияние воздуха на коэффициент теплопередачи пленки конденсирующегося в трубах пара. Абс. — Арифм. среднее объема пара и воздуха. Орд. — Коэфф. теплопередачи пленки пара h_n . (1) Chambers и Alpert. (2) Arzoomanian и Alpert.

К для целого ряда установок поверхностных конденсаторов, выведенное ими, равно 1700.⁴ Желательно также вычислить K по методу сопротивлений, хотя во многих случаях самое большое сопротивление в поверхностном конденсаторе для водяного пара приходится на воду,⁵ особенно когда применяют малые скорости воды. При конденсации органических паров, сопротивление пленки этих паров значительно выше, чем при водяном паре.

Пример 9. Конденсатор может охладить 680 кг сухого насыщенного алкогольного пара в час, при нормальном давлении, и охладить конденсат до 24° Ц при употреблении для охлаждения воды, проходящей через стандартные цельнотянутые медные трубы в 6 мм. Пары алкоголя поступают сверху и идут вниз вокруг труб, а вода входит в трубы снизу конденсатора при 15,5° Ц и выходит из него наверху при 49° Ц с линейной скоростью в 0,61 м в сек. Сколько труб нужно установить и какова должна быть длина каждой трубы?

Данные. Удельная теплота алкоголя 0,65 б. кал./кг на 1° Ц, теплота парообразования его 210 б. кал./кг и точка кипения 78° Ц. Внутренний и внешний диаметр медной трубы со стенками в 2,1 мм равны 9,5 мм и 13,7 мм. Теплопроводность меди равна 328 б. кал./час./м².

¹ Точная формула с учетом всех факторов принадлежит Nusselt (см. в сводке. стр. 125).

² Данные Chambers и Eskew, M. I. T. Chem. Eng. Thesis, 1921, проверенные T. H. Frost, M. I. T., данные Arzoomanian and Alpert, M. I. T., Chem. Eng. Thesis, 1922.

³ На основании полных коэффициентов Keppa от сгущенного водяного пара к кипящему раствору сахара. См. J. Ind. Eng. Chem. 12 644 (1920).

⁴ Orrok, Trans. A. S. M. E., 32 (1910).

⁵ См. также стр. 99.

водяным паром барабанах для сушки бумаги, тканей и т. д., но процесс в этих аппаратах еще не изучен настолько, насколько следовало бы. Рис. 39 показывает, как меняется коэффициент h_n в зависимости от среднего арифметического процента содержания воздуха в водяном паре. Следует заметить, что кривые, найденные различными исследователями, очень трудно сравнивать: это происходит от того, что не ясно выражена зависимость коэффициента от одной переменной или от группы переменных при прочих постоянных факторах.²

Робинзон дает следующее уравнение:³
 $\lg_{10} h_n = 1 + 0,0246 (\text{процент водяного пара по объему}) + \lg 4,9.$

Уравнения для полных коэффициентов теплопередачи от водяного пара к охлаждающей воде в поверхностных конденсаторах выведены Смитом, Орроком и другими. Среднее значение для

Решение В конденсаторе производится две операции: сгущение алкогольных паров при постоянной температуре в 78°Ц и охлаждение конденсата с 78°Ц до 24°Ц . Коэффициент теплопередачи имеет различные значения для каждой из этих стадий процесса.

Тепло, выделяемое при сгущении, равняется $680 \cdot 210 = 142\,800$ б. кал. в час, а при охлаждении $680 \cdot 0,65 \cdot (78^{\circ}\text{Ц} - 24^{\circ}\text{Ц}) = 21\,300$ б. кал. в час. Так как вода протекает сперва через зону охлаждения, а затем через зону сгущения, то температура ее повышается в зоне охлаждения на $24\,000$

$12\,8000 + 21\,300$ или на $14,6\%$ полного повышения (т. е. $33,5$) или приблизительно на 5°Ц . Итак, охлаждающая вода в конце зоны охлаждения и в начале зоны сгущения имеет температуру в $20,5^{\circ}\text{Ц}$. Разница температур между сгущающимся паром и водой равна $78^{\circ} - 49^{\circ} = 29^{\circ}$ там, где вода покидает зону сгущения, и $78^{\circ} - 20,5^{\circ} = 57,5^{\circ}\text{Ц}$ там, где она в нее входит. Среднее арифметическое или $43,5^{\circ}\text{Ц}$ может быть принято с погрешностью менее 4% , как это установлено на стр. 122. Для зоны охлаждения разница температур на концах ее будет $57,5^{\circ}$ и $8,3^{\circ}\text{Ц}$, так что необходимо взять среднее логарифмическое разности температур, получаемое из уравнения (52):

$$\frac{57,5 - 8,3}{\ln \frac{57,5}{8,3}} = 25,5^{\circ}\text{Ц}.$$

Так как вода имеет удельную теплоту 1000 б. кал./ $\text{м}^3/^{\circ}\text{Ц}$ и ее температура повышается на $32,3^{\circ}$, то количество воды, необходимое для данного конденсатора, будет равным:

$$\frac{142\,800 + 24\,000}{60 \cdot 1000 \cdot 33,5} = 0,082 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Поперечное сечение каждой трубы равно $0,0000713 \text{ м}^2$, и так как линейная скорость воды в каждой трубе равна $0,61 \text{ м}$ в секунду, то число труб должно быть равным $31,7$ или 32 трубы. Такая скорость воды дает коэффициент h_p равным 2580 , согласно уравнению (32).

Так как значение k для алкоголя равно $0,153$ (см. стр. 126) и среднее значение $J = 2,2$ (см. рис. 26), а поверхностный коэффициент для слоя сгущенного пара, найденный из уравнения (40), оказывается равным 2480 , то Q/θ для зоны сгущения определяется из уравнения (27), где

$$n = \frac{1}{2580 \cdot N \cdot \pi \cdot 0,0096} + \frac{0,002}{328 \cdot N \cdot \pi \cdot 0,0022} + \frac{1}{2480 N \cdot \pi \cdot 0,00137}$$

$$\frac{Q}{\theta} = 142800,$$

откуда $N = 73,2$ метра для зоны сгущения.

Средняя разница температур в зоне охлаждения равна $25,5^{\circ}\text{Ц}$, Q/θ равно $24\,000$ б. кал. в час и, принимая коэффициент h_p между внешней стороной трубы и сгущенным алкоголем равным 245 , N получается равным 102 м .

Общее количество потребных труб будет $73,2 + 102 = 175 \text{ м}$, а так как у нас 32 трубы расположенных параллельно, то длина каждой трубы будет равна $5,5 \text{ м}$.

Оптимальная скорость (экономический критерий). Следует отметить, что в вышеприведенных уравнениях скорость оказывается весьма важной переменной, которой конструктор может распоряжаться в весьма широких пределах. Так, в воздухонагревателях для вентиляционных систем, сушилках, увлажнителях и т. п. можно пользоваться большими скоростями, получая благодаря этому высокий коэффициент теплопередачи, но это происходит за счет большого падения давления. По желанию можно дойти до другой крайности — пользоваться очень малой скоростью воздуха, прибегая к большим нагревательным поверхностям, зато ограничиваясь лишь очень малым падением давления, а следовательно, и малой затратой энергии. Как показали Карье и Бузи (Carrigier и Busey)¹ в статье о конструкции кауперов, решение вопроса, какую скорость следует применять в определенном случае, требует составления экономического баланса между стоимостью энергии и стоимостью нагреваемой поверхности. Кривые,² проведенные на чертеже 40, вычислены для нагрева воздуха 929 м^3 в мин. от 21° до 77°Ц водяным паром, с т-рой конденсации 104°Ц в нагревателе, изготовленном из 25 мм стандартных труб, расположенных в шахматном порядке. Коэф.

¹ Trans. A. S. H. V. E., 19, 141 (1913).

² Lewis, McAdams and Frost, Jour. A. S. H. V. E., 28, 104 (1922).

фициенты взяты из формулы Карье,¹ а падения давления из таблицы Стюртеванта. Стоимость нагревающей поверхности принята в 10 долларов за m^2 , включая стоимость монтажа. Общая (полная) эффективность вентилятора и мотора принята равной 50%, а стоимость энергии 3 цента за kW. Сушилка, для которой этот прибор предназначался, должна была работать 7200 часов в год, т. е. 300 дней. Начисления на стоимость поверхности, как-то: износ, прибыль, налоги, содержание и т. д., приняты в размере 15%.

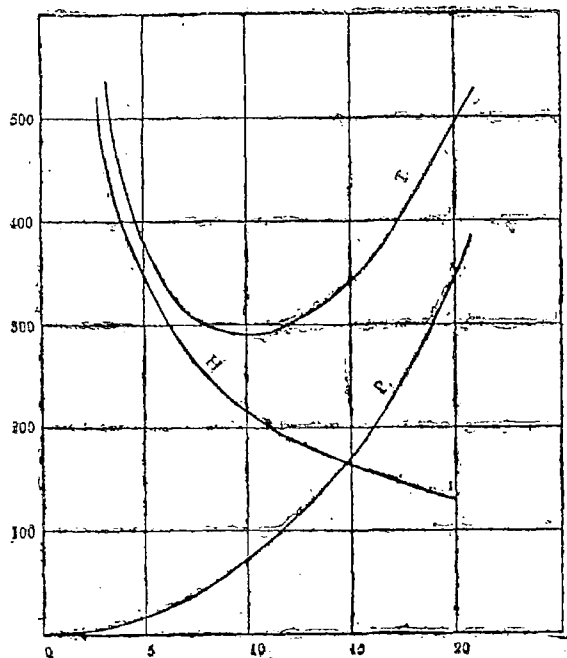


Рис. 40. Оптимум скорости в подогревателе воздуха (по экономическому балансу). Абс.—Начальная скорость воздуха (фугы в секунду). Орд.—Годичная разница (в долларах в год). Т—общий расход в год. Р—стоимость энергии. Н—стоимость греющей поверхности.

Нужно отметить, что наименьшая стоимость соответствует начальной скорости воздуха около 3 м (10 фут.) в сек., считая на свободное сечение. Причина этого лежит в том, что начисление на стоимость поверхности берется за год, а стоимость энергии, необходимой для продувания воздуха вдоль нагревающей поверхности, начисляется на каждый час работы аппарата.

Следует также заметить, что процент начисления на износ и тому подобное крайне низок. Когда по местным условиям эти начисления могут оказаться выше, желательны еще меньшие скорости, но там, где энергия дешевле, справедливо обратное положение. Часто у конструкторов замечается склонность понижать первоначальные капиталовложения в проектируемой установке, оказывающейся в действительности неэкономичной из-за чрезмерной эксплуатационной стоимости.

3. Лучеиспускание

А. Общее уравнение полного лучеиспускания

Если энергия падает в виде лучистой теплоты на тело, безразлично жидкое или твердое, то некоторая часть ее будет отражаться от поверхности тела в окружающее пространство, в то время как остальная часть проникает через поверхность в тело. Эти входящие в непрозрачные тела лучи поглощаются телом и количественно превращаются в теплоту, а в прозрачных телах только часть их поглощается, а остальная часть проходит через тело. Для каждого вещества та часть попавшей на его поверхность полной лучистой энергии, которая им поглощается, является постоянной характеристикой вещества.

Другая часть энергии, отражающаяся или проходящая насквозь, для каждого данного вещества изменяется в зависимости от длины волны излучения и от температуры поверхности тела.

¹ См. стр. 108.

Если лучистая энергия охватывает широкий спектр излучения, то для технических целей с достаточной точностью можно применять среднее значение величины этого коэффициента поглощения.

Величина поглощенной телом энергии быстро увеличивается при температурах выше 1600° и мало меняется при низкой температуре; при всех вычислениях в этой книге она будет приниматься независимой от температуры. Вещества, для которых часть поглощаемой энергии равна единице, а именно такие, которые поглощают все лучи, направленные на них, и ничего не отражают, были названы Кирхгофом черными телами. В то время как для твердых тел подобное явление осуществляется только при исключительных условиях, понятие черного тела является основным для оценки явлений обмена энергии в форме лучей между твердыми или жидкими телами и окружающей их средой.

Наличие газа в пространстве, окружающем тело, не влияет заметным образом на лучеиспускание тела. А так как газы имеют очень низкую способность поглощения лучистой энергии, то лучи проходят обычно через газ, не изменяясь количественно. Поглощение лучей находящейся на их пути поверхностью физически означает превращение их в тепло, и в этой форме они могут быть восприняты газами посредством процессов теплопроводности и конвекции.

Теоретические и экспериментальные исследования Стефана, Больцмана (Stefan, Boltzmann), Луммера (Lummer) и других обнаружили, что полная энергия, излучаемая на единицу площади поверхности какого-нибудь тела, относимого к числу абсолютно черных, совершенно не зависит от материала тела и пропорциональна только четвертой степени абсолютной температуры тела. Математически это выражается следующим уравнением

$$\frac{Q_T}{\theta} = bAT^4 \dots \dots \dots (42)$$

Величины интенсивности лучеиспускания p по отношению к идеально-черному телу для различных металлов даны на стр. 127.

Эти данные недостаточно достоверны, так как в большинстве опытных определений конвекция не исключалась, и поправки на конвекцию не достаточно правильны. Относительная величина лучеиспускания большинства соединений — окисей, солей, органических веществ и т. д. — недостаточно точно исследована и трудно поддается измерению. Для большинства их эта величина может быть приблизительно определена, как 90% черного тела.

Металлы, покрытые сплошной грубой пленкой окиси, также могут быть рассматриваемы как имеющие 90% черноты, т. е. их состояние определяется составом их поверхностей.

Уравнение (42), исправленное для относительной черноты, принимает вид:

$$\frac{Q_T}{\theta} = bApT^4 \dots \dots \dots (42a)$$

На основании этого общего уравнения может быть вычислено полное лучеиспускание для каждого случая. Однако для технических целей важно бывает знать лишь общий результат обмена теплом через лучеиспускание, т. е. баланс поглощения и лучеиспускания.

Результат этот получается при применении уравнения (42a) как к теплым, так и к холодным телам, как разность этих двух выражений. В следующих специальных случаях рассматривается лучеиспускание между телами (твердыми и жидкими) при постоянной температуре каждой среды.

Б. Лучеиспускание между телами (твердыми или жидкими), при постоянной температуре

Случай I. Две параллельных плоскости неограниченного протяжения. В этом случае

$$\frac{Q_u}{\Theta} = A \frac{\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]}{\frac{1}{p_1 c} + \frac{1}{p_2 c} - \frac{1}{c}}, \dots \dots \dots (43)^1$$

где Q/Θ есть чистая потеря тепла более теплого тела, приходящаяся на единицу времени, A — площадь поверхности любого тела, p_1 и p_2 — коэффициенты относительной черноты более теплой и более холодной поверхностей при абсолютных температурах соответственно T_1 и T_2 и c — коэффициент лучеиспускания черного тела.

В английских единицах c есть $0,172 \text{ В Т У}/(\text{час.}/\text{фут}^2/(\text{°F. абс.})/100^4$, в то время как в CGS системе c есть $0,000137 \text{ г-кал.}/\text{сек.}/\text{см}^2 \text{ °C абс.}/(100)^4$.

В практической системе единиц $c = 4,965 \text{ б. кал.}/\text{час.}/\text{м}^2 \text{ на } (\frac{1^\circ}{100} \text{ °C абс.})^4$.

Постоянная b в уравнении (42) и (42a) $= \frac{c}{100\,000\,000}$ в любой системе единиц.

Уравнение (43) также применимо к двум концентрическим сферам, с приблизительно равными диаметрами, и им можно также пользоваться для приближенного расчета передачи тепла посредством лучеиспускания от более теплых стенок к более холодным в рекуператорах, как это установлено в теплотехнической практике и в концентрических трубах.

Случай II. Тело, внутри другого большего тела. Можно математически доказать, что в пространстве, окруженном со всех сторон стенками, при данной температуре (какая бы ни была относительная чернота и форма стенок), количественно совокупность радиации и отражения от каждой единицы площади внутренней поверхности будет такова, как если бы тело было черным. Больше того, если внутри данного замкнутого пространства есть относительно маленькое твердое тело, все равно черное или нет, — полное лучеиспускание, действующее на это тело, тождественно с лучеиспусканием черных тел при температуре их среды. В таком случае обмен энергии или чистый результат лучеиспускания и поглощения между замкнутым телом и его средой выражается уравнением:

$$\frac{Q_u}{\Theta} = A p_e c \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \dots \dots \dots (44)$$

где p_e есть относительная чернота замкнутого или меньшего тела, а A есть площадь замкнутого тела.

Пример 10. Стальная трубка ($\phi = 2,5 \text{ см}$) для отбора газовых проб помещается концентрически внутри другой стальной трубки, так что вода, охлаждающая ее, может циркулировать в кольцевом сечении. Трубки вдвинуты в печь на 1 м. Вся система вкладывается в мартеновскую печь, под и стены которой находятся при 1500°°C и где средняя скорость газа равна $4,5 \text{ м в сек.}$ при 1800°°C . Узнать, сколько должно быть пропущено воды при 20°°C , если температура отходящей воды поднимается до 100°°C .

Решение. Основная величина — 1 м^2 наружной поверхности трубки.

Средняя температура трубки

$$\frac{20 + 100}{2} = 60^\circ \text{°C}.$$

¹ В этом уравнении абсолютная температура разделена на 100 перед возведением в четвертую степень исключительно для удобства, т. е. для избежания слишком больших чисел [Иначе постоянная (константа) должна была бы делиться на 100 000 000].

Так как степень черноты окисленного железа 90%, то тепло, передаваемое трубке через лучеиспускание (уравн. 44), равняется 434 000 б. кал./час./м².

Так как газы в топке имеют температуру 1800 °С, а при этой температуре скорость их 4,5 м в секунду, то тепло, передаваемое через пленку газов к внешней стороне трубки, может быть выражено уравнением:

$$\frac{Q_n}{A\Theta} = h_G \Delta t,$$

в котором значение h_G получается из уравнения (37).

Тепло, переданное таким образом, доходит только до 24 550 б. кал./час./м²; оно оказывается незначительным по сравнению с 434 000 б. кал./час./м².

Так как удельная теплоемкость воды равна единице, а подъем температуры равен 100 — 20 = 80°, то подача воды к трубке в литрах в минуту должна быть равна:

$$\frac{458\,500}{80 \cdot 60} = 95,5 \text{ л/мин. при охлаждении } 1 \text{ м}^2.$$

Размеры трубки должны быть выбраны таким образом, чтобы это количество воды могло протекать при наименьшем напоре. Так как внешняя стальная трубка в 25,4 мм, то на длине в 1 м (в топке) ее внешняя поверхность равна 0,08 м, что требует 7,65 л воды в 1 минуту.

Дополнительное пояснение дано ниже, см. „Поправки на лучеиспускание в пирометрин“.

Случай III. Промежуточные случаи. Полное лучеиспускание, распространяемое каждым из двух тел, не зависит от среды и может быть вычислено при помощи уравнения (42а); лучи, полученные каждым телом, есть полная радиация, испускаемая другим телом, исправленная для средней величины телесного (сферического) угла. Чистая радиация, имеющая место в результате взаимного обмена между двумя телами, может быть в таком случае вычислена как разность. Вычисления такого рода очень сложны и на практике обычно заключают в себе грубые приближения. В силу этих причин здесь не дано примеров.

Случай IV. Два тела, соединенные третьим при промежуточных температурах. Есть много случаев, при которых тело, излучающее тепло, и тело, принимающее его, соединяются посредством стен при промежуточных температурах: поверхность этих соединяющих стен должна учитываться при сравнении поверхности теплых и холодных тел. Важным примером этого случая служит паровой котел, нагреваемый за счет сжигаемого угля.

Большая часть тепла развивается внутри топки, и большая часть этого тепла передается паровому котлу при помощи лучеиспускания. Однако стены кладки имеют поверхность довольно обширную сравнительно с поверхностью слоя топлива, а часто также по сравнению с обогреваемой поверхностью парового котла.

Некоторая часть энергии, излучаемая слоем горючего, направляется прямо к паровому котлу, но большая часть его согревает стены установки, при этом часть отражается к другим точкам установки или к паровому котлу или к топке, где и поглощается. Это поглощенное тепло доводит стены до каления, и так как стены плохие проводники, то большая часть энергии возвращается обратно через лучеиспускание. Часть ее идет непосредственно к паровому котлу, другая часть к другим частям стен, а остаток лучеиспускания к самой топке. Тем не менее в этом случае разница в температуре между топкой и паровым котлом так велика, что сумма тепла, возвращенного в топку, незначительна по сравнению с ушедшим из топки теплом. Следовательно, тепло, получаемое посредством лучеиспускания, может быть рассматриваемо с достаточной для практических целей точностью без принятия во внимание результатов отражения и лучеиспускания стены, а с учетом только лучеиспускания его с поверхности горючего. При этом несущественно, применять ли уравнение случая I или II, так как топка имеет приблизительно 90% „черноты“

черного тела, и возвращенное лучеиспускание слишком незначительно и может иметь значение лишь как поправочный фактор.

Американское Горное бюро¹ произвело ряд опытов, при которых паровой котел системы Гейне (Heine) нагревался топкой, помещенной приблизительно на расстоянии около 12 м от парового котла и соединенной с ним посредством горизонтального дымохода из огнеупорного кирпича, сечением 1×1 м.

В различных точках этого дымохода были вставлены пирометры. Рис. 41 дает показания этих пирометров в различных точках на протя-

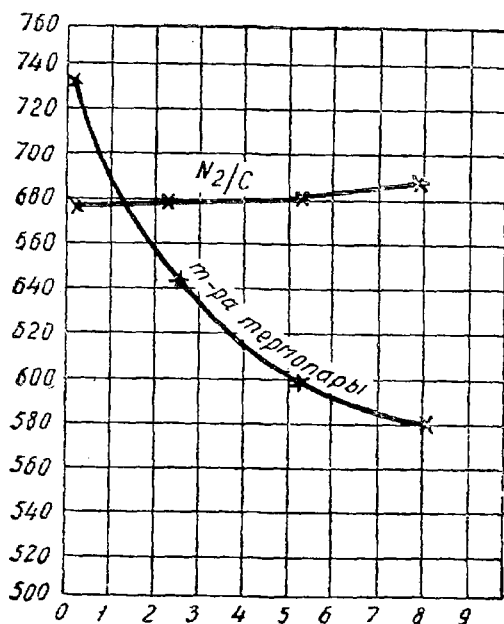


Рис. 41. Диаграмма, показывающая градиент излучения в дымовой трубе печи. Абс. — Расстояние от решетки в м. Орд. (слева) — Температура в °C по термопаре. Орд. (справа). Отношение N_2/C (в дымовых газах).

жении дымохода. В дымоходе наблюдается приблизительно 20% присоса воздуха к газам, а падение температуры составляет приблизительно 210%. Это падение температуры на протяжении дымохода, как это отмечено разными исследователями, объясняется так называемым „градиентом радиации“. Энергия лучеиспускается из самой топки в первую часть дымохода, развивая в нем очень высокую температуру. Отсюда энергия лучеиспускается дальше вниз по дымоходу, но так как чистое лучеиспускание имеет то же направление (ур. 44), то температуры там должны быть ниже. Кроме того энергия излучается дальше вниз по дымоходу от стены к стене.

Из дальнейшего будет ясно, что показания этих пирометров не будут давать точно температуру газа в том или другом месте (см. стр. 117).

Тем не менее они будут очень близки к температуре стен дымохода, но не тождественны с ней, так как кончик пирометра обращен к печи и паровому котлу более непосред-

ственно, чем к стенам, и так как скорость газа в центре дымохода больше, чем у стен.

Рассмотренный случай, конечно, сложный, но данные иллюстрируют очень ясно механизм передачи тепла посредством лучеиспускания от теплого тела через проход с несколько низшей температурой к более холодному телу. Для этих случаев нельзя дать определенного уравнения; каждый случай надо рассматривать отдельно или разрешать посредством подходящих приближений.

В. Лучеиспускание между твердыми телами и газами

Как уже отмечено, способность излучения газов невелика по сравнению с твердыми телами. Кроме того лучеиспускание газов, как известно, идет полосами ограниченной ширины, при чем длина волны полосы характерна для рассматриваемого газа. Следовательно, обмен лучеиспусканием между газами и твердыми телами незначителен по сравнению с лучеиспусканием между двумя твердыми телами при разных температурах, если газы имеют приблизительно ту же температуру, что и твердые тела.

¹ U. S. Bureau of Mines, Bull. 135, 1917.

Но если чрезвычайно горячие газы соприкасаются с относительно холодными твердыми телами, то тепло, передаваемое от газов к твердым телам через лучеиспускание, может быть значительным по сравнению с количеством тепла, передаваемым посредством теплопроводности, или конвекции.

Когда h_c — передача конвекцией — велика, тогда лучеиспускание от газов обычно бывает мало по сравнению с тем теплом, которое передается через конвекцию.¹

Г. Поправки на лучеиспускание в пирометрии

Обыкновенный ртутный термометр или термоэлемент часто употребляется для измерения температуры газа, заключенного в каком-либо объеме илидвигающемся в трубопроводе, когда температура окружающей среды отличается от температуры газа. При этих условиях термометр будет показывать кажущуюся температуру газа, промежуточную между температурой газа и окружающей среды; если газ будет теплее стены, то показание термометра будет ниже истинной t° газа, а если стена будет теплее газа, то показание будет выше. Факторы, которые могут являться причиной крупной ошибки, следующие: большая разница между истинной температурой газа и окружающей средой, высокая температура либо термометра, либо среды и низкая скорость газа.

Определение ошибки можно иллюстрировать таким примером: термopара вставлена в газовый поток, проходящий через трубу; стенки трубы горячее, чем газ,—при этом действительная температура стенок и газа остается постоянной. В этом случае стенки излучают на термоэлемент тепло, которое стремится поднять температуру термоэлемента, но последний передает тепло газовому потоку путем теплопроводности сквозь газовую пленку на элементе и оттуда путем конвекции ко всему потоку газа. Оба эти противоположные явления быстро уравниваются, вследствие чего устанавливается постоянное показание на термометре. При таком условии динамического равновесия скорость теплового потока лучеиспусканием должна точно равняться скорости теплопроводности и конвекции, так как иначе температура элемента должна была бы изменяться. Способ вычисления прост: необходимыми данными наблюдения являются температуры стенок и термоэлемента и скорость газа; последней пользуемся при вычислении коэффициента h_c между газом и элементом. Вспомогательными данными являются относительная чернота ρ элемента и уравнение, из которого может быть определено h_c . К сожалению, данные, относящиеся к значениям величины ρ , для стеклянного термометра недостаточны, и поэтому точное вычисление невозможно. Тем не менее оценка ошибок чрезвычайно важна, так как они могут в некоторых случаях доходить до многих сотен градусов. Для обыкновенного стеклянного ртутного термометра величина ρ принимается равной 0,60, в то время как для термоэлементов, покрытых слоем окиси, рекомендуется брать ρ равным 0,90. Для определения h_c предлагается уравнение (37) для воздуха или топочного газа.

Пример 11. Температура воздуха в некоторой точке доменной печи измеряется следующим образом: термоэлемент, введенный в газовый поток, показывает 650°C ; температура соседних кирпичей, определенная посредством оптического пирометра, равна 700°C . Воздух входит в основание печи при 21°C со скоростью 1,2 м в секунду. Внешний диаметр термоэлемента равняется 12,7 мм. Определить, какова действительная температура воздуха в месте положения термopары.

При установившихся постоянных условиях чистое излучение, полученное термоэлементом от более горячих стенок, уравнивает потерю тепла термоэлементом путем конвекции к более холодному воздуху. Считая действительную температуру воздуха равной $t^{\circ}\text{C}$ и принимая

¹ *Shack*, Zts. f. Tech. Phys., 5 (1924), 266. *Hottel*, Ind. Eng. Ch., 19, 8, 888. Mech. Eng. 48 № 10 (1926), 1047.

для термоэлемента 90% черного тела (в зависимости от окисления его поверхности), получаем на основании уравнения (44) и (26)

$$\frac{Q_n}{A\theta} = 0,9 \cdot 4,96 [(9,73)^4 - (9,23)^4] = h_G (650 - t).$$

h_G получается из уравнения (37). Для этого уравнения

$$v = \frac{1,2 \cdot 273 \cdot 29}{294 \cdot 22,4} = 1,44 \text{ кг в сек. на м}^2,$$

так что $h_G = 31,4$. Откуда истинная температура газа в данной точке = 410°C , что совершенно тлочно от кажущейся температуры 650°C .

Д. Упрощенное уравнение лучеиспускания: первая степень разности температур

Когда теплое тело, незначительное по величине сравнительно со средней, подвергается действию более холодного газа, оно теряет тепло не только путем теплопроводности и конвекции через газовую пленку на его поверхности, но также путем лучеиспускания в окружающую среду по уравнению (44). Полная потеря тепла поэтому может быть определена сложением уравнений (26) и (44).

$$\frac{Q_n}{A\theta} = h_G \Delta t + p_1 \cdot 4,96 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \dots \dots \dots (45)$$

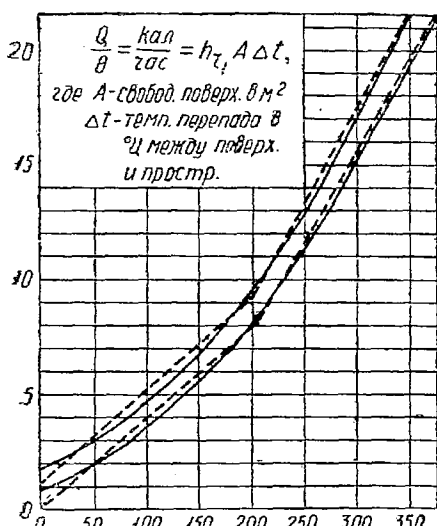


Рис. 42. Коэффициент лучеиспускания h_r от сравнительно небольшого черного тела в пространство. Абс. — Температура тела в $^\circ \text{C}$. Орд. — h_r в б. кал./м²/час./ $^\circ \text{C}$.

Так как этот случай есть пример параллельного потока, то было бы более удобно вычислять потерю тепла посредством уравнения

$$\frac{Q_n}{A\theta} = (h_o + h_r) \Delta t, \dots \dots \dots (46)$$

где Δt есть разность температуры между поверхностью теплового тела и стенками замкнутого пространства, а h_r есть коэффициент радиации для уравнения (46).

Его можно вычислить, предполагая, что для определенного интервала температур уравнение четвертой степени приближенно может быть сведено к простой пропорциональности разности температур $\frac{Q_n}{A\theta}$ (только через излучение) = $p_1 \cdot c [(T_1 : 100)^4 - (T_2 : 100)^4] = h_r \Delta t$; решая относительно h_r , находим:

$$h_r = \frac{p_1 c}{t_1 - t_2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \dots \dots \dots (47)$$

Рис. 42 показывает, что для черного тела, небольшого по объему сравнительно со стенками, величина h_r увеличивается вместе с температурой черного тела, когда стенки замкнутого пространства имеют температуру 375° и ниже.

Итак, пусть для абсолютно черного тела имеем некоторое значение h_r . Тогда для тела, имеющего относительный коэффициент черноты p , получим лучеиспускание ph_r , как это показано на рисунке.

Е. Коэффициент потери тепла поверхностью путем излучения и конвекции ($h_o + h_r$)

Рис. 43 показывает величину этого суммарного коэффициента для неизолированных труб при 21°C . Этот коэффициент возрастает, однако, не

прямо пропорционально разности температуры между поверхностью трубы и пространством.

При применении полулогарифмической бумаги график сводится к прямым линиям, как показано на рис. 43, что делает экстраполяцию вполне надежной. Хотя эти данные были установлены для обнаженных труб, которые благодаря слою окиси имели вероятно 90% черноты, тем не менее они могут быть использованы как приближенные для трубок с изоляцией, где p также приблизительно равно 0,90.

Пример 12. Определить потерю тепла за время в 24 часа дюймовой (2,5 см) стальной, паропроводной трубой длиной в 30,5 м, если температура трубы 188°C, а окружающего пространства 21°C.

Решение. Как показано на рис. 43, $h_c + h_r$ равняется 19,6. Из уравнения (46) находим:

$$Q = 24 \cdot 19,6 \cdot 0,0334 \cdot 3,14 \cdot 30,5 (188 - 21) = 250\,000 \text{ кал.}$$

Так как влияние диаметра трубопровода на суммарный коэффициент не указано, то можно провести дополнительные линии для других диаметров, которые будут достаточно точны в приближенном расчете.

Пример 13. Вычислить перепад температуры от пара к внешней поверхности трубы в предыдущем примере.

Решение. Основания: величина 1 м² внешней поверхности трубы.

Согласно уравнению (46),

$$\frac{Q}{A\theta} = (19,6) (188 - 21)$$

Это тепло проходит сквозь конденсированную паровую пленку и затем сквозь стенку трубы.

$$\frac{Q}{A\theta} = \frac{T_{\text{пара}} - T_{\text{трубы}}}{\frac{1}{h_1 \cdot A_1} + \frac{1}{k_2 A_2}}$$

В настоящем случае h_1 для паровой пленки $\alpha_{\text{жн}} = 9800$

$$A_1 = 0,026 : 0,0334 (1) = 0,799 \text{ м}^2.$$

Толщина стенки = 0,133, $k = 25,0$, и средняя величина поверхности

$$A_2 = 0,5 (0,0334 + 0,026) : 0,0334 = 0,902 \text{ м}^2,$$

откуда понижение температуры от пара к внешней трубе = 0,72°C.

В предыдущей задаче, следовательно, пар был при 188°, и только 0,72° общего понижения (167°) было обязано суммарному сопротивлению пленки сконденсированного пара и металлической стенки. В других случаях, например, в поверхностном конденсаторе для пара, другие виды сопротивления не так значительны по сравнению с сопротивлением пленки пара, и понижение температуры в этой пленке обнаруживается значительно большее, чем в предыдущем случае.

Ж. Основания оптической пирометрии

При очень высоких температурах лучеиспускание от всех тел бывает почти одинаково с лучеиспусканием абсолютно черного тела, а лучеиспускание от тела в совершенно замкнутом пространстве, находящемся при измеряемой температуре, совсем не отличается от „черного“ лучеиспускания.

Отверстие в окружающее пространство, при условии незначительной его величины, не влияет заметным образом на лучеиспускание. Это делает возможным применять лучеиспускание черного тела для измерений высоких температур, т. е. испускаемая энергия может употребляться как количественная мера температуры.

Полное лучеиспускание может быть определено посредством балометра или, что еще более удобно, общее количество энергии, исходящее

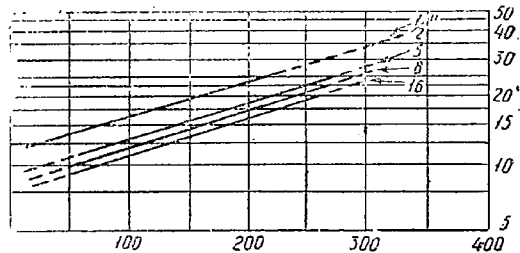


Рис. 43. Коэфф. теплопередачи путем радиации и конвекции ($h_c + h_r$) от неизолированных труб в пространство при 20 °C. Абс ΔT = разность температур. Орд. $h_c + h_r = 6$ кал./м²/час./°C.

от некоторых определенной длины волны, взятых из видимого спектра¹ может быть измерено посредством фотометрических способов (пирометр Ваннера). Возможно также сопоставлять степень накала топочного пространства с накалом электрической лампы и определять температуру по расходу электрического тока. Накал быстро белеет при высоких температурах, благодаря большому преобладанию голубых лучей.

Известны также и многие другие методы, которые до сих пор не применялись на практике, например, определение длины волны наибольшей энергии. Эта длина волны быстро уменьшается с поднятием температуры.

IV. Логарифмическое среднее разности температур

Случай I, при котором разность температур между двумя телами, обменивающимися теплом, меняется с течением времени. При переходе тепла от одного тела к другому через некоторое сопротивление, количество переходящего тепла пропорционально разности температур, т. е. $\frac{Q}{\Theta} = \frac{\Delta t}{R}$. Когда разность температур между двумя телами, от которого и к которому тепло движется, меняется с течением времени, то истинная средняя разность температур для рассматриваемого промежутка времени дается следующим выражением:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log_{10} \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}, \dots \dots \dots (52)$$

где Δt_1 — начальная, а Δt_2 — конечная разность температур.

При выводе этого уравнения, приведенного на стр. 128—129, сделаны следующие допущения.

1. В каждый данный момент каждая часть обоих тел: того, от которого тепло уходит, и того, к которому тепло передается, имеет одинаковую температуру. Такие условия имеют место только в металлах и жидкостях. В металлах теплопроводность так велика, что температура всех частей металла во всякое время практически одна и та же. В жидкостях, хотя их теплопроводность и невелика, выравнивание температуры быстро достигается благодаря конвекционным токам.

2. Теплоемкость каждого тела постоянна в рассматриваемом температурном интервале.

3. Сопротивление потоку тепла постоянно во все время процесса.

4. Калорийная емкость стенки незначительна по сравнению с общим тепловым запасом тела, к которому тепло идет и от которого тепло исходит.

Несмотря на то, что не все эти допущения при применении на практике безусловно верны, особенно 3-ье, тем не менее это логарифмическое среднее уравнение является хорошим приближением для средней разности температур во всех случаях периодического нагревания или охлаждения.

Например, при погружении стальных полосок в масло, разность температур между сталью и маслом высока в начале и значительно меньше в конце. Подобные начальные и конечные условия имеют место и в том случае, когда холодная жидкость нагревается в периодически действующем подогревателе¹ змеевиком (глухой пар).

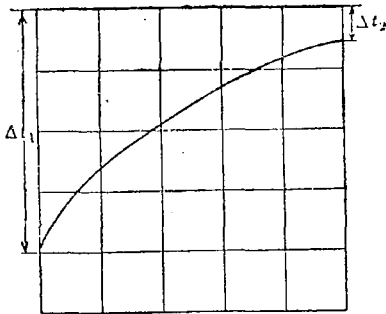
Случай II, при котором разность температур меняется в различных точках аппарата. То же логарифмическое среднее уравнение дает истинную среднюю разность температур и в случае, если разность температур постоянна в отношении времени, но изменяется

¹ Подогреватель, в котором нагреваемая жидкость не добавляется и не удаляется до конца нагрева, называется периодическим в отличие от непрерывно действующего, где жидкость непрерывно подводится и удаляется.

в пространстве (см. рис. 44 и 45). Это значит, что разность температур во все время величина постоянная в любой точке системы, но меняется в зависимости от места выбранного сечения. В этом случае, если разность температур между двумя средами, текущими непрерывно через систему, обозначить через Δt_1 на одном конце и через Δt_2 на другом конце, то истинная средняя температура во все время для всей системы будет как и раньше:

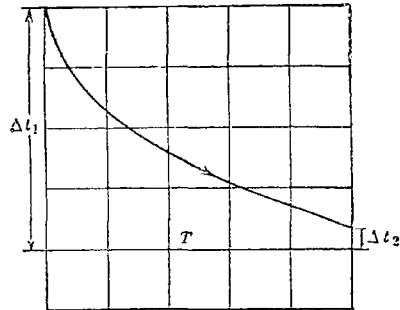
$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \lg_{10} \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \dots \dots \dots (52)$$

Ограничения для данного случая остаются теми же, что и для случая I:



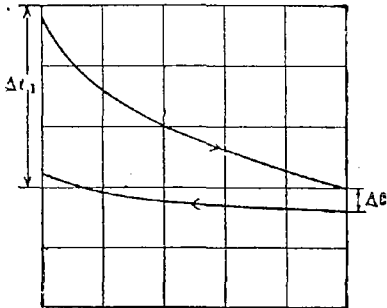
А. Перегреватель или конденсатор.

$T = \text{const.}$

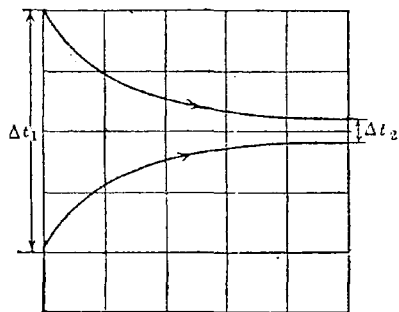


Б. Охлаждение одной жидкости путем испарения другой.

Рис. 44. Средняя логарифмическая разность температур. Абс. — Длина аппарата. Орд. — Температура.



А. Параллельное течение при теплообмене.



Б. Противоточное течение при теплообмене.

Рис. 45. Средняя логарифмическая разность температур. Абс. — Длина аппарата. Орд. — Температура.

1. В любом поперечном сечении аппарата, перпендикулярном к направлению движения тел, разность температур должна оставаться постоянной, хотя она изменяется в зависимости от места.

2. Теплосмкость (не запас тепла в целом) каждого тела должна быть постоянной в рассматриваемом интервале температур тела.

3. Сопротивление тепловому потоку в каждой точке аппарата должно быть одно и то же.

Вывод уравнения для данного случая подобен выводу для случая, когда разность температур изменяется с течением времени.

Как и в предыдущем случае, все допущения не являются безусловно точными, но это логарифмическое выражение для средней разности температур двух тел довольно точно и имеет широкое применение в задачах на теплопередачу.

Например, рассмотрим аппарат, в котором подогретое нефтяное масло охлаждается от 150 до 25° Ц водой, текущей встречным потоком, вли-

ваясь при 20°C и выливаясь при 70°C. Разности температур в конечных точках прибора будут 80 и 5°C, так что согласно уравнению (52)

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{80 - 5}{2,3 \lg_{10} \frac{80}{5}} = 27,1^\circ\text{C}.$$

Обыкновенное арифметическое среднее дает 42,5 °C, т. е. на 57% больше, чем более точная величина 27,1°C.

Δt есть разность температур в некоторой точке в аппарате непрерывного действия или в некоторый момент в аппарате периодического действия. Истинную среднюю разность неправильно вычислять, как разность средних логарифмических температур двух потоков.

Например, в предыдущем примере соответствующие логарифмические средние температуры масла и воды равны 69,9°C и 39,9°C, и разность их 30°C.

Логарифмическая средняя разность температур с вышеупомянутыми ограничениями обычно применяется в расчетах следующего оборудования: при проектировании холодильников или нагревателей для газов и жидкостей, регенераторов и рекуператоров, печей, идущих на горячих газах, паровых котлов, при питании их нагретой водой, теплообменников, экономайзеров, сушилок, увлажнителей, конденсаторов, при охлаждении и разогреве печей периодического действия.

Нужно отметить, что логарифмическая средняя разность температур всегда меньше средней арифметической:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2} \dots \dots \dots (52a)$$

При помощи подстановки в урavn. (52) найдено, что когда отношение разностей температур меньше двух, то средняя арифметическая величина только на 4% больше логарифмической.

Так как этой приблизительной точности достаточно для большинства технических расчетов, связанных с тепловым потоком, то в таких случаях, когда отношение разностей температур не больше двух, может быть применима средняя арифметическая, даже если средняя логарифмическая теоретически применима.

V. Сводка уравнений, табличных данных и переводных множителей

Приводимая сводка помещается для пользования ею при решении задач. Она включает в себе наиболее важные уравнения, таблицу обозначений с соответствующими числовыми значениями в CGS единицах, собрание наиболее важных данных и соответствующих переводных множителей.

Сводка наиболее важных уравнений

Передача тепла от одной жидкости к другой сквозь плоскую стенку или трубу

$$\frac{Q}{\Theta} = \frac{\Delta t}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2} + \frac{1}{h_3 A_3}} = \frac{\Delta t}{R} \dots \dots \dots (27)$$

Примеры приложения этих уравнений были даны:

От	Через	К	Страница
движущейся жидкости	металл	движущейся жидкости	101
конденсирующегося			103
водяного пара	металл	кипящей жидкости	
движущегося газа	металл	движущейся воде	103
конденсирующегося			108
водяного пара	металл	движущемуся воздуху	
конденсирующегося пара	металл	движущейся воде	110

Передача тепла от одной жидкости к другой чрез сложные стенки

$$\frac{Q}{\Theta} = \frac{\Delta t}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2} + \frac{L_3}{k_3 A_3} + \frac{L_4}{k_4 A_4} + \frac{1}{h_5 A_5}} = \frac{\Delta t}{R} \dots \dots \dots (27a)$$

Уравнения для поверхности теплопередачи

Для плоских стен $A = A_1 = A_2$.

Для стен кольцевого сечения, где внешний диаметр не больше удвоенного внутреннего,

$$A = \frac{A_1 + A_2}{2} \dots \dots \dots (10a)$$

Для стен кольцевого сечения, где внешний диаметр больше удвоенного внутреннего,

$$A = \frac{A_2 - A_1}{2,3 \lg_{10} \frac{A_2}{A_1}} \dots \dots \dots (10)$$

Для тел формы прямоугольных параллелепипедов, у которых стенки более, чем в два раза толще наименьшего внутреннего измерения, должны применяться уравнения, установленные Лангмюром (см. стр. 91—93).

Уравнения для разности температур

где Δt изменяется, но Δt_1 не больше, чем удвоенное Δt_2 , т. е. $\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \leq 2$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2}, \dots \dots \dots (52a)$$

где Δt изменяется и $\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} > 2$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \lg_{10} \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \dots \dots \dots (52)$$

Перечисление случаев, при которых это уравнение может быть применено, приведено на стр. 122.

Тепловой поток, полученный одним лучеиспусканием в том случае, когда тело велико по сравнению с окружающей средой

$$\frac{Q_n}{\Theta} = \frac{cA \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} - 1} \dots \dots \dots (43)$$

Тепловой поток, полученный одним лучеиспусканием в том случае, когда тело мало по сравнению с окружающей средой

$$\frac{Q_n}{\Theta} = p_e cA \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \dots \dots \dots (44)$$

Применение см. по примеру на стр. 114.

Если температура излучаемой поверхности ниже 380°C , то удобнее выражать потерю лучеиспускания посредством упрощенных методов, даваемых на стр. 118—119.

Весь тепловой поток (включая лучеиспускание) для любого случая

Смотря по обстоятельствам, этот случай может быть представлен в одной из следующих комбинаций уравнений: (27) плюс Q/Θ , вычисленное из (43) или из (44).

Применение см. на стр. 114 и след.

Сводка наиболее важных данных

Теплопроводность сквозь твердое тело при известной толщине его (см. таблицу, стр. 125—126).

Теплопередача от твердых тел к газам

От поверхности твердого тела к неподвижному воздуху, естественная конвекция

От вертикальных стен в пространство при 21°C.

$$h_g = 3,4 + 0,024\Delta t, \text{ для величин } \Delta t \text{ от 5 до } 260^\circ\text{C} \dots (34)$$

Для конвекции вверх от горизонтальных стен следует увеличить величину, получаемую из (34), на 10%.

Для конвекции вниз от горизонтальных стен следует уменьшить (34) на 50%.

Для газов, движущихся турбулентным потоком внутри трубок или в кольцеобразных пространствах

$$h_g = \frac{0,22 C_p T^{0,66} (\nu)^{0,8}}{D^{0,2}} \dots (35)^1$$

Для воздуха, движущегося турбулентным потоком перпендикулярно к отдельным трубкам

$$h_g = \frac{\gamma v^n T^{1/3}}{1,5 \cdot (4,86)^n \cdot D^{0,53}}, \dots (37)^2$$

где $n = 0,73 + 0,08 \log 0,04D$. Данные для труб, расположенных в шахматном порядке, даны на стр. 107.

Твердые тела—жидкости (не кипящие)

При естественной циркуляции (важными переменными являются: разность температур, вязкость, теплопроводность жидкости, форма сосудов и характер нагреваемой поверхности).

Для воды $h = 245$ до 1470 ; см. также уравн. (30) стр. 98.

Для более вязких жидкостей $h = 49$ до 245 .

При форсированной циркуляции жидкостей свыше критической скорости, см. рассуждения и данные на стр. 99 и следующих.

Твердые тела—жидкости (кипящие)

В отношении пленок сделано мало прямых наблюдений. На основании найденной величины ($K = 888$ до 4400) для общего коэффициента передачи тепла от насыщенного пара чрез металлическую стенку к кипящей жидкости установлено, что частный коэффициент жидкой пленки между стеной и кипящей жидкостью колеблется от 980 — $19\,600$, в зависимости от

- разности температур между металлом и жидкостью,
- устройства нагреваемой поверхности,
- состояния нагреваемых поверхностей, т. е. покрыты ли они кристаллами, налетом и т. д.,
- вязкости и плотности кипящей жидкости,

¹ Уравнение 35 основано на данных для воздуха, углекислоты и светильного газа при следующих условиях:

и от 10 до 300 кг в 1 сек. на 1 м² свободной площади, D от 1 см до 10 см; T_f от 100 до 650°C . См. стр. 105.

² Уравнение 37 основано на данных для воздуха при следующих условиях: и от 2 до 100 кг в 1 сек. на 1 м² свободной площади, D от $0,5$ см до 5 см, T от 75 до 525° .

д) размешивания жидкости или циркуляции посредством насоса.

Для данных при эмалированных аппаратах, нагреваемых паром или горячим маслом (нефтью), см. стр. 103.

Конденсирующийся пар—твердое тело

Данные для пара только примерные. Коэффициент для пленки конденсирующегося пара колеблется от 15 000 до 50, по мере того как процент не конденсирующегося газа в паре изменяется от 0 до 100%. Для пара, заключающего немного воздуха, как показывает практика, $h_n = 9\,800\text{—}10\,000$. Для других паров, как приближение, $h_n = 7\,200\text{КД}$.

Теплопроводность жидкостей¹

В 1893 г. Вебер (H. F. Weber)² вывел соотношение между удельной теплопроводностью k жидкостей, удельной теплоемкостью s , удельным весом δ и молекулярным весом M : именно $k = 1,28 \text{ cs} \sqrt[3]{\frac{s}{M}}$. Таким образом, величина k для воды, выводимая на основании этого уравнения, оказывается равной: $k = 1,28(1)(1) \sqrt[3]{1/18} = 0,49$, что вполне согласуется с величиной 0,52, даваемой Бриджменом (Bridgman) для 29°C (см. таблицу г, стр. 126).

При увеличении температуры от 29°C до 75°C, Бриджмен нашел, что для 11 различных жидкостей k незначительно уменьшалось, но для воды k увеличивалось на 70%.

Коэффициент теплопроводности³

$$k = \text{б. кал./м}^2\text{/час./}^\circ\text{Ц}$$

а) Металлы

М а т е р и а л	Температура опыта в °Ц	k	№ справоч- ного издания, указанного в примечании
Алюминий	0—100	127	1
Латунь желтая	0—100	82	1
Медь чистая	при 20	354	1
Железо:			
чистое	при 25	55	1
обработанное	0—275	60	1
чугун 3,5 %С	при 30	53,5	1
Свинец	при 19	30	1
Никкель	20—200	48	1
Платина	18—100	61	1
Серебро	при 18	36,2	1
Сталь	при 28	3,7 ⁴	1
Олово	при 0	32	1
Цинк	при 18	95	1

¹ Mc Adams and Frost, J. Ind. Eng. Chem., 14 (1922). 16.

² Wied. Ann., 48 (1893), 173.

³ Наличие примесей, особенно в металлах, может изменить коэффициент проводимости почти на 100%.

⁴ Это наименьшая величина, обычно цитируемая.

б) Не металлы

Материал	Температ. опыта, в °C	k	№ справоч- ного издания, указанного в примечании
Асбест	38—550	0,18	2
Кирпич:			
карбурядовый	при 1000	8,4	2
строительный	при 1000	1,2	2
кизельгуровый	при 1000	0,6	2
Sil-O-Cel	при 1000	0,045	2
Кирпич оштукатуренный		0,6 ¹	
Портланд-цемент чистый	при 35	0,75	2
Пробка	54—200	0,045	2
Уголь дуговых ламп	100—950	47 ²	2
Стекло, кремнь	10—15	0,45	2
Инфузорная земля	при 50	0,075	2
Кожа	22—36	0,15	1
Шлаковая шерсть	21—177	0,045	2
Магнезия	20—154	0,06	2
Резина	при 104	0,15	1
Песок	20—154	0,3	2
Дерево, соста:			
параллельно волокнам		0,105	1
перпендикул. к волокнам		0,03	1

1. Landolt-Börnstein, Tabellen. 1905 Ed.

2. Carl Hering, Met. and Chem. Eng., 9, 652 (1911).

в) Газы

	k		№ справочного издания, указанного в примечании
	при 0°C	при 100°C	
Воздух	0,0204	0,0260	3
Окись углерода	0,0195	—	3
Углекислота	0,0120	0,0180	3
Кислород	0,0206	0,0268	3
Азот	0,0206	0,0260	3
Водород	0,132	0,183	1
Метан	0,0260	—	3 *
Пар водяной	0,0141	0,0192	3 *

1. Landolt-Börnstein, Tabellen. 1905 Ed.

2. Carl Hering, Met. and Chem. Eng., 9, 652 (1911).

3. Smithsonian, Tables, 217, 1920 Ed., Smithsonian Inst., Washington, D. C.

* Средняя из величин, даваемых разными авторами.

г) Жидкости

	k		№ справочного издания, указанного в примечании
	при 30 °C	при 75 °C	
Нормальн. пентан	0,116	0,110	4
Керосин	0,128	0,121	4
Петролейный эфир	0,112	0,109	4
Метанол	0,182	0,177	4
Этанол	0,155	0,149	4
Изопропанол	0,133	0,131	4
Нормальный бутанол	0,145	0,140	4
Изоамиловый спирт	0,128	0,125	4
Этиловый эфир	0,118	0,112	4
Ацетон	0,154	0,145	4
Сероуглерод	0,137	0,130	4
Вода	0,518	0,555	4

4. Bridgman, Proc. Am. Acad. Arts. Sci. 59, № 7 (декабрь 1923), 141.

¹ Среднее из результатов из разных источников² Коэффициент проводимости этого материала другими исследователями дан лишь в 10% от приведенной величины

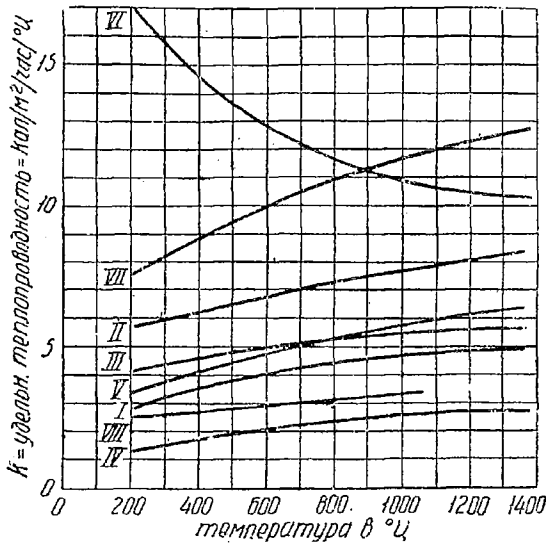


Рис. 46. Теплопроводность кирпичей в зависимости от температуры (Norton).¹

Кривая	Материал	Процент пористости
I	Специальный кирпич	—
II	Каолиновый кирпич (огнеупорный). .	10,9
III	Каолиновый кирпич	23,2
IV	Каолиновый кирпич	49,1
V	Силикатный кирпич	30,4
VI	Магнезитовый кирпич	31,6
VII	Плавленый глиноземный кирпич . .	21,
VIII	Бетонная стена (1:2:4) смесь .	—

Коэффициент лучеиспускания твердых тел при температуре ниже 1000° К.

Идеальное черное тело 1,0

а) Металлы

	Средняя величина = p	№ справоч. изд., указан. в примечании
Железо, литое и полированное	0,22	1
Железо оксидированное	0,62	1
Железо или сталь полированные	0,20	2
Железо или сталь сильно оксидированные	0,90 *	—
Медь полированная	0,10 *	—
Медь калоризированная (покрытая алюминием)	0,26	1
Медь оксидированная	0,72	1
Алюминий крашеный	0,50	1
Золото, покрытое эмалью	0,37	1
Монель-металл (сплав меди с никкелем)	0,43	1
Серебро	0,03	1
Золото полированное	0,05 *	
Латунь блестящая	0,07 *	
Латунь тусклая	0,23	2
Цинк блестящий	0,10 *	
Цинк тусклый	0,22	
Олово полированное	0,10 *	
Никкель	0,35 *	
Ртуть	0,23 *	
Платина	0,24 *	

1. Langmuir, Trans. Am. Electrochem. Soc. 23 (1913)

2. Wamsler, Mitteilungen über Forschungsarbeiten, 98 (1911)

¹ G. H. Norton, Jour. Am. Cer. Soc., 10, № 1 (январь, 1922), 30.

* Средняя из величин, даваемых различными авторами.

б) Неметаллы

Коэффициент лучеиспускания большинства неорганических соединений (окиси, соли и т. д.) и органических соединений не известен точно. Можно предполагать, что большинство имеет 90% черноты, т. е. $\rho = 0,90$.

Переводные множители для коэффициентов

В американской и английской литературе все значения коэффициентов теплопередачи даются в „британских“ единицах, определенных как BTU в час./кв.фут./°F; фут толщины для коэффициентов теплопроводности k сквозь твердое тело и BTU в час./кв.фут./°F для поверхности или для коэффициента (h) „поверхностной“ пленки. Если коэффициент проводимости k выражен в CGS единицах, определяемых как г-кал./сек./см.²/°C/см. толщины, то эта CGS величина должна быть помножена на 242, чтобы перезести ее в вышеупомянутую английскую систему. С другой стороны, $1 \text{ BTU/час./фут./}^\circ \text{F} = 1,49 \text{ кал./час./м./}^\circ \text{C}$. $1 \text{ BTU/час./фут./}^2/\text{}^\circ \text{F} = 4,9 \text{ кал./час./м./}^2/\text{}^\circ \text{C}$.

Коэффициенты лучеиспускания для этих обеих систем были даны на стр. 114.

Вывод уравнения для логарифмической средней разности температур

Возьмем систему, в которой тепло из тела (температуры T) переходит в другое тело (температуры t) и у которой нет обмена тепла с окружающей средой. Для конкретности рассмотрим погружение горячего куска стали в масло, предполагая, что стенки сосуда, заключающего в себе масло, так хорошо изолированы, что потеря тепла в окружающую среду незначительна. Пусть вес стали будет W , а постоянная удельная теплоемкость C . В начале, когда время $\theta = 0$, температура стали равна T_1 , а в некоторый момент времени θ ее температура пусть будет T . Потеря тепла стали соответственно времени θ будет следовательно $WC(T_1 - T)$. Если удельная теплоемкость масла c , а вес w и оно нагревается от t_1 до t за время θ , то тепло, полученное маслом, равно $wc(t - t_1)$. Так как нет потери тепла в окружающее пространство, то потеря тепла стали равна теплу, полученному маслом:

$$Q = WC(T_1 - T) = wc(t - t_1) \quad \dots \dots \dots (a)$$

или

$$T = T_1 + \frac{wc(t_1 - t)}{WC} \quad \dots \dots \dots (б)$$

Согласно закону Ньютона, переданное тепло пропорционально площади, разности температур и времени

$$dQ = HA(T - t)d\theta = wcdt, \quad \dots \dots \dots (в)$$

где H равняется общему коэффициенту передачи тепла от стали к маслу и A есть площадь поверхности стали. Подставляя в (в) величину T , взятую из уравнения (б), и преобразуя, находим

$$\left(\frac{wc}{WC} + 1\right) \cdot \frac{HA d\theta}{wc} = - \frac{d\left[-\left(\frac{wc}{WC} + 1\right)t\right]}{T_1 + \frac{wct_1}{WC} - \left(\frac{wc}{WC} + 1\right)t} \quad \dots \dots \dots (г)$$

Интегрируя (г) в пределах от 0 до θ , соответственно t_1 и t , получаем

$$\left(\frac{wc}{WC} + 1\right) \frac{HA\theta}{wc} = -\ln_e \left[T_1 + \frac{wct_1}{WC} - \left(\frac{wc}{WC} + 1\right)t \right] + \ln_e \left[T_1 + \frac{wc}{WC} t_1 - \left(\frac{wc}{WC} + 1\right)t_1 \right] \quad \dots \dots \dots (д)$$

или

$$\frac{HA\Theta}{wc} = \frac{1}{\left(\frac{wc}{WC} + 1\right)} \ln_e \left\{ \frac{T_1 - t_1}{\left[T_1 - t_2 + \frac{wc}{WC}(t_1 - t_2)\right]} \right\} \dots \dots \dots (e)$$

Выражая через Δt_{cp} истинную среднюю температуру, имеем

$$Q = HA\Theta(\Delta t)_{cp} = wc(t_2 - t_1) \dots \dots \dots (ж)$$

или

$$(t_2 - t_1)(\Delta t)_{cp} = HA\Theta : wc \dots \dots \dots (з)$$

Уравнивая полную потерю тепла стали с теплом, приобретаемым маслом (нефтью) соответственно времени Θ , получим

$$WC(T_1 - T_2) = wc(t_2 - t_1), \dots \dots \dots (и)$$

или

$$\frac{wc}{WC} = (T_1 - T_2) : (t_2 - t_1) \dots \dots \dots (к)$$

Заменяя величину (з) и (к) в уравнении (е), получаем:

$$\frac{t_2 - t_1}{(\Delta t)_{cp}} = \frac{1}{\frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} + 1} \ln_e \left\{ \frac{T_1 - t_1}{T_1 - t_2 + \frac{(T_1 - T_2)(t_1 - t_2)}{t_2 - t_1}} \right\} \dots \dots \dots (л)$$

$$(\Delta t)_{cp} = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln_e \left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_2} \right)} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2, 3 \cdot \log_{10} \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \dots \dots \dots (м)$$

Принятые обозначения

Обозначения	З. н а ч е н и я	CGS единицы	Практические единицы
A	Площадь *	см ²	м ²
B	Постоянная величина	—	—
C	Коэффициент лучеиспускания	0,000137	4,96
C _p	Теплоемкость при постоянном давлении **	отношение	отношение
D	Внутренний диаметр трубы	—	—
d	Внешний диаметр изоляции	—	—
f	Постоянная величина	—	—
H	Суммарный коэффициент теплопередачи	м. кал./сек./см ² /°Ц	б. кал./час./м ² /°Ц
h	Коэффициент пленки	м. кал./сек./см ² /°Ц	б. кал./час./м ² /°Ц
h _r	Поверхностный коэффициент для лучеиспускания (в первой степени) (ур. 46)	м. кал./сек./см ² /°Ц	б. кал./час./м ² /°Ц
k	Коэффициент теплопроводности	м. кал./сек./см ² /°Ц	б. кал./час./м ² /°Ц
L	Расстояние ***	см	м
N	Полная длина	"	"
p	Относит. "чернота" по отношению к абс. "черному телу"	от 0 до 1	от 0 до 1
Q	Количество тепла	м. кал.	б. кал.
Q _а	Полное количество тепла	"	"

* Всегда берется под прямым углом к направлению движения тепла.

** Это может быть выражено как грамм-кал. (граммы/°Ц).

*** Всегда берется параллельно направлению движения тепла.

Обозначения	Значения	CGS единицы	Практические единицы
J	Текучесть жидкости (велич. обратн. вязкости по отношен. к воде при 20°C)	нет единиц	нет единиц
M	Средний молекулярный вес	отношение	отношение
T	Абсолютная температура	°C абс.	°C абс.
R	Сопrotивление суммарное	Э г	Θ г
г	Отдельное сопротивление пленки или стенки	$\frac{L}{k \cdot A}$ или $\frac{1}{n \cdot A}$	$\frac{L}{k \cdot A}$ или $\frac{1}{h \cdot A}$
s	Удельн. вес по отношен. к воде, как единице	отношение	отношение
t	Температура	°C	°C
Θ	Время	секунды	часы
Δt	Разность температур	°C	°C
u	Средняя линейная скорость	см/сек.	м./сек.
υυ	Средняя массовая скорость	г/сек./см ²	кг/сек./м ²
или υρ		своб. пл.	своб. пл.
v	Массовая скорость на линии центра трубы	г/сек./см ²	кг/сек./м ²
ρ	Плотность жидкости	г/см ³	кг/м ³
dQ	Приращение количества тепла		
dt	Приращение температуры		
dL	Приращение расстояния		
dQ	Приращение времени		

ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ОДНОРОДНОМ ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

Ранее были рассмотрены два основных случая теплопередачи: 1-ый случай, когда температура постоянна во времени в каждом данном сечении аппарата и различна для разных сечений, т. е. является функцией только расположения сечения, и 2-ой случай, когда температура оказывается функцией времени, но не места расположения сечения.

Возможен случай, при котором температурный градиент будет зависеть одновременно и от времени и от расположения сечения. В этих условиях расчет надо вести по общему дифференциальному уравнению для теплопередачи в однородном теле:

$$\frac{\partial t}{\partial \Theta} = \frac{k}{\rho C} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right).$$

Здесь x, y, z — оси прямоугольных координат, ρ — плотность в кг/см³, C — теплоемкость, t , как и раньше, — градусы Цельсия, Θ — время в часах, k — коэффициент теплопроводности в б. кал./час./м /°C.

Отношение $\frac{k}{\rho C}$ называется теплопроводностью тела и зависит от физических его свойств.

При интегрировании эту величину обычно обозначают через α^2 .

Это общее дифференциальное уравнение может быть проинтегрировано далеко не во всех случаях, но только для некоторых определенных форм тела и специальных поверхностных условий. Получаемые формулы очень сложны. Но они могут быть использованы для решения практических задач, если соединить переменные величины уравнений в безразмерные группы и представить искомые зависимости графически. Такие графики предложили, например, Гарней (Gurney) и Люри (Lurie) для процессов периодического нагревания и охлаждения шаров, цилиндров, пластин и т. п. Ими даны и конкретные численные примеры.¹ Для применения этих графиков необходимо знать численное значение суммарного коэффициента поверхностных тепловых потерь, т. е. $h_c + h_r$, о котором шла речь на стр. 118.

¹ Ind. Eng. Chem., 15, № 11, 1170 (ноябрь, 1923).

ГЛАВА V

ТОПЛИВО И ЭНЕРГИЯ

Главнейшими источниками энергии в промышленности служат топливо и водяная сила; главнейшими формами энергии является тепло, механическая энергия и электричество. Энергию, заключенную в топливе, всегда сперва превращают в тепловую энергию, которая может быть использована непосредственно, или ее превращают в механическую энергию при помощи паровой машины или двигателя внутреннего горения. Механическая энергия, в свою очередь, может быть превращена в электрическую энергию и, наконец, в химическую энергию или теплоту. Использование водяной силы осуществляется путем перевода ее в механическую энергию, которая может быть преобразована по желанию — в электрическую или тепловую энергию.

Основой важнейшего в промышленности топлива является углерод и его водородные соединения. Обычно различают: первичное или естественное топливо, как, например, дерево, бурый и каменный уголь, сырая нефть и природный газ, и вторичное или переработанное топливо — древесный уголь, кокс, жидкое топливо, водяной газ и газ из генератора. Другая часто встречающаяся классификация основана на характере топлива, т. е. будет ли оно твердым, жидким или газообразным. Все виды естественного топлива имеют общее происхождение и представляют из себя различные ступени преобразования, которому медленно подвергается растительное вещество при недостатке кислорода для полного окисления.

Эти виды топлива содержат углерод, водород, серу, азот, кислород и золу, при чем к последней причислены различные минеральные составные части (кроме серы). До сих пор еще окончательно неизвестно, как соединены между собою все эти элементы, но для расчетов удобно располагать результаты анализов в следующем порядке:

1. Влажность (потеря в весе при 100° Ц).
2. Связанная вода (напр., кристаллизационная).
3. Углерод.
4. Свободный водород (сверх водорода влажности и связанной воды).
5. Сера, азот и т. д., в небольших количествах.
6. Зола.

При тепловых расчетах серой и азотом часто пренебрегают, хотя обыкновенно они встречаются в количестве от 1 до 3%. В виду того, что водород постоянно содержится в избыточном количестве против того, которое необходимо для образования с кислородом воды, часто для удобства расчетов и для сравнения принимают, что весь кислород находится в химическом соединении в виде воды, а избыток водорода обозначается как „свободный“ или „чистый“ водород. Содержание углерода увеличивается, а процентное содержание кислорода (или связанной воды) уменьшается в следующем порядке: лигниты, бурый уголь, полубитуминозный и битуминозный уголь и антрацит.

Обычный приближенный способ выражения состава топлива предполагает, что оно состоит из влаги, горючего вещества и золы. При нагреве без доступа воздуха, при определенных условиях времени и температуры (в закрытом платиновом тигле) топливо теряет всю связанную воду, водород и большую часть углерода в виде летучих углеводородов, а остается зола и остаточный углерод. То, что удаляется при нагревании, обозначают как „летучее горючее“. Горючее, остающееся после прокаливании называют „связанным углеродом“. Зола — это остаток, получающийся после полного

сгорания взятого образца на открытом воздухе; сумма влаги, летучего горючего, связанного углерода и золы составляет 100%. Вышеперечисленные сорта угля в отношении содержания летучего горючего располагаются в нисходящем порядке, в той последовательности, какая указана в конце предшествующего абзаца.

Полный элементарный анализ углей труден, и его часто опускают. Анализы углей СССР различных месторождений можно найти, например, в сборнике „Источники минерального сырья для хим. пром.“ 1928 г. или в справочной книге „Теплотехник“ изд. 1929 г. Когда известно, происхождение данного угля, обыкновенно можно без большой ошибки принять, что полный анализ его горючего вещества совпадает с типовыми данными для его месторождения. Оказывается, что теплотворная способность угля в узких пределах есть функция отношения содержания углерода к кислороду плюс зола. По американским исследованиям,¹ кривая, выражающая эту функцию, достаточно удовлетворительно соответствует уравнению:

$$Кал. = 4220 - \frac{4350}{r + 0,98}$$

или

$$r = \frac{4350}{4220 - Кал.} - 0,98,$$

где r есть отношение углерода к кислороду плюс зола, $Кал.$ — теплотворная способность в больших калориях.

Это уравнение может быть применено к углям мокрым и сухим и часто бывает полезным при определении содержания углерода в угле². Подробности исследования и расчетов можно найти в указанном американском официальном издании.

Сравнение промышленных источников механической энергии. Значительнейшими первоисточниками механической энергии для промышленных целей является гидроэнергия и твердое, жидкое и газообразное топливо. Жидкое и газообразное топливо можно непосредственно использовать для получения механической энергии в двигателях внутреннего горения с энергетическим коэффициентом полезного действия в 20 или 25%. С другой стороны, стоимость жидкого и газообразного топлива, почти повсеместно чрезмерно высока, вследствие чего их использование для промышленных целей ограничено. Кроме того, двигатели внутреннего горения имеют недостатки, о которых будет сказано на странице 133. В результате всего этого только небольшое количество промышленной энергии получается из жидкого и газообразного топлива.

Таким образом главнейшими промышленными источниками механической энергии остаются — падение воды и твердое топливо.

Энергия твердого топлива может быть получена в механической форме в паровой машине и в двигателе внутреннего горения, в виду чего сравнение этих двух машин с гидравлическими двигателями весьма важно.

Энергия, получаемая на искусственном или естественном водопаде, сама по себе ничего не стоит, и потому часто полагают, что гидроэнергия дешева. На самом деле, верно, что она в некоторых определенных условиях является источником самой дешевой механической энергии, но условия, при которых такая дешевая энергия может быть добыта из воды, встречаются относительно редко, так что в ряде случаев гидроэнергия не может выдержать сравнения с энергией, добываемой из топлива. Прежде всего гидроэнергия дешева там, где имеются большие запасы воды, где обеспе-

¹ Bureau of Mines, Bulletin, 29.

² По Д. И. Менделееву, $Q_{раб.} = 81C + 300H - 26(O - S) - 6aq.$, где C есть % углерода, H — водорода, O — кислорода, S — серы, $aq.$ — количество воды в 100 кг (влаги, заключенная в 100 кг топлива, + вода, образующаяся от горения).

чено равномерное течение ее в продолжение всего года, где механическое преобразование ее может быть достигнуто с сравнительно небольшими расходами и где непосредственное промышленное использование энергии возможно на месте ее получения.

Там, где постоянство течения не может быть обеспечено круглый год, необходимо прикрепить к электроцентрали лишь столько потребителей — промышленных предприятий, сколько может быть обеспечено энергией при низшем уровне воды, или же озаботиться сооружением паровой станции для покрытия нехватки энергии. Это требует вложения капитала в паровую станцию, которая как показал опыт, может стоять без дела большую часть года. Преобразование водяной силы в механическую энергию оказывается часто очень дорогим там, где нельзя использовать природные водохранилища, а необходимо сооружение больших плотин и бассейнов.

И так как все эти выгодные для гидроэнергии условия встречаются не везде, то условия, при которых водяная сила может конкурировать с топливом, должны быть для каждого района обстоятельно взвешены до строительства гидростанций.

С тех пор, как энергия на большие расстояния передается обыкновенно в виде электрической, стоимость энергии выражается в электрических единицах. Самую дешевую известную энергию дают установки в Скандинавии, Исландии и Канаде, где она стоит от 3,50 до 5,00 долларов за киловатт/год¹ на шинах генератора. Энергия Ниагары, вероятно, обходится дешевле 10,00 долл., однако же, в виду потребности в энергии на месте, она никогда не продается за эту цену. На остальной территории Соединенных Штатов цена водяной энергии крайне дешева (20,00—25,00 долл.) и такая ее стоимость может быть достигнута только на очень больших станциях; нормальной ценой энергии следует считать 40,00 до 60,00 долл., а 75,00 долл. она превышает очень редко.²

При превращении энергии топлива в механическую пользуются паровой машиной или турбиной или двигателем внутреннего горения. Для использования в двигателе внутреннего горения твердого топлива оно должно быть газифицировано одним из вышеуказанных методов почти всегда в газогенераторе. Паровая турбина при самых благоприятных условиях дает термический эффект свыше 20%, но и 10 и 15% можно считать удовлетворительными. С другой стороны, двигатель внутреннего горения может дать при лучших условиях к. п. д. свыше 25%, а 20% наблюдаются нередко. При таком положении вещей казалось бы, что паровая машина или турбина не может соревноваться с газовым двигателем.

Но в действительности это не так. Прежде всего капиталовложения (имеются в виду обычные западно-европейские или американские экономические условия) для двигателя внутреннего горения данной мощности значительно больше, чем для паровой машины той же производительности. Далее установка с газовыми двигателями обладает очень малой способностью к перегрузке, так как ни газогенератор, ни двигатель не могут быть форсированы много больше их нормальной производительности; а в то же время паровая установка как котельная, так и двигатели, выдерживают перегрузку, превышающую даже 200% нормальной нагрузки.

¹ Единица энергии. Доллар здесь эквивалентен 2 зол. рублям.

² Ни один предмет широкого пользования не продается по столь различным ценам, как электрическая энергия. В Норвегии ее можно получить в больших количествах (для промышленных целей) дешевле, чем за 1/20 цента за kWh, т. е. за 0,1 коп. Она отпускается для освещения по 10 ц., т. е. в 20 раз дороже. Она продается также в вид сухих аккумуляторов (ныне большая отрасль промышленности) по цене свыше 10 долларов за kWh. Это составляет колебание рыночной цены в слыхом 20000 раз и объясняется тем, что указанный предмет широкого пользования есть не столько энергия сама по себе, сколько явление, которое инженер-энергетик называет „готовностью к работе“.

Кроме того, для небольших перегрузок, к. п. д. паровой установки незначительно уменьшается. В виду того, что всякая установка должна быть рассчитана для максимальной нагрузки, т. е. что всегда нужно считаться со случайными чрезвычайными нагрузками, соответствующее капиталовложение для газовой установки много больше, чем для паровой.

Наконец, двигатель внутреннего горения непригоден в качестве первоисточника для получения электрической энергии из-за быстрых колебаний его силовых импульсов. Впрочем, последнее затруднение технически уже устранено в значительной степени. Всем этим невыгодным обстоятельствам можно противопоставить лишь одну выгоду—экономии в топливе. Подытоживая вышесказанное, приходим к выводу, что двигателем внутреннего горения как первоисточником силы пользуются там, где топливо дорого или нагрузка установки исключительно равномерна, но там, где топливо относительно дешево и нагрузка колеблется, ему не выдержать соревнования с паровой машиной. В исключительных же случаях, например, при наличии большого количества дешевого газа, как это бывает в металлургической промышленности, газовые двигатели чрезвычайно распространены.

Г Л А В А VI

ГОРЕНИЕ

Топливо—это вещество, способное при соединении с кислородом, выделять тепло, и его использование для получения энергии почти всегда идет чрез реакцию с воздухом. Всякое горение поэтому есть газовая реакция, и все особенности газовых реакций присущи и ему.

Главнейшими реакциями горения будут:

1. $C + O_2 = CO_2 + 97$ б. кал.
2. $CO_2 + C = 2CO - 39$ б. кал.
3. $2C + O_2 = 2CO + 58$ б. кал.
4. $2CO + O_2 = 2CO_2 + 136$ б. кал.
5. $2H_2 + O_2 = 2H_2O + 136,6$ кал.
6. $H_2O + C = CO + H_2 - 39,3$ б. кал.
7. $2H_2O + C = CO_2 + 2H_2 - 39,6$ б. кал.
8. $CO + H_2O = CO_2 + H_2 - 0,3$ б. кал.

Следует твердо запомнить, что приведенные количества теплоты относятся к грамм-молекулярным количествам веществ, указанных на левой стороне уравнений, т. е. реактантов, при комнатной температуре ($20^\circ C$), при постоянном давлении и с жидкой водой (т. е. вода в случае образования после реакции конденсирована или перед реакцией выпарена, в случае ее разложения, и теплота конденсаций и испарения учтена в тепловом эффекте). Тепловые реакции меняются в зависимости от температуры, и изменения эти могут быть вычислены на основании удельных теплот взаимодействующих веществ (закон Кирхгофа).

Напоминаем основные физико-химические закономерности, которыми следует пользоваться, когда имеем дело с любыми реакциями горения.

1. Равновесие. Все эти реакции обратимы. Если реакция обратима и идет с выделением тепла, — равновесие передвигается назад повышением температуры (принцип Ле-Шателье). Первая реакция, правда, не обратима непосредственно, но CO_2 сперва распадается на CO и O_2 обращением четвертой реакции. Эта диссоциация CO_2 , едва заметная при температурах ниже $1400^\circ C$, при более высоких температурах усиливается. Окись углерода разлагается на углерод и кислород; это обращение третьей реакции, начинается

приблизительно при 2500°C и усиливается с повышением температуры¹. Однако при какой температуре эта реакция делается вполне обратимой, еще неизвестно. Соединяя обращения 4-й и 3-й реакций, производим обращение реакции 1-й. Реакция 2-я протекает направо лишь при высоких температурах, почти полностью она идет при температуре выше 1000°C , но быстро течет обратно при более низкой температуре, так что при 500°C она почти количественно обращена. Другими словами, при температуре выше 1000°C одна только окись углерода может находиться в присутствии углерода в равновесии в значительных количествах, так как распад окиси углерода очень незначителен; при низких же температурах углерод в состоянии перевести двуокись углерода в окись лишь в очень незначительных количествах. Реакция 5-я начинает обращаться заметным образом лишь при температуре выше 1300°C , а при 1600° или 1700° ее обращение совершенно ясно. Ни 6-я, ни 7-я реакции не идут до конца и всегда сопровождаются другими реакциями, а именно: в присутствии воды и углерода окись и двуокись углерода, получившиеся от обеих этих реакций, вступают во взаимодействие с избыточным углеродом, согласно реакции 2-й.

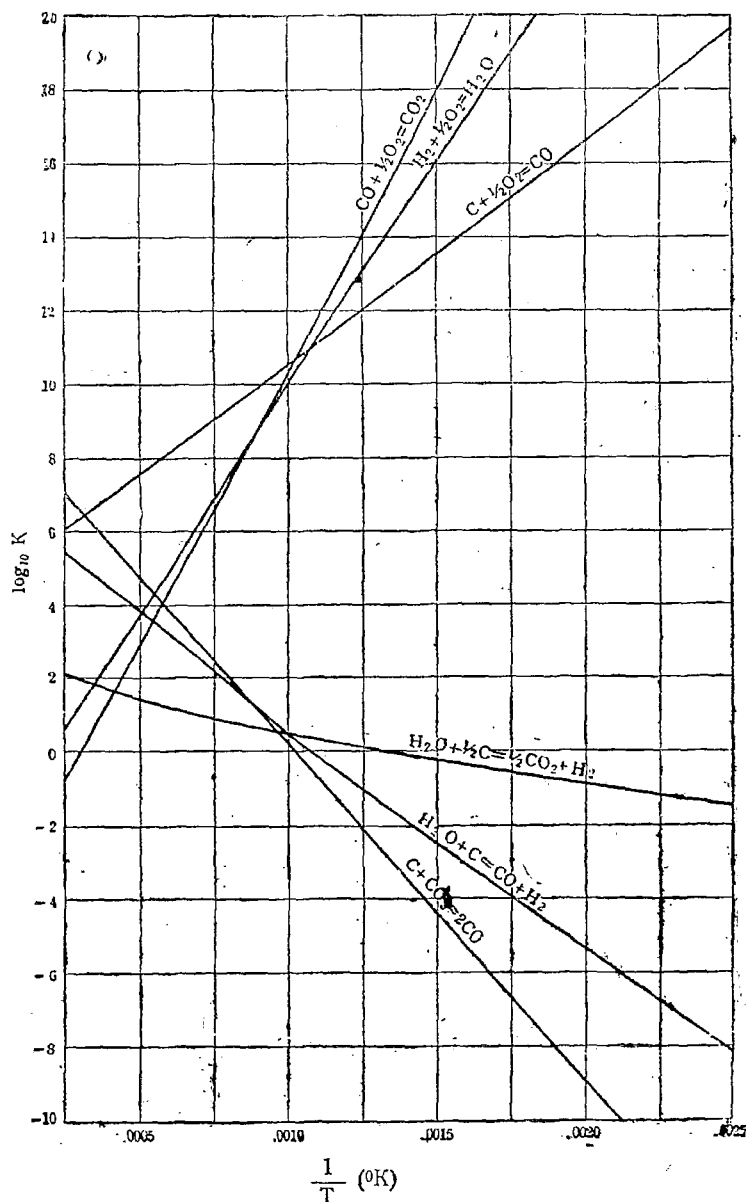


Рис. 47. Константы равновесия K реакции горения угля в форме графита. Эти константы выражены как отношение парциальных давлений в атмосферах; они относятся к реакциям, данным на самой диаграмме. Т. е. для реакции: $\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$ при $1/T = 0,002$, $\log_{10} K_p = 16,6$. Откуда $K_p = 4 \cdot 10^{16}$ вычислено по ур-ию

$$K_p = \frac{P_{\text{CO}}}{\sqrt{P_{\text{O}_2}}}$$

¹ Постоянство CO составляет одну из главных причин ценности окси-ацетиленового пламени. Ацетилен очень богат углеродом, и когда его сжигают с количеством кислорода, достаточным для образования только CO , получают продукты реакции, стойкие до 2500°C . В случае избытка кислорода много больше тепла освобождается бы при низких температурах, но при $1500-1800^{\circ}\text{C}$ получаемые CO_2 и H_2O стали бы распадаться, поглощая обратно тепло, выделенное при их образовании, и произвели бы снижение температуры реакции. Поэтому

Реакция 8-я играет большую роль в процессе газификации твердого топлива. Выводы Г. Н. Льюиса и Рендала¹ относительно постоянных (констант) равновесия K всех этих реакций, как функций температуры, основанные на критическом рассмотрении всех данных литературы, изображены на рис. 47. Эти кривые соответствуют положению равновесия с углеродом в виде графита.

2. Скорости реакций. Скорость, с которой протекает реакция, имеет существенное значение. Все газовые реакции протекают относительно медленно, но далеко не одинаково. Реакция 1-я чрезвычайно быстро протекает при высоких температурах (свыше 800°C), реакция 2-я—медленно и почти незаметно в сравнении с 1-й при температурах горения, но не ниже 600°C . Первые три реакции требуют взаимодействия газа и твердого угля, а потому, при прочих равных условиях, скорости реакций пропорциональны поверхности имеющегося углерода. С другой стороны, углерод отличается тем, что изменяет свои свойства от продолжительного нагревания, делаясь более крепким и плотным. Менее плотные сорта угля реагируют с газами более быстро, чем более плотные. Таким образом, древесный уголь и мягкие каменные угли реагируют быстро, в то время как кокс (особенно полученный при высокой температуре) и антрацит сравнительно очень медленно. Все это относится к взаимодействию любых газов с указанными видами топлива. Реакция 4-я и 5-я—чисто газовые реакции и протекают относительно медленно. Данные показывают, что реакция 5-я приблизительно в 4 раза быстрее 4-й. Реакция 6-я и 7-я опять требуют взаимодействия газа с твердым углеродом, и зависимость быстроты реакции от сорта угля та же, что и в первых трех реакциях. Обоснования этих выводов будут ясны из последующего.

3. Каталитическое взаимодействие. Все газовые реакции значительно ускоряются контактом с нагретыми поверхностями, т. е. горячие поверхности играют роль катализаторов в газовых реакциях. Хорошо известно, что такие вещества, как платина, никкель и т. п., служат в некоторых реакциях катализаторами; также хорошо известно, что все нагретые тела ускоряют газовые реакции в значительной степени. Газовые реакции очень медленно распространяются в толщу большой массы газа и протекают гораздо быстрее на поверхностном слое, где газ находится в соприкосновении с горячими стенками сосуда.² Поэтому для ускорения газовых реакций прежде всего необходимо привести данные газы в контакт с горячими телами. Так, например, реакция 8-я возможна с горящим углем в качестве катализатора, независимо от взаимодействия с ним.

4. Влияние температуры. Газовые реакции, как все химические реакции, значительно ускоряются с повышением температуры, при чем степень ускорения почти одинакова для всех реакций. Скорость реакции приблизительно удваивается с каждыми 10°C при обычных температурах,

в виду того, что при образовании CO выделяется меньше тепла, она может быть получена при более высокой температуре. Благоприятно еще то, что ацетилен образуется из углерода и водорода с поглощением тепла и при горении это количество тепла добавляется к теплу, получаемому при образовании CO , увеличивая суммарный тепловой эффект. Кроме того, получаемое при таких условиях пламя, содержа главным образом CO и H_2 , имеет восстановительную способность, вследствие чего металлы, нагретые в нем, защищены от окисления. Это происходит от того, что сродство углерода и кислорода (для образования CO , но не для образования CO_2) гораздо больше, чем сродство большинства металлов и кислорода. Наконец, сродство углерода и кислорода настолько больше сродства металлов и углерода, что металлами поглощается из пламени очень мало углерода, чем избегается хрупкость и другие недостатки, возникающие от образования карбидов металлов и их растворения в главной массе металлов.

¹ J. Am. Chem. Soc. 36, 1969—1993 (1914) и 37, 458—470 (1915).

² Это затруднение при исследованиях является причиной отсутствия данных о скорости газовых реакций при высоких температурах.

но степень ускорения сильно уменьшается при высоких температурах. Так, при 1000°C требуется повышение температуры приблизительно на 100° , чтобы удвоить скорость реакции. Однако невозможно ускорить химическую реакцию повышением температуры без того, чтобы в то же время не ускорились все прочие реакции, возможные при создавшихся условиях, включая и реакцию обратную по отношению к интересующей нас.

5. Взаимодействие твердого топлива и газов. Для того, чтобы твердое топливо сгорало с такой быстротой, которая позволила бы использование тепла для промышленных нужд, топливо должно быть нагрето до сравнительно высокой температуры, не меньшей $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$. Еще до того, как такая температура бывает достигнута, летучие составные части топлива почти нацело оказываются отогнанными,¹ так что горение твердого топлива будет не чем иным, как горением самого углерода (кокса или древесного угля). Однако, следует заметить, что летучие продукты „сухой перегонки“ сгорают задолго до начала горения твердых остатков. Когда уголь коксуется, то, будучи накален до бела, он выделяет углеводороды, которые при дальнейшем нагревании сами термически разлагаются (крекинг) с отложением мельчайших частиц углерода (дым, сажа). Этот углерод по своему образованию уносится во взвешенном в газах состоянии в такие части печи, где концентрация кислорода слаба (как это видно будет из дальнейшего, очень желательно поддерживать в этих частях концентрацию кислорода низкой). Поэтому сжечь углерод здесь очень трудно. К счастью, однако, самого образования такого углерода можно избежать, воспользовавшись наблюдением Бона (Bone),² что углеводороды, образовавшиеся при температурах ниже их точки воспламенения, при нагревании с кислородом соединяются с ним, сгорая не в CO или CO_2 , а образуя побочные продукты, которые при термическом разложении не отлагают углерода. Сродство углерода к кислороду для образования CO так велико, что в случае нахождения кислорода в молекуле он соединяется со всяким углеродом, могущим получиться при дальнейшем нагревании. Поэтому для избежания образования дыма необходимо коксовать уголь в струе воздуха. Это особенно важно в случае высокоценного (с высокой теплотворной способностью), очень летучего смолистого угля. У лигнитов и бурого угля летучие компоненты имеются в больших количествах, и они богаты кислородом (связанная вода), а потому образование углерода меньше. Дым от этих углей легче сжигается, но, к сожалению, получаемые в печах температуры столь низки, что эта выгода полностью теряется из-за более медленного течения реакции.

В высокой степени смолистых или антрацитовых углях тепло, поглощаемое этой перегонкой, составляет только небольшую часть тепла, выделяемого горением, но топливо, содержащее большие количества воды, свободной или связанной (лигниты, бурый уголь и друг.), поглощает большую долю его. Это поглощаемое тепло снижает температуру печи и соответственно мешает горению.

Твердое топливо может быть сожжено двояко: или его кладут на решетку, приспособленную для допуска воздуха в количестве, необходимом для его сгорания, или же его в совершенно размельченном виде (угольная пыль, опилки или стружки) продувают в топку таким образом, что каждая частица его проходит все пламенное пространство печи вместе с необхо-

¹ Улетучивание некоторых веществ из относительно нелетучих органических соединений путем термического разложения при высоких температурах называется „пирогенетическим разложением“ (сухая перегонка).

В случае жидких углеводородов термическое разложение носит название „крекинга“, сопровождаемого улетучиванием или без такового. Это явление не надо смешивать с обыкновенной перегонкой, происходящей без химического разложения (см. главу XVII).

² Bone, J. Chem. Soc., 83, 1074 (1903) и 85, 693 (1904).

димым для его полного сгорания количеством воздуха. Первый способ более употребительный, и так как изучение его может послужить хорошей иллюстрацией лежащих в основе процесса горения фактов и законов,— то мы его здесь детально разберем.

Процессы обычной топки. Рассмотрим топочную решетку, на которой лежит пласт кокса, полученного при перегонке угля. Сквозь этот горячий кокс течет струя воздуха, поддерживающая его горение. Если взять и исследовать газы в различных точках топливного слоя и принять состав газов за ординаты, а высоту точки отбора пробы газа над уровнем колосника за абсциссы, то получим кривые, изображенные на рисунке 48. Эти кривые несколько видоизменяются с характером угля, крупностью кусков и скоростью потока воздуха. Однако большие отклонения в этих влияющих факторах относительно мало видоизменяют кривые, в особенности, в их расположении относительно друг друга. Так, например, процентное содержание кислорода падает обыкновенно на 2-3% при изменении расстояния над решеткой от 5 до 10 см при всех условиях опыта.

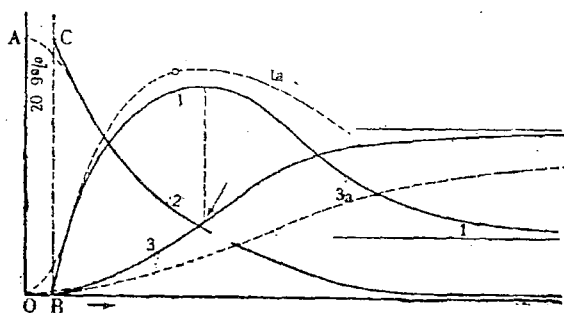


Рис. 48. Изменение состава горючих газов в слое топлива. Абс. — Расстояния вверх от колосников через слой горячего до верхнего уровня всей загрузки. Орд. — % каждого компонента в газе.

ОВ—зона золы и подогрева.

Кривая 1 — CO_2 при обычной скорости воздуха.

" 2 — O_2 " " " "

" 3 — CO " " " "

" 3a — CO " " " "

Горизонтальные прямые линии означают равновесные асимптоты. Кривая CO повышается с подъемом т-ры; кривая CO_2 падает с повыш. т-ры. Вертикальная пунктирная линия означает точки перегиба кривых.

Распределение температур в пласте топлива закономерно. Температура низка у колосника вследствие охлаждающего действия входящего воздуха. Затем она повышается—сперва резко, а потом постепенно—и доходит до максимума на расстоянии 10—15 см ниже поверхностного слоя топлива, после чего медленно понижается. Ясно, что процессы горения не могут происходить, пока температура не достигнет точки воспламенения, т.е. 600—800°C. Хотя холодный воздух, поступающий через колосники в топливный пласт, снижает его температуру в этом месте, тем не менее тепло опускается вниз сквозь толщу топлива чрезвычайно быстро благодаря теплопроводности и излучению.

Кроме того, раз момент воспламенения наступил, реакция идет в виду высокого содержания кислорода настолько стремительно, что выделение тепла на дне топливного пласта очень значительно. Если мы имеем нефтяной кокс (почти беззольный), то эти условия способствуют поддержанию столь высокой температуры на дне пласта, что оказывается почти невозможным избежать прогорания колосников. Однако, в случае угля и обыкновенного кокса, остающаяся зола защищает колосники и разбавляет горючее до такой степени, что повышение температуры над колосниками делается не столь резким. На практике обычно при горении нефтяного кокса берут уголь в количестве, достаточном для образования и поддержания защитного слоя золы на решетке.

Вследствие этих явлений реакция горения обыкновенно начинается резко не непосредственно у колосников, а несколько над ними. На черт. 48¹ кривые, начинающиеся от линии ВС, получены при сгорании нефтяного кокса без примеси угля, а начинающиеся от линии АО—нормального типа. Следует заметить, что обе группы кривых делаются идентичными на небольшом расстоянии над колосниками. Случай ВС свободен от осложнений, при-

¹ На основе данных *Kreisinger, Owitz and Augustine*, U. S. Bureau of Mines, Tech. Paper 137 (1917).

чиняемых золой, поэтому мы ограничим рассуждения кривыми, начинающимися от ВС. В случае наличия золы линию ВС мы можем считать эффективным положением колосников.

Для данного кокса, выжженного в специальных печах или полученного непосредственно на колосниковой решетке в кусках определенного размера или для данной степени размельчения (ситовые анализы), кривая O_2 и начальная часть кривой CO_2 на практике остаются обе неизменными,¹ какова бы ни была скорость течения воздуха через пласт топлива. Таким образом кривые вначале симметричны друг относительно друга, будучи проведены—первая CO_2 вверх, а вторая O_2 вниз от кривой начального количества кислорода во входящем воздухе—20,9%. Кроме того в этой области они представляют логарифмические кривые, т. е. кривая CO_2 будучи нанесена прямо на полулогарифмическую бумагу, представляет из себя прямую линию, как и разность между 20,9% и наличным кислородом.

Эти факты показывают, что скорости исчезновения кислорода и образования двуокиси углерода одинаковы и пропорциональны содержанию кислорода в газе в данной точке топливного пласта, т. е. что первичной реакцией при сжигании углерода в воздухе является реакция $C + O_2 = CO_2$, при чем эта реакция мономолекулярна по отношению к O_2 . Кроме того тот факт, что вид кривых не меняется от возрастания скорости воздуха, несмотря на вызываемое этим фактором повышение температуры вследствие усиленного выделения тепла, показывает, что скорость сгорания зависит не от скорости химического соединения на поверхности углерода, но от скорости прохождения кислорода через поверхностную пленку воздуха, окружающего каждую частицу углерода (см. главу II). Удваивая скорость воздуха, мы уменьшаем приблизительно вдвое толщину пленки. Следовательно, при одной и той же степени концентрации кислорода, вдвое большее его количество диффундирует в поверхность углерода, где при температуре пласта топлива его соединение с углеродом происходит практически мгновенно. CO_2 теперь уходит, а кислород, напротив, притекает к углю через пленку воздуха.

Изменение скорости диффузии в зависимости от температуры не велико. Можно было бы предположить, что повышение температуры, приводящее к увеличению скорости воздуха, увеличивает скорость реакции в степени, достаточной для того, чтобы поддерживать скорость образования CO_2 пропорциональной скорости воздуха, но такое точное координирование температуры и скорости при столь изменчивых условиях рассеивания теплоты кажется совершенно невозможным. Вышеприведенные факты согласуются с предположением, что СО является первичным продуктом окисления и окисляется дальше в CO_2 во время диффундирования сквозь воздушную пленку, но одновременное присутствие O_2 и СО несколько выше над решеткой указывает на то, что скорость сгорания этих двух веществ недостаточна для объяснения отсутствия СО на дне топливного пласта. Следовательно, CO_2 является первичным продуктом сгорания.

Кривая СО идет на правом конце диаграммы асимптотично к горизонтальной оси; ее падение во всех ее точках почти пропорционально содержанию CO_2 в газе. Однако, она более пологая, чем две предыдущие кривые. На своем правом конце (после исчезновения O_2) она делается симметричной с кривой CO_2 относительно двух горизонтальных асимптот, соответственно равновесию между CO_2 , СО и углеродом.

Когда скорость воздуха увеличивается, кривая СО и правый конец кривой CO_2 одновременно выпрямляются и двигаются вправо, но их перемещение направо далеко не пропорционально скорости. Это означает, во-первых, что СО получается вследствие реакции $CO_2 + C = 2CO$; далее,

¹ В пределах ошибки наблюдений, которая здесь значительна.

что скорость этой реакции зависит не от диффузии газа через воздушную пленку, окружающую частицы углерода, а от скорости химического взаимодействия CO_2 и углерода; далее, что с повышением температуры, соответственно увеличению скорости воздуха, скорость реакции возрастает, но не так быстро, как приток воздуха; и, наконец, что даже при высоких температурах эта реакция значительно медленнее образования CO_2 из O_2 и C , так что равновесие может быть достигнуто только при очень глубоком пласте топлива и при продолжительном контакте газа с углем.

Ясно, что невозможно надлежащим образом управлять пламенем при слишком тонком слое топлива. Он должен быть по крайней мере глубиной в 8—15 см во избежание дымообразования и появления в слое мест малой толщины, которые делают невозможным надлежащее управление горением, и потому более разумнее поддерживать более толстые слои. Исследование этих кривых показывает, что газы при выходе из пласта топлива вовсе не содержат или содержат мало кислорода, но содержат зато окись углерода, которая представляет из себя продукт неполного сгорания топлива. Поэтому необходимо примешивать дополнительный воздух к газам, выделяемым из пласта и дать возможность окислиться как этой окиси, так и некоторому количеству водорода, образовавшегося от разложения водяных паров воздуха или оставшегося в коксе, и углеводородам, получившимся при перегонке угля до начала горения (см. стр. 137). Реакции в самом пласте топлива будем называть первичным горением, а горение получаемых при этом газообразных продуктов—вторичным горением.

Генераторный газ. Газообразное топливо относительно чисто и не содержит золы; в виду того, что в каждый данный момент в печи находится ограниченное количество топлива, возможен точный контроль над температурой и подачей тепла. Из числа газообразных видов топлива каменноугольный газ обладает наивысшей теплотворной способностью, и поэтому он наиболее удобен для употребления, но стоимость, его слишком высока для большинства промышленных предприятий. Твердый уголь или кокс может быть газифицирован путем разложения паром (водяной газ), но эта реакция поглощает тепло, которое должно компенсироваться от времени до времени продувкой воздуха. Одно первичное горение толстого слоя твердого топлива дает горючий газ, и этим методом получения газа иногда и пользуются, но слой топлива делается при этом слишком горячим в своем основании (где кокс почти целиком сгорает в CO_2), в результате чего происходят затруднения вследствие плавления золы. Можно, однако, еще ввести пар (или иногда CO_2 в виде дымовых газов) вместе с воздухом, поглощая таким образом избыток тепла путем его взаимодействия с углем и получая генераторный газ. Он может быть употреблен как горячий сырой генераторный газ или может быть охлажден и очищен. Сырой газ можно использовать только в печи, соединенной непосредственно с газогенератором. Благодаря простоте получения и дешевизне, генераторный газ очень распространен, и его значение все увеличивается. Главным его недостатком является низкая теплотворная способность, вызываемая наличием азота во вводимом воздухе; но это невыгодное обстоятельство может быть избегнуто надлежащим подогревом и применением приспособлений, регенерирующих тепло (см. стр. 157).

Так как генераторный газ получается от взаимодействия пара и углерода наряду с реакцией первичного горения углерода за счет воздуха, необходимо реакцию с паром подвергнуть особо внимательному изучению. Найдено, что если реакцию, происходящую с одним только паром, представить, как показано на черт. 49, то получим кривые, независимые от характера угля¹ (степень измельчения, пористость и т. д.), от давления

¹ Исключение составляет древесный уголь, дающий совершенно иной газ, именно—с увеличенным содержанием CO_2 .

пара или продолжительности контакта пара с углеродом. Кроме того и температура имеет лишь незначительное влияние. Но все эти переменные величины весьма существенно влияют на степень, до которой доходит разложение за определенный промежуток времени.

Как было указано, изменение давления не влияет на вид кривых. Но нужно, однако, заметить, что кривые вычерчены так, что влияние изменения продолжительности взаимодействия пара и углерода сведено к минимуму.

Данные опытов также показывают, что время, потребное при всех прочих равных условиях для получения одинаковых результатов, обратно пропорционально давлению. Этот факт показывает, 1) что,

если водяной пар принимает участие не в одной только реакции, а в нескольких, — порядок каждой из этих реакций должен быть относительно воды один и тот же, так как иначе изменение в давлении изменяло бы скорость одной реакции больше, чем другой, и точки бы не располагались на одной кривой, 2) что все эти реакции должны быть мономолекулярными относительно воды, так как иначе влияние давления не могло бы быть обратно пропорционально времени. Следует заметить, что кривые CO_2 и CO имеют вначале один и тот же определенный уклон. Это означает, что оба эти газа по-

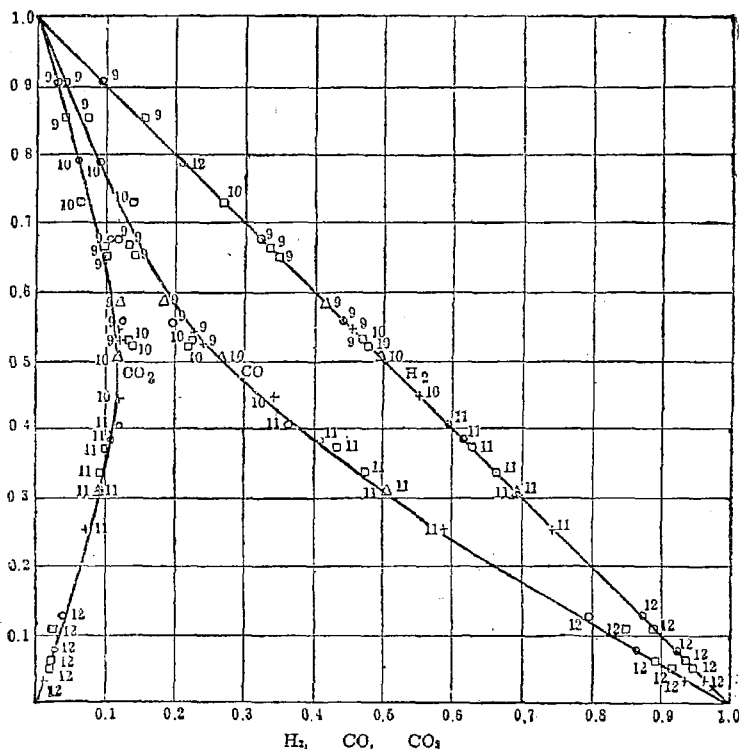
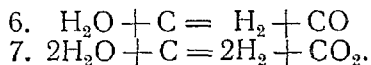


Рис. 49. Образование водяного газа. Абс.—процентное содержание газа (H_2 , CO , CO_2). Ord.—количество разложившейся воды.

Условные обозначения:

- Опыт при повышенном давлении (прибл. 1126 мм).
 - Опыт при пониженном давлении (прибл. 366 мм).
 - △ Опыт при повышенном давлении (1126 мм).
 - + Опыт при пониженном давлении (366 мм).
- Основанием для расчетов была сумма $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$; числа на линиях диаграммы означают t-ру в сотнях °C.

лучились одновременно при первичных реакциях между паром и углеродом. Последнее может быть объяснено лишь предположением, что этими двумя первичными реакциями являются реакции 6-я и 7-я (на стр. 134):

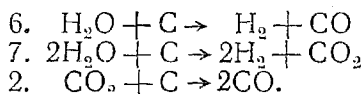


Вторая реакция, однако, должна быть мономолекулярной относительно воды, как указано выше. Это означает, что механизм этой реакции неизвестен.

Так как было найдено, что эти реакции не зависят от размеров подвергающейся взаимодействию поверхности углерода, то следует считать, что влияние углерода во всех реакциях, имеющих место одновременно, дол-

жно быть одно и то же. В самом деле, изучение данных опыта показывает, что время воздействия, давление и поверхность совершенно равнозначны друг с другом по своему эффекту, т. е. если увеличить вдвое поверхность при постоянном давлении, то время, необходимое для получения тех же результатов, уменьшится вдвое и т. д.

Эти кривые могут быть выражены количественно с приемлемой точностью, предполагая, что следующие три одновременно идущие реакции имеют скорости, равные k_6 , k_7 и k_2 , а отношения этих скоростей постоянны в пределах между 1000 и 1200°C — интервал температур, обычно употребляемых в промышленности.



Обычные уравнения скоростей реакции проще всего можно составить в предположении, что одна часть вводимого пара, или, что то же самое, $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$, в газе принимается за основание расчета, так как это величина постоянная. На этом основании обозначим остаточную воду, остающуюся неразложенной, через x , объем CO_2 — v и время — θ .

Тогда скорость расходования воды будет:

$$-dx/d\theta = (k_6 + 2k_7)x,$$

а скорость образования CO_2

$$dv/d\theta = k_2x - k_2v,$$

откуда

$$\frac{dv}{dx} = \frac{\beta v - x}{\alpha x}, \text{ где } \beta = k_2/k_7 \text{ и } \alpha = 2 + (k_6/k_7).$$

Решение этого уравнения дает

$$(\beta - \alpha)v = x - x^{\beta/\alpha}.$$

Для кривых рис. 49

$$\beta = 4,18, \alpha = 3,17,$$

откуда

$$1,01v = x - x^{1,319}$$

О пользовании этими уравнениями см. стр. 179.

Интересно отметить, что окончательные продукты реакции, если только время взаимодействия не слишком велико (это не видно на кривых), определяются скорее относительными скоростями реакции, чем состоянием равновесия.

Эти кривые, однако, ничего не говорят о скоростях реакции, увеличивающихся с температурой и с поверхностью углерода. Ниже 800°C они очень медленны. Около 1000°C эти реакции приблизительно удваивают скорость на каждые 100° повышения температуры, но приращение температуры, потребное для удвоения скорости реакции, постоянно увеличивается с температурой (приблизительно обратно пропорционально квадрату абсолютной температуры). На практике температуру генераторного газа поддерживают возможно высокой (без плавки золы), чтобы увеличить скорость реакции и получить от установки максимум производительности.

На практике в газогенераторах реакции 1-я и 6-я начинаются одновременно. Реакция 8-я почти вовсе не происходит или же идет справа налево, если вообще имеет место, так как в начале реакции имеется слишком мало H_2 , чтобы восстановить CO_2 , а в конце слишком мало пара для окисления CO . Реакция 1-я быстро заканчивается, после чего реакции 6-я и 2-я протекают параллельно, при чем 6-я немного скорее.

6. Горение жидкого топлива. Всякое жидкое горючее в большой мере, если даже не совсем, улетучивается задолго до достижения температуры воспламенения, при чем некоторые виды жидких горючих при этом термически разлагаются (крекинг), а не испаряются неизменными. Те, которые легко испаряются без разложения, могут быть смешаны с воздухом до воспламенения, как это имеет место в двигателях внутреннего горения, но в печах на практике жидкое горючее распыляют на чрезвычайно мелкие брызги и смешивают с воздухом, необходимым для его сгорания. При таких условиях процессы перегонки, крекинга, первичного и вторичного горения происходят почти одновременно. Вследствие большой поверхности взаимодействия скорость горения чрезвычайно велика, и благодаря незначительности количества топлива, находящегося в сфере горения в каждый данный момент, контроль над горением превосходный.

7. Горение газов. Как уже установлено, скорость окисления всех горючих газов незначительна, если только температура не очень высока и концентрация газов и кислорода недостаточно велика. Если концентрация газа и кислорода такова, что горение, продолжающееся после воспламенения в одной точке, дает тепло, достаточное для поднятия температуры соседних частей смеси до температуры возгорания, то ясно, что пламя, раз образовавшееся, будет распространяться само с большой быстротой. Эта точка определяет низший предел взрыва. Если количество горючего газа будет в достаточной мере увеличено, он будет в конце концов действовать как разбавитель, способный предотвратить воспламенение, определяя таким образом высший предел взрыва.

В печной практике первой проблемой горения является наиболее полное смешение газа с воздухом, а второй — определение времени, достаточного для того, чтобы реакции горения доходили сами собою до конца. Об этом будет сказано в главе VII.

Выше уже было указано на то, что горячие поверхности служат катализаторами для всех газовых реакций. Поэтому является крайне желательным привести газы в тесное соприкосновение с горячими тугоплавкими поверхностями для завершения сгорания в наикратчайшее время. Что такое горение при помощи катализаторов имеет заметное значение, показывает уже один тот факт, что при низких температурах горение смеси водорода и кислорода пропорционально не времени воздействия на газы температуры горения, а поверхности сосуда. Что механизм горения при помощи поверхностного катализа совершенно отличен от окисления в газовой фазе, подтверждается тем установленным экспериментально фактом, что в то время как горение водорода в присутствии катализатора мономолекулярно по отношению к водороду, горение в газовой фазе бимолекулярно.

Вообще мы очень мало знаем пока о скоростях реакций или о влиянии свойств каталитических поверхностей на них, в смысле количественных зависимостей, управляющих этими процессами.

Г Л А В А VII

ПЕЧИ

Для использования с наибольшей выгодой тепловой энергии горения, ее получают в замкнутом пространстве, окруженном огнеупорным кирпичом или другим тугоплавким материалом (топка, кильн, реторта или печь). Хотя печи строились в течение многих столетий до того, как изучены были только что приведенные принципы горения, тем не менее:

конструкция и обслуживание современных печей в соответствии с этими принципами составляют важные задачи химического машиностроения и промышленности.

Печи можно разделить на два класса в зависимости от того, будет ли тепло, выделяемое горением, передаваться непосредственно от топлива, пламени или горячих газов материалу, подлежащему нагреванию, или это тепло будет передаваться загрузке печи из пространства, где происходит горение, через перегородку, так что пламя и продукты горения будут совершенно отделены от загрузки, как это бывает в случае пользования ретортой, муфелем, перегонным кубом или другим подобным прибором, как, например, тиглем. Первый тип печей имеет большое преимущество дешевизны постройки, меньшей стоимости содержания, ремонта и обслуживания, и большей скорости нагревания и охлаждения материала. Кроме того, печи эти способны поддерживать более высокую температуру. Недостатками их являются: загрязнение загрузки золой и другими продуктами горения, что во многих случаях нежелательно; сама тепловая обработка загрузки предопределяется химическими условиями, обуславливающими удовлетворительное сгорание топлива, при чем надо иметь в виду что загрузка подвержена изменяющимся условиям окисления и восстановления, как результат неравномерной топки; летучие продукты реакции теряются в большом количестве дымового газа. С другой стороны, второй тип—муфели, реторты или перегонные кубы—имеет явное преимущество легкости обращения с продуктами реакций, более упрощенного контроля температуры и химического состава газов в печи. Если температура сравнительно низка и защитная стенка металлическая, как в перегонном кубе, то никаких затруднений передача тепла не встречает, но в муфелях из тяжелого огнеупорного материала падение температуры в стенках весьма значительно, и для быстрого нагревания температура пространства горения должна поддерживаться на значительно более высоком уровне, чем внутри сосуда, что связано с соответствующей потерей тепла с отходящими газами и низким коэффициентом полезного действия печи.

Иногда топливо непосредственно смешивается с загружаемым материалом, и между источником тепла и подлежащим нагреванию объектом получается самый тесный контакт. Примером такой выгодной комбинации являются электрические печи, где сама загрузка представляет электросопротивление; такие печи на самом деле не потребляют топлива, но в них так же, как и в тех случаях, когда топливо смешивается с загрузкой, тепло в наибольшем количестве выделяется непосредственно там, где оно должно быть использовано. Однако для обеспечения прохода достаточного для поддержания горения количества воздуха сквозь массу загрузки, необходимо или пользоваться сильной воздуходувкой, или в течение всего процесса горения держать загрузку в виде жесткой, неплотной массы. Такой тип печи мы встречаем, например, на металлургических заводах в виде доменных печей или в виде старинного типа кильна, в котором к топливу прибавлялся известняк, или, наконец, в виде печи для обжига кирпича и глиняной посуды.

Третий—особый тип составляют печи, в которых топливо служит в то же время и объектом обжига (ульевидные коксовые печи, печи для выжига древесного угля и т. д.),

Следующая классификация печей, особенно полезная при их изучении, основывается на характере употребляемого топлива:

- 1) Печи на твердом топливе, пылевидном и несмешанном непосредственно с обжигаемым материалом;
- 2) Печи на жидком или пылевидном топливе;
- 3) Печи на газообразном топливе;
- 4) Печи на твердом (или жидком) топливе, непосредственно смешанном с загрузкой.

1. ПЕЧИ, СЖИГАЮЩИЕ ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО НА РЕШЕТКАХ (НЕПЫЛЕВИДНОЕ И НЕ СМЕШАННОЕ НЕПОСРЕДСТВЕННО С ЗАГРУЖАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ)

В печах этого типа топливо должно находиться на решетке, где и начинается первичное горение. Топки паровых котлов представляют из себя наилучшую иллюстрацию такого типа печи и дают возможность хорошо уяснить проблемы проектирования, конструирования и эксплуатации, но, как будет видно из дальнейшего, большинство печей для химических целей резко отличается во многих отношениях от обычных паровых установок.

а. Коксование. Прежде всего необходимо довести горючее до белого каления и этим вызвать коксование угля, обыкновенно начинающееся еще до достижения температуры воспламенения. Коксование должно вестись в струе воздуха во избежание образования дыма (см. стр. 137). Следовательно, уголь не должен коксоваться во время его загрузки на нагретый слой горючего, так как отходящие из последнего газы лишены кислорода. Воздух, проходящий через холодное горючее, не должен, однако, быть в избытке, — в противном случае его окажется больше, чем необходимо для вторичного горения. На ручной топочной решетке можно поддерживать подходящие для коксования условия, нагревая свежий уголь на небольшой свободной части решетки непосредственно у топочной дверцы, для чего накаленное топливо с этой части площадки перемещают вглубь топки. Холодное топливо нагревается вследствие теплопроводности от соседнего накаленного топлива и вследствие излучения тепла стенками печи. Оно перегоняется при избытке продуваемого через него свежего воздуха, который впоследствии может быть использован для вторичного горения. После коксования его отодвигают от дверцы гребком на горящее топливо, а на его место снова подбрасывают свежий уголь.

Этот метод очень хорошо предупреждает образование дыма, но он затруднителен, так как требует большого внимания при обслуживании топки и необходимости часто подбрасывать уголь небольшими порциями. Так как, кроме того, до сих пор нет регистрирующих или каких-либо иных приборов, позволяющих определить количество образующегося дыма в каждый данный момент, что делает невозможным проверять обслуживание топки иначе, как путем непосредственного наблюдения выделения дыма из дымовой трубы, — то метод этот практически мало пригоден, вследствие невозможности поручать кочегару и обслуживание топки и наблюдение за выделением дыма из трубы. Одним из главнейших преимуществ механической топки является автоматическое регулирование подачи топлива. Как горизонтальная цепная решетка, так и наклонная качающаяся решетка медленно и непрерывно проталкивают уголь в печь, где он коксуется, приходя в соприкосновение с обтекающим его воздухом. Наклонная качающаяся решетка сбрасывает далее коксованное горючее на слой горящего топлива, поддерживая его толщину постоянной. При цепной решетке этого не происходит. Однако оба эти автоматических типа, как и ручная решетка (при частом подбрасывании небольших количеств топлива), имеют тот общий недостаток, что известное количество свежего угля теряется, проваливаясь чрез прозоры между колосниками, где трудно избежать его смешения с золой.

Топка с нижней подачей устраняет это затруднение и особенно эффективна, благодаря условиям, при которых коксуется уголь.

б. Уход за слоем горючего и удаление золы. Следующей задачей является сохранение однообразной толщины топливного слоя и удаление золы, свободной от несгоревшего горючего. В печи с ручной топкой, когда употребляется неспекающийся уголь и зола не плавится, этого достигнуть легко. Однообразный слой горючего поддерживается шурованием, и зола проталкивается сквозь колосники встряхиванием, при чем, однако, на решетке оставляют слой золы, достаточно толстый, чтобы

углерод полностью выгорел. Спекающаяся зола препятствует тяге, и для удаления золы приходится настолько сильно трясти решетки, что провал горючего вместе с золою становится неизбежным. Еще хуже условия при плавлении золы, так как приходится проталкивать шлак через колосники; вместе с ним проталкивается и горючее. Горизонтальная цепная решетка не совсем удовлетворительна в отношении поддержания равномерного слоя топлива, так как к концу ее оборота на ней остается очень тонкий слой горючего. При режиме, направленном на полное сжигание горючего, она обычно пропускает слишком много воздуха. Особенно неудовлетворительно она работает с сильно спекающимися углями. Наклонная решетка поддерживает весьма равномерный слой топлива, но при удалении с решетки скребком шлакующей золы теряются большие количества горючего, так как место удаления золы находится в непосредственной близости от зоны высокой температуры. Мы находили до 50% горючего в золе в печи такого типа. Особенно плохо обстоит дело с отделением золы от горючего в топках с нижней подачей.

в. Скорость горения. Как указано на стр. 139, при определенных температурах в печи скорость образования CO_2 , путем соединения кокса с кислородом, пропорциональна скорости продуваемого воздуха, так что нет предельного количества угля, которое может быть сожжено на поверхности данной решетки, при условии, что тяга достаточна, чтобы протянуть необходимый для горения воздух сквозь колосники и слой горючего, если только тяга не достигает силы, при которой уголь сдувается с решетки.

Когда увеличивается скорость прохождения воздуха через решетку, количество тепла, выделяемого первичным горением, возрастает несколько больше, чем прямо пропорционально. Немалая часть этого тепла уходит с газообразными продуктами первичного горения, и количество тепла явно увеличивается с возрастанием температуры газов. Если же в печи имеется объект, который должен быть нагрет лучами, исходящими из горючего слоя, или непосредственно, или путем отражения, то большая доля тепла путем излучения передается от горючего слоя к этому объекту, особенно в первом случае. В практике паровых установок температура котла настолько низка по сравнению с температурой горючего слоя, что большая часть всего тепла первичного горения достигает таким путем котла. Кроме того, так как излучение растет пропорционально четвертой степени абсолютной температуры, то почти весь излишек тепла, полученного от ускорения первичного горения, идет к котлу в виде лучистой энергии, и потому наблюдается лишь незначительное повышение температуры горючего слоя. Однако во многих химических печах нет совершенно использования теплового излучения, как это имеет место в паровых котлах, поглощающих тепло, излучаемое топкой, и потому температура горючего слоя очень быстро возрастает с увеличением скорости горения. Если за этим не следить, то в результате мы получим местный перегрев печи, плавление золы и даже прогорание колосников. Следовательно, печи, применяемые в химической промышленности, с ограниченной способностью поглощения тепла, непосредственно излучаемого горючим слоем, должны в общем эксплуатироваться при очень тщательно сбалансированных скоростях горения.

Котельные установки с ручными топками могут с успехом эксплуатироваться при скоростях сжигания (напряжение топки) от 50 до 100 кг на м² решетки в час; при механических топках эти скорости могут быть повышены до 200 кг/м². Осуществимы и скорости горения до 400 кг/м², но для промышленных целей невыгодно пользоваться такими скоростями. В печах для химических целей скорость горения, как указано выше, ограничена максимально допустимой температурой печи, именно ее способностью теплопоглощения и необходимостью равномерного распределения тепла.

Нередко в таких печах скорость горения держится на уровне от 20 до 50 кг на 1 м² решетки в час.

Излучение тепла котельными топками так велико, что при пользовании низкосортным топливом, например, сырыми древесными отбросами, отбросами дубильной коры, лигнина и т. д., необходимо печь сконструировать так, чтобы котел не был на пути непосредственных лучей пламени, ибо иначе излучение охледило бы пламя ниже температуры горения, что достигается в тех конструкциях, где топка находится впереди котла и отделена от него высоким порогом (конструкция голландской печи).

Возможность почти неограниченной скорости горения на решетке, непосредственная передача большей части излучаемого тепла к тому месту, где оно требуется, и его почти полное поглощение здесь лежат в основе той громадной способности к перегрузке, которой обладают котельные установки. Главной невыгодой такого форсирования котельной установки является несколько пониженная эффективность, вследствие несовершенного вторичного горения. Современная практика старается предусмотреть соответствующее пространство в печи для создания удовлетворительных условий вторичного горения.

г. Вторичное горение. От горящего слоя топлива поднимаются продукты перегонки летучих составных частей горючего и газообразные продукты первичного горения, богатые окисью углерода и содержащие немного водорода, образовавшегося из влаги воздуха. В первых продуктах будет заключаться некоторое количество кислорода, если топливо сжигалось надлежащим образом, но во вторых его или очень мало или вовсе нет. Потенциальная теплота горения этих газов представляет собою большую часть тепла, содержащегося в топливе, и для их окисления должны быть предусмотрены соответствующие меры.

Первой задачей является смешение этих газов с надлежащим количеством воздуха. Их объем так велик (из-за большого количества азота), что трудно достичь их полного смешения. В ручных топках вторичный воздух (т. е. необходимый для вторичного горения) доставляется через поддувало в печной дверце и смешивается с газообразными продуктами первичного горения, в то время как он течет над горящим слоем. В случае цепной или наклонной решетки немалая часть вторичного воздуха поступает при перегонке горючего. В топках с нижней подачей, однако, этим путем воздух не проникает. В современной практике котельных установок с механическими топками предусмотрено поступление вторичного воздуха через многочисленные отверстия в пороге, при чем воздух нагревается в течение времени его прохождения по каналам в пороге, ведущим к этим отверстиям. Таким образом открывается возможность доставления воздуха к большому числу точек, чем достигаются хорошие условия для смешения. Как будет показано, такое подогревание является очень желательным для достижения оптимальных условий вторичного горения.

Вторичное горение по существу своему представляет собою ряд чисто газовых реакций. Поэтому эти реакции медленны по сравнению с реакциями первичного горения (см. стр. 139), и для их течения необходимо предусмотреть соответствующее время. В паровых установках с ручными топками в прежнее время топочное пространство обычно составляло от 1,2 до 1,5 м³ на м² площади решетки, и при прежних скоростях горения (от 25 до 50 кг угля на м² площади решетки в час) этого было вполне достаточно для высокосортных углей. Когда, однако, скорости горения стали с введением механических топок увеличиваться, а от повышения температуры горения газов стали возрастать также и скорости вторичного горения, этого повышения температуры оказалось недостаточно (см. стр. 146) для завершения вторичного горения в таких ограниченных топочных пространствах. В результате конструкторы стали за последнее время постепенно увеличивать топочные пространства, так что сейчас в новых уста-

новках нередко удельный объем топочного пространства доходит до 36—42 м³ на м² решетки, благодаря чему в них могут быть достигнуты большие скорости горения (в кг топлива на м²).

Когда употребляется низкосортное топливо, температура горящего слоя низка, и, следовательно, низка и температура горючих газов. Это означает, что скорость реакций вторичного горения меньше и что в таких случаях должно быть дано дополнительное топочное пространство. Одним из преимуществ конструкции голландских печей для этих низкосортных топлив является наличие увеличенного топочного пространства, а также факт, что продукты первичного горения, вследствие отсутствия охлаждения горючего слоя путем излучения, покидают его при более высокой температуре и потому сгорают с большей скоростью.

Полнота газовых реакций при процессах вторичного горения может быть достигнута путем тесного контакта газов с горячими огнеупорными поверхностями. Для этой цели в топочном пространстве котельных установок часто устраивают перегородки, о которые газы ударяются и которые они должны обтекать. Эти перегородки способствуют газовым реакциям не только своим каталитическим действием, но и увеличением смешивания вторичным воздухом и поглощением тепла газов, которое далее передается излучением котлу. Такие выступы далеко не всегда встречаются в печах для химических целей, хотя во многих случаях их применение было бы крайне выгодным. Например, в муфельных печах часть тепла горячих газов захватывается стенкой самого муфеля, а другая часть поглощается остальными стенками печи и оттуда излучается на муфель. Там, где муфель изготовлен из огнеупорного материала, разница между ним и стенками печи незначительна, так как при высокой температуре печи скорость обмена энергией между стенками и муфелем путем лучеиспускания очень велика. Если в таких случаях еще увеличить поверхность стенок печи, давая кирпичам попеременно выступать из стенок в пространство печи, то это даст дополнительную поверхность для поглощения тепла горячих газов, которое затем будет излучено на стенку муфеля. Этим путем можно мощность муфеля в некоторых случаях увеличить от 100 до 200%.

В некоторых печах для химических целей такие выступы излишни. Так, например, в печах для обжига извести с наружной топкой продукты вторичного горения, вошедшие в кильн, катализируются при своем горении поверхностью самой извести. В результате горение в таких печах весьма совершенно.

Для того, чтобы добиться полного сгорания, очевидно необходим достаточный подвод воздуха; на практике выяснилась необходимость подачи его со значительным излишком. В ограниченных топочных пространствах паровых установок невозможно обеспечить полное окисление, (в частности образующейся СО), даже при наличии большого количества вторичного воздуха. Так как при сгорании углерода в СО выделяемое при этом тепло составляет менее 30% тепла, получаемого при сгорании углерода в СО₂, то уход СО в трубу представляет собою серьезную потерю тепла. В прежние времена конструкторы паровых установок концентрировали свое внимание на этой потере в слишком большой степени. Они определяли ее путем анализа отходящих газов и нашли, что избыток воздуха понижает процентное содержание СО в них. На самом же деле, в то время как избыток воздуха должен был бы понизить процентное содержание СО в отходящих газах, он абсолютное количество ее, получаемое от сгорания угля, понижает мало или даже вовсе не понижает. Другими словами, количество СО в отходящих газах понижается скорее благодаря разбавлению воздухом, чем от окисления до СО₂, так как это разбавление понижает скорость реакции (из-за понижения температуры газов) и сокращает время, в течение которого газы находятся в топочном пространстве, почти во столько же раз, во сколько раз скорость реакции

возрастает благодаря повышению концентрации кислорода. Кроме того ясно, что в печах, работающих с естественной тягой дымовых газов, употребление избытка воздуха увеличивает объем отходящих газов и увеличивает поэтому тягу, необходимую для преодоления гидравлического трения в печи и трубе. Так как эта тяга происходит только вследствие разницы между температурами отходящих газов и внешнего воздуха, это значит, что в этих случаях температура отходящих газов возрастает с увеличением количества воздуха. Следовательно, избыток воздуха повышает потерю тепла через трубу.

Но, с другой стороны, невыгодно слишком понижать избыток воздуха. В печах с топочной решеткой редко оказывается выгодным сокращать его до 40—50%, так как в противном случае в отходящих газах окажется слишком много окиси углерода, а в некоторых случаях даже дыма, вследствие несовершенного смешения и исключительной медленности реакции вторичного сгорания, вызванной чрезвычайно низким содержанием кислорода в газах в этом месте. Чем лучше поставлено смешение вторичного воздуха с продуктами первичного горения и чем больше предусмотрено топочное пространство, тем меньший излишек воздуха требуется и тем меньшей оказывается потеря тепла через трубы. Во многих печах для химических целей (муфели, реторты, печи для обжига глиняной посуды, отражательные печи и пр.) объем топочного пространства и температура в нем достаточны для полного вторичного горения.

Часто, особенно в химической практике, оказывается желательным распределить тепловую энергию, получаемую от сгорания топлива при сравнительно низкой, но обязательно равномерной температуре, по сравнительно большому пространству. Для этой цели непрактично про-

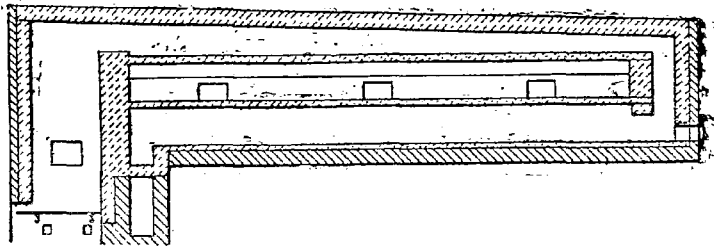


Рис. 50. Муфельная печь.

ектировать печь с угольной топкой так, чтобы обеспечить однородное непосредственное излучение горючего слоя ко всем точкам, подлежащим нагреванию. Опыт показал, что эта задача может быть разрешена первичным горением топлива на решетке с образованием горючего газа, сжигание коего может быть осуществлено именно там, где требуется тепло. Значительно лучшие результаты получаются, когда образовавшийся газ горит коптящим пламенем, т. е. когда при его горении образуется огромное число мельчайших частиц углерода, которые накаляются при реакциях горения и радиацией переносят энергию, полученную от процесса горения, к месту использования тепла. На практике этого можно лучше всего достигнуть, употребляя топливо с высокой теплотворной способностью и очень большим процентным содержанием летучих веществ и подавая воздух под решетку в количестве, достаточном лишь для перегонки этих горючих веществ и сожжения остаточного углерода. Летучие вещества таких углей всегда богаты углеродом и горят как-раз коптящим пламенем, выделяя большую долю всей энергии, получаемой от сожжения топлива, в виде излучения газового пламени в точке, весьма отдаленной от решетки, где топливо было сожжено.

В случае употребления топлива с большим содержанием летучих горючих веществ, т. е. выделяющего при коксовании большие количества горючих газов, тепло, развиваемое в топочной коробке, поглощается до известной степени эндотермическими процессами перегонки самого топлива, чем

избегается получение в этой части печи чрезмерных температур. Сгорание этих газов завершается в пространстве самой печи; таким образом тепло переносится из топочной коробки, где в нем нет надобности, в ту часть реакционного пространства, которое иначе было бы слишком холодным.

На этом основывается удобство так называемого „длинного пламени“ древесного топлива, которое долгие годы предпочитали при операциях, тре-

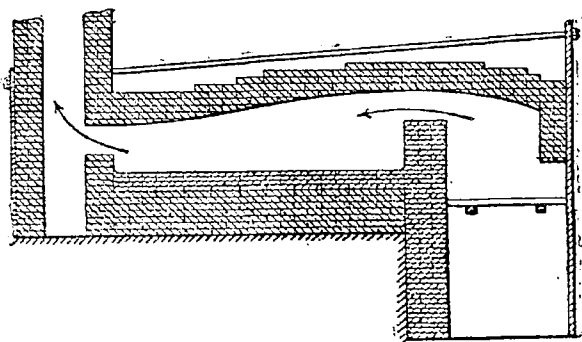
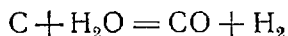


Рис. 51. Отражательная печь (укороченный тип).

Этот тип печи применяется тогда, когда является необходимым подвергнуть всю загрузку действию одинаково высокой температуры. Большая часть тепла передается загрузке путем излучения от топливной решетки к своду печи за порог, откуда оно отражается и передается излучением загрузке. Топочные газы уходят в две боковые трубы горячими. Применение обычно ограничивается периодическим типом операций.

Если же поддерживать умеренную интенсивность, то производительность установки уменьшится очень значительно. Это в особенности верно для случаев, когда при высоких температурах коррозионные свойства загрузки (разъедание) сильно возрастают, как, например, при выделке сернистого натрия, или сам продукт ухудшается, как, например, при обжигании извести; это замечание также верно и в том случае, когда необходимо иметь на большом пространстве однообразную температуру, как это имеет место при необходимости нагреть большой железный муфель (мангеймский процесс получения соляной кислоты из калиевой селитры). В этих случаях усвоение основных весьма разнообразных законов горения, имеет большое значение (см. гл. VI).

Дэвис¹ несколько лет тому назад показал, что производительность печи на коксовом топливе для производства соды по способу Л. Блана увеличилась почти на 300% путем простого приспособления для равномерного распределения пара, подводимого под колосники. Эндотермическая реакция



преследует три назначения: во-первых, она понижает чрезмерную температуру топочной коробки и прилегающей к ней части самой печи, увеличивая этим их долговечность; во-вторых, она доставляет большее коли-

чащих распределения средних температур по большой поверхности как, например, при обжиге извести и кирпича. Обычно хорош бывает для этой цели и высокосортный уголь с высоким содержанием летучих.

Если при употреблении бедного летучими угля или кокса желательно поддерживать во всем объеме топочного пространства равномерную температуру, то невыгоды от форсирования печи с большой нагревательной площадью окажутся очень велики. Если будем сильно нагревать отдельные части печи, то уча-

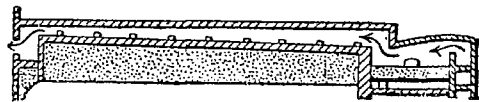


Рис. 52. Отражательная печь (удлиненный тип).

Этот тип печи применяется для подогрева загрузки, когда она в печи движется непрерывно в направлении, обратном потоку газов. В некоторых случаях материал обрабатывают, передвигая загрузку от руки. Значительно более совершенны печи, снабженные механическим конвейером для передвижения загрузки. Эффект сжигания топлива улучшен путем частичного возврата отработанного тепла из газов, по контакту газов с загрузкой и значительнее, и вследствие этого коэффициент теплопередачи низок.

¹ Davis, Chemical Engineering. Davis Bros., Manchester, England (1902).

чество горючего газа, который проходит в корпус печи, где может быть сожжен; в-третьих, наличие некоторого количества неразложившегося пара разбавляет горючие газы и тем понижает скорость горения и дает пламя меньшей температуры, но большее по объему. В конечном результате оказывается, что тепло равномерно распределено по всему объему печи, производительность ее увеличена и срок службы продлен.

Другая общеизвестная эндотермическая реакция: $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$, также может быть использована для получения тех же результатов, при чем с энергетической точки зрения она даже несколько экономичнее, так как исключает тепло, необходимое для производства пара. Даже такое малое содержание CO_2 , какое имеется в обыкновенном дымовом газе, производит свое действие, распределяя по большой поверхности тепло, образовавшееся в топочной коробке. И не только поглощение тепла из-за образования CO и ее последующее горение имеет здесь значение, но и разбавление горючих газов сопутствующими водяными парами и азотом рассеивает теплоту, увеличивая, как уже объяснено, объем пламени (см. стр. 152). Даже когда отходящий газ отводится непосредственно после того, как он покидает хорошо нагретую зону печи, потеря энергии, очевидно, очень незначительна по сравнению с рядом несомненных выгод. Эльдер воспользовался этим принципом для очень выгодной эксплуатации кильна для обжига извести; равным образом этот принцип часто применяется для нагрева больших муфель, реторт, калильных ящиков и других подобного рода аппаратов. В последнее время очень хорошее применение этот принцип нашел при отоплении обыкновенного кильна для красного кирпича. Паровая труба с многочисленными маленькими отверстиями расположена вдоль по длине каждой топочной коробки. Когда уголь хорошо разгорится, под огонь подводится пар. Объемистое пламя с низкой температурой проникает через всю массу кирпича, давая в более короткое время значительно больший выход доброкачественного кирпича.

Большой равномерности при распределении тепла можно достичь путем подачи вторичного воздуха не сквозь порог, а через последовательный ряд отверстий вдоль топочного пространства, при чем подача воздуха через каждое отверстие может быть хорошо отрегулирована [коксовые печи Семет-Сольвэй (Semet-Solvay), хотя они и отапливаются газом].

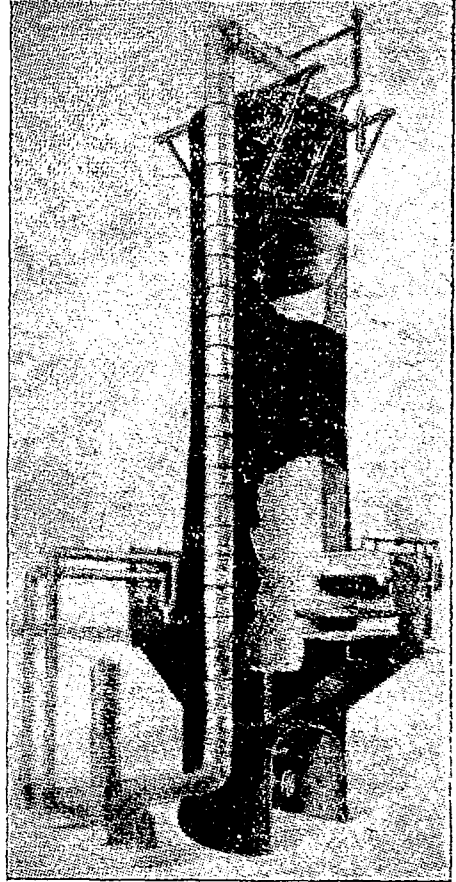


Рис. 53. Печь Догерти-Эльдред для обжига извести.

Печь с наружной топкой. Газы наверху печи сильно охлаждены, вследствие прекрасного контакта между ними и поступающей холодной загрузкой. Топочные газы подаются по трубе, находящейся ниже линии пола, где они разделяются для подачи газа к двум газодувкам, большая из которых нагревает основную массу газа в дымовую трубу, тогда как вторая служит для обратного направления другой части газа в две точки, которыми снабжена печь Догерти. Третья воздушная дувка нагревает воздух для горения. Разрез показывает только одну из частей печи — вход рециркуляционных газов и воздуха и внутреннее ее устройство. Труба для отвода топочных газов из печи не показана.

Нужно отметить, что газы, полученные от видоизмененного первичного горения малолетучего твердого топлива, не горят ярким пламенем и в этом отношении этот процесс менее удовлетворителен, чем в случае употребления высоколетучих углей. Однако в некоторых, случаях горючие газы вступают в тесный контакт с материалом, подлежащим нагреву, и в этих случаях поверхность этого материала сама может служить катализатором для реакции горения, если только она достаточно горяча. Вследствие того, что реакции протекают на самой поверхности материала, подлежащего нагреву, энергия, присущая горению, выделяется на самой поверхности и, следовательно, непосредственно поглощается ею. Таким образом, избегается потеря энергии, связанная с ее передачей.

Если нужно нагреть сравнительно небольшую поверхность до очень высокой температуры, следует избегать такого разбавления пламени, а топливо и воздух должны быть перед их соединением подогреты. Подогреть воздух всегда возможно, но экономично может быть подогрето лишь газообразное топливо. Найдено, что в случае сконцентрирования на небольшой поверхности высокой температуры даже такое количество водяных паров в воздухе, какое наблюдается при теплой погоде, оказывает большое влияние, вследствие эндотермической реакции их разложения. Так, в доменных печах, в местах поступления воздуха из воздуходувок, повышенная эффективность плавления восстановленного железа достигается путем удаления водяных паров из вдуваемого воздуха. Здесь желательно иметь атмосферу, более богатую кислородом, чем обыкновенный воздух (см. стр. 166).

2. ПЕЧИ НА ЖИДКОМ ИЛИ ПЫЛЕВИДНОМ ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Двадцать лет тому назад стали употреблять во вращающихся кильнах для обжига цемента пылевидное топливо (угольный порошок). Угольная пыль вдувается в печь сильной воздуходувкой и горит пламенем, имеющим приблизительно форму сильно удлиненного яйца. В больших печах это пламя имеет в своем самом широком месте от 0,6 до 1,2 м в диаметре, и длина его достигает 3—5 м. По существу самого способа, коим топливо вдувается, каждая его частица окружена слоем воздуха. Оно нагревается до накала отчасти вследствие теплопроводности, но главным образом излучением более горячей части пламени; поэтому летучие вещества топлива перегоняются при наличии избыточного воздуха. Таким образом, здесь или нет отложения сажи, или наблюдается очень незначительная тенденция к отложению ее, если только имеется достаточно воздуха для полного сгорания топлива. Пламя такой горелки исключительно горячо, и большая часть тепла выделяется в виде лучистой энергии.

Одним из недостатков пылевидного топлива является опасность пожара и даже взрыва пыли. Возможность последнего может быть исключена, если поддерживать степень концентрации пыли в употребляемом воздухе выше предела взрываемости. Опасность пожара может быть уменьшена употреблением для подачи пылевидного топлива воздухонепроницаемых каналов и принятием мер для избежания возгорания. Держать большие количества пылевидного топлива на складе неблагоразумно и лучше вести дело так, чтобы оборудование для помола угля соответствовало наибольшей потребности печи в угле и не хранить пылевидный уголь на складе для покрытия пиковой нагрузки. Уголь может доставляться от распылителя к горелке либо винтовым конвейером, либо воздуходувкой (так как он течет, как жидкость), либо в виде взвеси его в воздухе. При применении взвешенного в воздухе пылевидного топлива надлежит держать температуру воздуха, употребляемого при прогонке, ниже предела взрываемости.

Жидкое топливо сжигают, распыляя его сжатым воздухом или паром. В обоих случаях оно горит чрезвычайно горячим, богатым лучами пламенем. Простота сжигания и небольшие размеры топочного пространства делают употребление жидкого топлива очень выгодным.

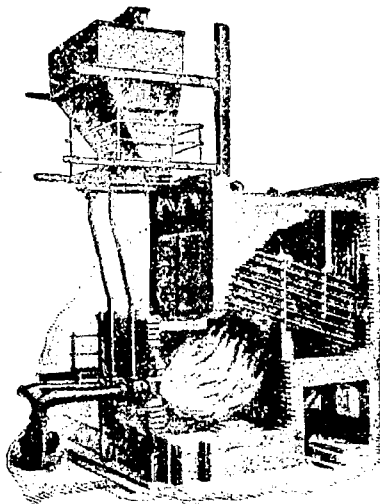


Рис. 54. Паровой котел с топкой для пылевидного топлива.

Указанная печь снабжена топкой, соответствующей конструкции обеспечивающей полноту сгорания. На некоторых установках производятся опыты инжектирования угля непосредственно сверху вниз, так что пламя отбрасывается назад. При этом стремятся направить частички золы вниз и сбросить их в зольник. Этот вид распыления является существенным улучшением.

в сфере действия пламени (навстречу тепловым лучам), чем увеличивают поглощение тепла и избегают плавления стенок топочного пространства. Иногда предстоит задача предупредить унос с газами зольной пыли; было предложено удалять ее осаждением по способу Котреля, но зола обычно бывает такой легкой, что вред от нее чрезвычайно мал. Стоимость монтажа и эксплуатации оборудования для пылевидного топлива высока для небольших установок, но это никоим образом не относится к жидкому топливу.

3. ПЕЧИ ДЛЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

При рассмотрении печи, отапливаемой углем, было указано, что равномерное распределение тепла лучше всего может быть достигнуто таким направлением первичного горения, при котором увеличивается выход газообразных продуктов; они затем сжигаются при вторичном горении в условиях, которыми можно управлять. Другими словами, наилучшего управления печью можно добиться, лишь применяя газообразное топливо.

Как уже было сказано, угольный и водяной газы слишком дороги для обычного употребления, а естественный газ доступен лишь в определенных местностях. Вследствие этого теплотехники разработали способы увеличения вторичного горения за счет первичного, обособив печь с твердым топливом и используя ее для производства горючего газа, называемого генераторным (см. стр. 169). Таким образом, этот газ сделался доступным для эксплуатации почти во всякого рода печах.

В виду того, что печь с газовым топливом в каждый данный момент содержит небольшое количество топлива, его сгоранием легко управлять. Так как необходимый воздух или газ, или оба вместе, подводятся в любое место вдоль всей печи, то оказывается возможным получить тепло именно там, где оно требуется. Невыгодным обстоятельством является то, что дешевое газовое топливо не горит коптящим пламенем, вследствие чего тепло пламени передается печи или загрузке путем теплопроводности, а не излучением. Если это представляет недостаток с точки зрения способности передачи тепла, то, с другой стороны, это большое преимущество в смысле получения однообразной температуры по всей печи. Но и этот недостаток можно уменьшить, пользуясь „горением на поверхности“.

Горение на поверхности. Горение газов может быть в значительной степени ускорено благодаря контакту с горячими поверхностями. Кроме того, так как вследствие такого сгорания газа тепло получается на самой поверхности твердого тела, из-за чего последнее накаляется до

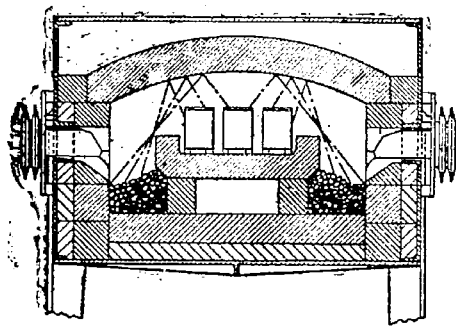


Рис. 55. Печь для сжигания газообразного топлива на контактных поверхностях.

Газ и воздух смешиваются, проходят через боковые дверцы и напр. вливаются на массу кускового огнеупорного материала на полу печи. Отсюда тепло излучается на свод и передается далее на муфел лучеиспускающим, как это показано пуветиром на рисунке.

бела, то в результате, хотя газ сам по себе не излучает теплоты, тем не менее тепло, выделяющееся от его горения, может быть получено в лучистой форме. Лучшее всего этого можно добиться, смешивая газ с воздухом в возможно более близких к теории пропорциях и сжигая эту смесь при пропускании ее через пористую огнеупорную массу, как, например, огнеупорный кирпич или алунд. Этот материал должен быть пористым и губчатым, чтобы получилась наибольшая поверхность. Если катализатор помещен горизонтально или под небольшим углом, он может состоять из маленьких кусочков толченого огнеупорного материала. Горение происходит внутри массы, и вся она накаляется в высокой степени. Этим путем может быть перенесено свыше двух с половиной миллионов кал. в час через каждый m^2 поверхности. Не взирая на кратковременность контакта, сгорание получается необычайно полное, и избыток воздуха может быть сведен до минимума. Для предупреждения вспышек смеси в трубах, ведущих к контактной массе, смесь должна прогоняться через них с большей скоростью, чем скорость движения пламени в газовой среде. В узких холодных трубах допустимая скорость удивительно низка.

В то время, как горение на поверхности, в узком смысле слова, не может найти большого распространения, каталитические поверхности играют значительную роль в каждой газовой печи. Каталитические действия стен печи и ее труб, а также насадок, которые можно ввести в топочное пространство, делают возможным достичь полного сгорания даже при сравнительно низких температурах. Во многих печах поверхность самих предметов служит этой цели (кильны для обжига извести, кирпича, глиняной посуды, обжигательные печи и т. д.).

Потеря давления из-за трения потока газов при проходе через газовую печь может быть вычислена при помощи обычных уравнений (стр. 66 и сл.). В американской практике редко пользуются усиленной тягой, вследствие чего скорость движения газов держится на низком уровне. В простых печах она обыкновенно держится в пределах 3—5 м в секунду, но, если путь газа извилист или расстояние большое, эти величины должны быть соответственно уменьшены.

Газообразное топливо хорошо для таких печей, где требуется особо точное управление при высоких температурах, для получения полной равномерности нагрева (печи для мартеновской стали, горны для обжига фарфоровой посуды и т. д.). В этих случаях следует уделить тщательное внимание вопросу подвода горючего, однородности его смешения с воздухом и распределению его в печи. В кольцевых и тоннельных печах (стр. 159) полезно подавать газ последовательно в небольших количествах через ряд отверстий вдоль печи. Отверстия для газов должны быть так распределены и печь так сконструирована, чтобы было обеспечено наилучшее смешение газа с воздухом и распределение смеси над загрузкой. Печь должна быть так сконструирована, чтобы оказалось возможным, в случае каких-либо неполадок, изменить расположение газовых отверстий и направление газовых потоков в печи после ее сооружения. Осуществление таких изменений в печи является существенным моментом в искусстве управления ею.

Три главнейших типа газовых печей — кольцевые тоннельные и вращающиеся — будут рассмотрены в разделе, озаглавленном „Использование тепла отработанных печных газов“.

4. ПЕЧИ, В КОТОРЫХ ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО СМЕШИВАЕТСЯ С НАГРЕВАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ

К печам такого типа относятся печи для изготовления кирпича, доменные печи, печь Дитча (Dietzsch) для обжига извести (см. стр. 158) и кольцевые печи на твердом топливе. Лучшим представителем этого типа печей может служить вращающаяся печь с пылевидным угольным топливом (см. стр. 160).

5. АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ НАД ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ПЕЧИ

В каждой печи обыкновенно бывает легко определить в любой момент состояние печи и управлять работой печи, т. е. определить количество загрузки, повышение ее температуры и те химические изменения, которые могут иметь в ней место. С другой стороны, печи могут удовлетворительно работать, поскольку это касается загрузки, и все же очень плохо идти с точки зрения процессов горения. Тепловые потери печи обыкновенно сводятся к потерям излучением, в дымовых газах и в остатках топлива (в золе). В общем потери излучением находятся вне контроля работающего на печи, за исключением тех случаев, когда печь перепроектировывается и перестраивается. Потери горючего в золе можно определить приближенно расчетом по анализу (отбор подходящей пробы должен быть произведен с чрезвычайной тщательностью). Но обе эти потери обычно незначительны по сравнению с потерями в дымовых газах. Следовательно, контроль над горением в печи зависит от анализа дымовых газов и от определения их температуры. Например, при небольшой затрате времени и труда можно путем определения теплотворной способности топлива, количества горючего в золе и температуры и анализа дымовых газов получить такую же картину работы парового котла, какую дает испытание котла, заключающее в себе полный тепловой баланс его.

Вследствие этого в котельную практику быстро внедряется применение автоматических анализаторов CO_2 . Одним из таких анализаторов-регистраторов является механически действующий прибор Орса (Orsat), в других аппаратах пропускают пробу газа последовательно через две диафрагмы, поглощая CO_2 твердой натронной известью, помещенной между ними, и измеряя количество CO_2 по изменению потери давления при прохождении

газа через вторую диафрагму газа, вследствие уменьшения его объема. В хорошо спроектированных котельных топках СО настолько полно окисляется при вторичном горении, что количество CO_2 может считаться вполне удовлетворительным показателем употребленного избыточного воздуха и общей эффективности процесса горения. В печах, которые вследствие неудачной конструкции или плохого управления не дают такого эффекта, измерители CO_2 не дадут нам полной картины, так как можно наличие одного и того же количества CO_2 получить и при недостатке и при избытке воздуха. В первом случае мы будем иметь значительное количество CO , а может быть и водорода в газе, а во втором — избыток кислорода. По этой причине измерители CO_2 сами по себе имеют ограниченное значение для газовых печей. Сконструированы также измерители СО и кислорода, но они не получили еще широкого распространения в промышленности.

Эти измерители служат ценным пособием в деле управления печами, но пользование ими связано с рядом механических затруднений из-за чувствительности действующего механизма к пыли, быстрого расхода химических реактивов и т. п. В случаях, когда на их показаниях основывается работа, наблюдения должны производиться с большой тщательностью и проверяться анализом Орса.

Для обыкновенной опытной проверки аппараты Орса или их видоизменения предпочитают самопишущим измерительным приборам.

Ошибки анализа Орса

Как будет показано в связи с дальнейшими вычислениями, небольшая ошибка в определении количества двуокиси углерода в дымовом газе влечет за собою серьезную ошибку в конечных результатах вычисления. Проба газа в аппарате Орса обыкновенно собирается над водой. Эта вода растворяет некоторое количество CO_2 , вследствие чего уменьшается определяемое количество ее в газе.¹ При анализе газов, где требуется точность, следовало бы всегда употреблять в приборах ртуть. О величине ошибки можно судить по следующим данным, взятым из бюллетеня № 2 Горного бюро САСШ (Bulletin 2 of the U. S. Bureau of Mines).

В котельном свидетельстве № 2, приведенном Бюро в бюллетене, полный элементарный анализ сухого угля дает содержание С в 60,15%, Н — 4,35%, О — 21,18%, N — 1,07%, S — 0,72% и золы — 12,53%. Количество молей H_2 на 100 т угля поэтому будет 4,35/2,016, а атомов кислорода — 21,18/16. Разница будет 0,833 моля чистого водорода (H_2). Отношение углерода к чистому водороду (С/ H_2) будет, следовательно, 60,15/12. 0,833 = 6,03. Вводя поправку на серу, получим 5,57 — наименьшее значение, которое можно получить, основываясь на данных полного элементарного анализа. Так как количество золы в печи составляло 8,61% сухого топлива, при содержании в ней 15,1% углерода, то, следовательно, 2,16% углерода топлива оставалось несожженным в золе. Таким образом отношение С к чистому H_2 в дымовом газе должно быть 5,89 или с поправкой на серу — 5,45.

¹ Возьмем для примера газ, содержащий 11 см³ CO_2 и 90 см³ других, не кислотных газов. Если ввести 101 см³ этой смеси в прибор Орса, то 1 см³ из имеющегося количества CO_2 свободно может раствориться, и количество оставшейся пробы будет очевидно 100 см³. Таким образом убыль над едкой щелочью будет в 10 см³. После обработки щелочью объем пробы в бюретке постепенно увеличивается, вследствие перехода CO_2 из воды в газ, из-за его более низкого парциального давления, но после вторичной или третичной обработки газа едкой щелочью объем пробы снова делается равным 90 см³. Это есть одна из причин кажущегося медленного поглощения CO_2 едкой щелочью при анализах газов. Нужно заметить, что анализ дает 10% содержания CO_2 в пробе, в то время как в действительности она содержит около 11%.

Анализ дымового газа показан в следующей таблице:

		С	O ₂
CO ₂	10,04	10,04	10,04
O ₂	9,04	—	9,04
CO	0,16	0,10	0,05
N ₂	80,82	—	—
		10,14	19,13

$$O_2 \text{ из воздуха} = 80,82 \cdot 20,9/79,1 = 21,355$$

$$O_2 \text{ эквивалентно чистому водо-} \\ \text{роду в топливе} = 2,225$$

$$\text{Чистый водород } H_2 = 4,45$$

$$\text{Откуда: отношение С к чистому } H_2 = 10,14/4,45 = 2,28$$

Ясно, что анализ газа дает отношение углерода к чистому водороду вдвое меньшее, чем действительное. Несожженное горючее в золе дает ошибку того же знака, но объяснять такую ее величину одним наличием несожженного топлива в золе равносильно предположению, что 60% углерода угля остается несожженным. Ошибка существенно увеличивается от того, что количество CO₂, принимаемое в газе, приблизительно на 1% ниже фактического. Приходится принять значение CO₂ выше на эту величину по сравнению с данными анализа. Имея в бюретке ртуть, можно было бы избежать этой ошибки.

Нужно заметить, что так как количество дымовых газов исчислено на основе углеродного баланса, то этим в их исчисление введена ошибка на 10%, которая влечет за собою такую же ошибку в тепловом балансе при определении потери в дымовой трубе. Это весьма важное обстоятельство.

Тот факт, что газовый анализ, даже при отсчетах над водой, тем не менее является анализом сухого газа, часто вызывает затруднения при недооценке его. Этот факт неясен потому, что газ, измеренный при комнатной температуре над водою, состоит на 3% из водяных паров. Нужно, однако, помнить, что все измерения делаются при одинаковой температуре, а, следовательно, и при одном и том же парциальном давлении водяного пара в газе, так что, в случае когда половина газа оказывается поглощенной каким-либо реактивом, половина водяных паров, измеренных первоначально, будет сконденсирована. Это как бы означает, что анализ произведен не при атмосферном давлении, а при некотором постоянном давлении, равном атмосферному минус давление водяных паров при температуре анализа. Если отсчет произведен под ртутью, то необходимо держать над ней каплю воды для насыщения газа или совершенно высушить его еще до измерения, так как в противном случае парциальное давление водяного пара в газе будет отличаться от упругости его над употребленными поглотителями.

6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛА ОТРАБОТАННЫХ ПЕЧНЫХ ГАЗОВ

В каждом процессе, протекающем в печи, требуется или нагреть загрузку до некоторой определенной температуры (кальцинирование и тому подобное), или получить тепло от топочных газов определенной высокой температуры, необходимое для осуществления той или другой реакции (разложение известняка, плавки и т. п.). В том и другом случае требуется известное количество тепла при температуре реакции или выше ее. Когда сгорает топливо, возможной предельной температурой является, во-первых, температура, при которой становится серьезной опасность обратного течения реакций горения, и, во-вторых, температура, до которой освобожденная при горении тепловая энергия может повысить температуру продуктов горения. Пользуясь данным топливом мы не можем превзойти предельную температуру, установленную первым из перечисленных условий, но можем избежать наступления второго случая.

Далее, так как кислород, необходимый для процесса горения, поступающий из воздуха, приносит с собою почти четверной объем инертного азота с его большой теплопоглощательной способностью, то неудивительно, что очень часто второе из ограничительных условий является наиболее важным. Для примера возьмем генераторный газ, теплота горения которого повышает температуру продуктов собственного сгорания только до 1500°C . Если оказывается необходимым использовать этот газ для осуществления реакции, протекающей при 1400°C , то совершенно ясно, что только небольшая часть его тепла может быть утилизирована с пользой, в то время как большая часть его будет потеряна в виде тепла отходящих газов. Если же тепло отходящих газов использовать для нагрева загрузки, горючего и воздуха до температуры, возможно близкой к температуре реакции (в данном случае 1400°), то наиболее значительная часть этого тепла оказалась бы с пользой рекуперированной, и расход топлива для данного процесса был бы сведен до минимума против необходимого при других условиях.

Принцип противотока

Для достижения вышесказанного, очевидно, необходимо применить принцип встречных потоков материалов, между которыми желателен теплообмен. Другими словами необходимо, чтобы физическое тепло, содержащееся в отходящих газах, пока они еще очень горячи, использовалось только для окончательного повышения температуры поступающих материалов, в то время как предварительное нагревание поступающих материалов должно быть выполнено за счет тепла продуктов реакции, уже после того как они уже значительно охладились.

Применение этого принципа „регенерации“ тепла весьма существенно для эксплуатации всяких печей с высокими температурами. Даже в самой обыкновенной низкотемпературной печи — паровой установке — этот принцип с успехом применен в форме экономайзера, предназначенного для подогрева питательной воды теплом отходящих газов. Самый простой способ осуществления этого — дать газообразным продуктам горения возможность обтекания кусков твердой загрузки или прохождения сквозь жидкую загрузку, поступающую в печь в противоположном нагретым газам направлении, в то время как необходимый для горения воздух входит в соприкосновение с горячими жидкими или твердыми продуктами реакции, протекающей в печи, также при взаимно противоположном направлении движения этих двух реагентов.

Кильн Дитча

По вышеуказанным принципам работают кильны Дитча и кольцевая печь Гофмана. В обыкновенной шахтной печи, в которой и загрузка и топливо поступают сверху, нет возможности как следует подогреть загрузку и охладить отходящие газы, так как горение начинается вблизи верха печи и для нагрева не остается необходимого пространства.

Кильн Дитча является шахтной печью, спроектированной так, что топливо подается по середине печи, чем избегается преждевременное возгорание.

Он состоит из вертикальной шахтной топки, имеющей горизонтальную среднюю часть или полку, как показано на рис. 56.

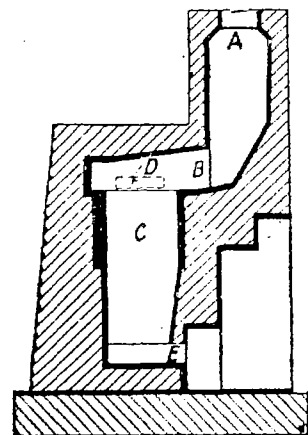


Рис. 56. Кильн Дитча.

Загрузка поступает через А и спускается по шахте до платформы В. Здесь она смешивается с топливом, поступающим через D, и спускается в шахту С. Воздух вдувается через Е. Горение идет в верхней части шахты С, горячие газы по-

догревают загрузку в А, а горячая масса, спускаясь по шахте С к разгрузочному отверстию, нагревает поступающий воздух. Наблюдения, произведенные над такой печью, показали большую экономию в топливе, но эксплуатационные расходы по рабочей силе оказались весьма высокими.

Кольцевая печь Гофмана

Кольцевая печь Гофмана чрезвычайно эффективна и очень выгодна для всех отраслей промышленности, в которых периодически требуется постепенное нагревание и медленное охлаждение. Она была первоначально спроектирована для твердого топлива. Такая печь состоит из круглой, эллиптической или прямоугольной галереи, построенной вокруг центральной трубы. Эта галерея (рис. 57) разделена на отдельные камеры, имеющие в стенках отверстия Е, наружную дверцу С и трубу Д, ведущую в центральный дымоход А. Камеры снабжены диафрагмами и клапанами, позволяющими по желанию открывать и закрывать сообщение между ними.

Во время эксплуатации печи горение происходит одновременно лишь в одной камере. Две камеры на противоположной стороне очага горения находятся в стадии загрузки и разгрузки, а все остальные или нагреваются отходящими газами до температуры горения или охлаждаются, подогревая необходимый для горения воздух. Воздух входит через дверцу разгружающейся камеры (1 из ряда 14 камер, показанных на чертеже) и продувается через примыкающие камеры (2, 3, 4, 5 и 6), пока не достигнет действующей камеры — очага горения (7); эти камеры содержат готовый продукт, который нагревает воздух, а сам охлаждается.

Из действующей камеры горячие отходящие газы проходят через камеры 8, 9, 10, 11, 12 и 13, нагревая загрузку, и, наконец, отводятся в дымоход А через трубу Д в камере 13. Камера 14 тем временем совершенно отключена от всех других и находится в стадии загрузки. После того как горение в действующей камере закончено,

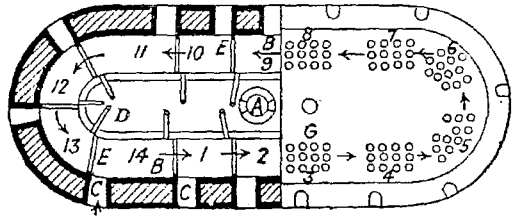


Рис. 57. Кольцевая печь Гофмана для твердого топлива.

приводится в действие соседняя камера (8), в которой горение еще не происходило, путем подброски топлива через отверстия наверху; вновь загруженная камера (14) присоединяется к ряду камер через соединение ее с дымоходом и с камерой 13 при одновременном закрытии трубы из камеры 13 в дымоход; разгруженная камера (1) загружается, а самая холодная камера 2 с готовым продуктом открывается для воздуха и разгружается.

Очевидно, что в печи такого типа действие встречных потоков в высокой степени эффективно, а потому затраты тепла исключительно низки. Преждевременное возгорание избегнуто тем, что топливо загружается не раньше, чем камера вполне готова для процесса горения. Главнейшими недостатками печей этого типа следует считать высокое первоначальное капиталовложение, дорогостоящий уход и термические деформации сооружения из-за повторного перемежающегося нагревания и охлаждения.

Кольцевую печь Гофмана можно очень легко и эффективно эксплуатировать на газовом топливе, и все новейшие установки, по крайней мере в Америке, именно такого типа. Газ может быть пущен сразу в несколько камер во избежание местного перегрева. В виду очень значительного надогрева воздуха, необходимого для сгорания топлива, высокие температуры могут быть с успехом получены даже с малотеплотворным топливом (генераторный газ), а большой объем протекающего сквозь камеры газа

способствует равномерному распределению тепла. Печь, работающая на газообразном топливе, изображена на рис. 58—59.

Подобные печи должны очень тщательно сооружаться в предвидении периодического удлинения и сжатия камер. Особенно в случае работы с высокими температурами следует для постройки употреблять огнеупорный материал лишь наивысшего качества.

Вращающиеся печи

При пользовании пылевидным топливом, вдуваемым струей воздуха, удается достигнуть исключительно регулярной подачи топлива, а в случае прохождения пламени через загрузку эффективность нагревания чрезвычайно возрастает. Это достигнуто во вращающейся печи, состоящей из трубчатого корпуса из котельного железа, длиной от 10 до 70 м и диаметром от 2 до 4 м, выложенного (футерованного) огнеупорным кирпичом или другим огнеупорным материалом; выбор огнеупорного материала зависит от характера процесса, который предполагается проводить в печи. Загрузка нагревается введением в середину печи струи пылевидного угля, вдуваемой вместе с воздухом, при медленном вращении печи, вследствие чего содержимое печи движется вдоль корпуса и непрерывно ссыпается сквозь пламя.

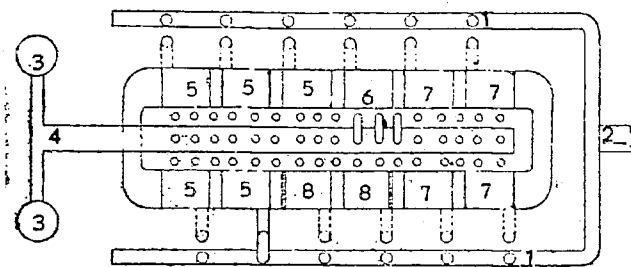


Рис. 58.

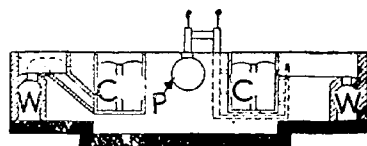


Рис. 59.

Кольцевая печь Гофмана для газообразного топлива.

1. Канал для отработанных топочных газов. 2. Дымовая труба. 3. Газогенератор. 4. Трубопровод газогенераторных газов. 5. Камера с холодным материалом (охлаждение топочных газов). 6. Камера с очагом горения. 7. Камера с обожженным материалом (подогрев воздуха). 8. Разгрузочная камера.

Горючие газы распределяются через центральный газоход по камерам при помощи нескольких передних обращенных патрубков, соединяющих газоход с той камерой, в которой в данный момент происходит горение. Патрубки эти снабжены регулирующими вентилями. Газ в самую камеру попадает несколькими ходами в целях обеспечения большей равномерности нагрева: перегрев таким образом предупреждается системой подачи газа в камеру.

Аналогичными патрубками отводятся и дымовые газы из соответствующей (последней по ходу газов) камеры. Отверстия для соединительных патрубков в тех камерах, которые в данный момент должны быть отъединены от оборотных газоходов, перекрываются шиберами. Все проходы для газа должны быть достаточных размеров во избежание больших потерь напора при пропускании больших количеств газов и воздуха.

Равномерность нагрева и охлаждения вполне достижима при тщательности загрузки, при хорошей конструкции междуканальной коммуникации и, особенно, при правильном распределении газа в камере с очагом горения.

Далее, когда печь наклонена на небольшой угол к горизонту, загрузка постепенно движется вперед, пока не дойдет до разгрузочного отверстия. Подобная печь может работать или с параллельным током или противотоком, и загружаться или с перерывами или непрерывно. При работе с противотоком, очевидно, получается некоторое рекуперирование тепла, хотя и немного меньшее, чем в кольцевой печи, вследствие более плохого контакта между загрузкой и газами. Большой выгодой вращающейся печи является дешевизна эксплуатации и ухода, что имеет первостепенное значение в странах, где топливо дешево, а рабочая сила дорога.

Как показано на стр. 146, энергия быстрее всего передается в форме теплового излучения. Пылевидный уголь представляет собою идеальный источник такой формы энергии, и подобный тип печи, повидимому, может в будущем оказаться еще более выгодным, чем мы ныне предполагаем. Если загрузка находится в жидком или во взвешенном в жидкости виде, она может быть распылена соплом и вдута в топочное пространство; при этом как испарение, так и горение, а также кальцинирование

и всякая другая химическая реакция протекают с большой быстротой. Если загрузка имеет вид мелкого порошка, она может быть агломерирована в небольшие шарики или кусочки, путем перемешивания этого порошка с небольшим количеством подходящего связывающего материала, как жидкая смола или раствор кремнекислого натрия.

Невыгодным моментом у обыкновенного типа вращающихся печей является затруднительность присоединения к ним приспособлений для использования тепла в целях, например, нагрева воздуха. Но трудности эти, конечно, ни в коем случае не непреодолимы, и вопрос только во времени, в течение которого экономия в топливе покрывает издержки стоимости и эксплуатации такой установки.

Если шлак и зола, получающиеся при употреблении в таких печах твердого топлива, нежелательны с точки зрения качества конечного продукта, то ясно, что эти печи должны отапливаться газообразным топливом. Твердое топливо может употребляться, однако, при наличии топочной коробки и решетки, обособленных от камеры, в которой происходит реакция, при чем пламя подводится к загрузке через порог.

Туннельная печь

Другим типом печи, также с встречными потоками загрузки, воздуха и отходящих газов, а потому и с прекрасным использованием тепла, является туннельная печь. Она разработана в недавнее время для нагрева материалов, которые нельзя встряхивать и перелопачивать, как это имеет место во вращающейся печи, и которые требуют более короткого времени для нагрева и охлаждения, чем цикл в кольцевой печи. Печь представляет туннель, через который продвигаются вагонетки с загрузкой. Вагонетки движутся по стальной колее при помощи зубчатой передачи, при чем вся надстройка на вагонетке должна быть сделана из огнеупорного материала, и нижняя часть ее защищена от жара обособлением ее в специальной низкой галлерее или, в некоторых случаях, применением затвора-жолоба, наполненного песком, в который погружается щит, прикрепленный к вагонетке. Эти печи обычно отапливаются газом, при чем топливо вводится в печь приблизительно по середине туннеля. Они дают исключительную возможность управлять процессом горения, проводимым обыкновенно при температурах выше 1400°C . Эти печи — классический пример современного устройства печных установок.

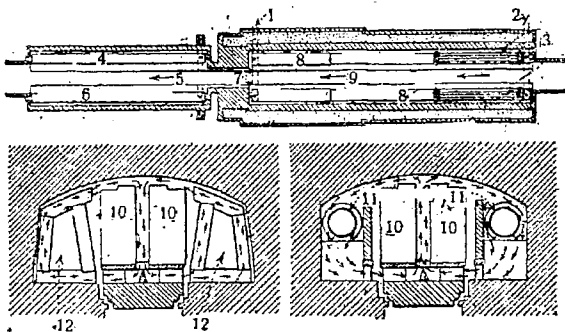


Рис. 60. Туннельная печь системы Дресслера. Стрелка дает картину „термосифона“ в печи для обеих зон, т. е. зоны нагрева и охлаждения. 1. Вход газа. 2. Выход газа. 3. Железные дымоходы. 4. Трубопровод для горячего воздуха. 5. Охлаждающая зона. 6. Трубопровод для горячего воздуха. 7. Впуск воздуха. 8. Камеры горения. 9. Зона нагрева. 10. Вагонетки с материалом. 11. Охлаждающие трубопроводы. 12. Камеры горения.

Регенераторы и рекуператоры

В тех случаях, когда загрузка невелика или когда вследствие химического взаимодействия непосредственный контакт загрузки с продуктами горения недопустим (как это бывает при пользовании муфелями и ретортами), физическая теплота газообразных продуктов горения должна быть использована для нагрева топлива и воздуха. Фактический контакт в этих случаях невозможен, но существует два способа осуществления возврата тепла. В первом топливо и воздух вступают раздельно друг от друга

(во избежание преждевременного возгорания) через соответствующие каналы в подогреватель, отделенный от продуктов горения перегородками, через которые и идет теплопередача, при чем движение продуктов горения при выходе из печи происходит навстречу поступающему топливу и воздуху. Этот способ известен под названием рекуперации. Его ценность значительно уменьшается из-за того, что в печах с высокими температурами нельзя применять дешевого металла для перегородок, которые должны противостоять разъедающему действию горячих газов, в то время

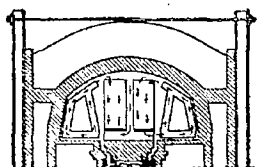


Рис. 61. Поперечный разрез туннельной печи Дресслера, показывающий циркуляцию газов через загрузку.

как перегородки из огнеупорного керамического материала, которыми вследствие этого нужно пользоваться, дороги, хрупки, пористы и являются плохими проводниками тепла. Поэтому этот способ мало распространен, хотя он дает равномерное нагревание, недостижимое никаким другим способом.

Другой способ возврата тепла состоит в том, что продуктам горения дают возможность проходить и вместе с тем нагревать камеры, наполненные огнеупорным материалом в возможно большем количестве и с возможно большей поверхностью в виде насадки регенератора, а вводимый воздух и топливо (если оно газообразно) нагреваются, проходя через

такие же камеры, предварительно нагретые печными газами.

Необходимо только предусмотреть два канала для газа и два для воздуха. В то время как один канал каждой пары нагревается отходящим газом печи, два других охлаждаются поступающими в печь газообразным топливом и воздухом; иными словами, в то время как отходящий газ отдает свое физическое тепло кирпичам двух камер, кирпичи двух других возвращают тепло газу и воздуху, поступающим в печь. Такой регенеративный способ возврата тепла. Здесь периодической сменой каналов для горящих отходящих газов и для холодного воздуха и газообразного топлива, при помощи перекидных клапанов, мы большое количество тепла, обычно теряемое с отходящими газами, сохраняем в тепловом цикле печи. При этом имеется выгода в простоте конструкции, но требуется постоянный внимательный уход; кроме того, возможны колебания температуры печи, связанные с неоднородностью работы отдельных камер. На первый взгляд как будто кажется, что в этой системе не осуществлен принцип противотока, но если воздуху и газообразному топливу дать течь в камерах в направлениях, противоположных потоку продуктов горения, то выгоды принципа противотока будут и здесь реализованы. Горячие отходящие газы, входя в одну часть камеры, доводят ее до высокой температуры, при чем другая часть камеры нагревается сравнительно лишь незначительно, так как газы уже успели сильно охладиться, и, наоборот, — холодный воздух, поступая в противоположном направлении, мало нагревается вначале вследствие сопротивления со сравнительно холодными стенками этой части камеры, но доходит до возможно высокой температуры от контакта с самым горячим кирпичом первой части камеры.

В частном случае доменной печи, где предварительный подогрев первичного воздуха необходим для получения тепла при высоком темпе-

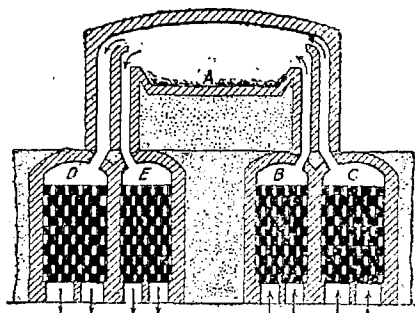


Рис. 62. Горн с регенеративной топкой.

Рисунок ясно указывает на значительную разницу объемов газового и воздушного регенераторов. Это объясняется объемом пропускаемого воздуха. Конструкция камер печи должна быть тщательно выполнена в целях наибольшей равномерности распределения в ней пламени.

Обозначение: С — воздух, В — генераторный газ, D и E — продукты горения.

ратурном уровне, потребном для плавки железа, — почти вся физическая теплота доменных газов идет на нагрев шихты, состоящей из руды, флюса и топлива в верхней части самой домы, а на нагрев воздуха остается лишь незначительная часть. В этих случаях пользуются рядом камер или печей регенераторного типа, так называемых, кауперов, которые нагреваются путем сжигания в них некоторой части отходящих газов, взятых из колошника домы. Кауперы представляют высокие цилиндрические стальные корпуса, выложенные огнеупорным кирпичом и заполненные огнеупорной насадкой регенератора или трубами.

Регенераторная печь должна быть сооружена очень тщательно из лучшего огнеупорного кирпича; необходимо такое расположение кирпича, чтобы достигался хороший контакт кирпичной поверхности с газами, но в то же время уменьшалось сопротивление течению газов; эти печи должны быть так разработаны, чтобы могли выдерживать расширение и сжатие, вызываемые изменениями температуры, которым они подвергаются. Выгодным обстоятельством является то, что, как показано выше, в каждой отдельной точке изменения температуры не слишком резки. Регенераторы располагаются иногда ниже, иногда рядом с топкой и обыкновенно бывают прямоугольными. Хорошую передачу большого количества тепла, благодаря большой скорости потока газа, прежде всего можно обеспечить тем, что делают их, хотя бы за счет увеличения гидравлического сопротивления, длинными и узкими. К сожалению, по конструктивным условиям это бывает часто невыполнимым.

Эффективность регенераторных насадок для возврата тепла зависит целиком от коэффициента передачи тепла от насадки к газам, проходящим через них. При нагреве насадка имеет температуру ниже, чем горячие газы, проходящие через нее в трубу. Теплота, отнятая от этих газов, а, следовательно, и понижение температуры, которое произойдет прежде, чем газы попадут в трубу, могут быть определены на основании существующей разницы в температурах насадки и газа с применением коэффициентов теплопередачи. Равным образом средняя температура, до которой падает температура насадки при прохождении воздуха, зависит от передачи тепла в течение этой части цикла. Периодические изменения в направлении передачи тепла несколько осложняют вычисления по сравнению с обычным расчетом теплообменной аппаратуры.

Кривые на рис. 63 показывают температурные условия в регенераторе, в котором воздух входит снизу и уходит вверх, в то время как отходящие газы текут вниз в противоположном направлении. Верхняя кривая в каждой из трех групп показывает температурные условия в каждой отдельной точке регенератора в конце нагревательного цикла перед самой перекидкой клапанов или в начале продувания воздуха. Нижняя кривая в каждой паре показывает соответствующие условия в конце продувания воздуха или тотчас после того, как отходящие газы прошли через насадку. При начале продувания воздуха кирпич горяч, и кривая температуры воздуха bc_1 , высока. Во время продувания кирпич охлаждается, и кривая температуры воздуха соответственно падает. Средняя температура, которой достигает воздух, обозначена точкой c . После перекидки клапана температура отходящих газов, поступающих в холодную насадку, понижается, как это показывает кривая ad_1 .

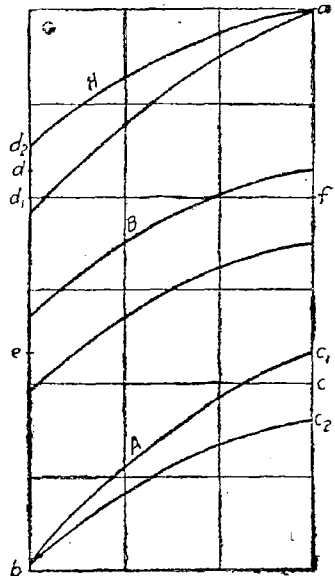


Рис. 63. Ord. — Температуры. Abs. — Высота регенератора. H — Горячие газы. B — Кирпичная насадка. A — Воздушное дутье.

В то время как температура кирпича повышается, тепло, возвращаемое отходящими газами, уменьшается; поэтому в конце концов температура доходит до точки, указываемой верхней из двух кривых — ad_2 , а средняя температура газов, уходящих в трубу, d .

Средняя разница между температурами кирпича и воздуха во время продувания и между горячими газами и кирпичом после перекидки клапана не меняется значительно на всем протяжении генератора сверху до низу. Поэтому допустимо пользоваться средней арифметической разницей температур, как средней разницей температур в системе. Иными словами, мы можем написать:

Средняя разница температуры газа и кирпича:

$$(\Delta t)_G = \frac{(a-f) + (d-e)}{2} \dots \dots \dots (1)$$

Средняя разница температуры кирпича и воздуха:

$$(\Delta t)_A = \frac{(f-c) + (e-b)}{2} \dots \dots \dots (2)$$

В пределах возможных скоростей горения, можно считать, что коэффициент передачи тепла пропорционален скорости:

$$h_G = \alpha N_G / A_m; \quad h_A = \alpha N_A / A_m \dots \dots \dots (3)$$

Полное количество тепла, передаваемого в минуту горячими отходящими газами кирпичу, будет:

$$\frac{N_G (a-d) s}{m} = \frac{\alpha N_G B}{A_m} \left[\frac{a-f+d-e}{2} \right] \dots \dots \dots (4)$$

и, равным образом, кирпичом воздуху:

$$\frac{N_A (c-b) S}{M} = \frac{\alpha N_A B}{A_m} \left[\frac{f-c+e-b}{2} \right] \dots \dots \dots (5)$$

Складывая уравнения 4 и 5, получаем:

$$(a-d) s + (c-b) S = \frac{\alpha B}{A} \left[\frac{a-c+d-b}{2} \right] \dots \dots \dots (6)$$

Тепловой баланс цикла будет:

$$N_G (a-d) s - R_G = N_A (c-b) S + R_A = p w \Delta \dots \dots \dots (6a)$$

где R_G и R_A означают потерю за цикл тепла, затраченного на нагрев окружающих тел излучением и теплопроводностью соответственно при газовом и воздушном дутье.

Обозначения

(Все количества—средние за цикл)

- a = температура поступающего горячего дутья в °Ц
- b = " вдуваемого воздуха в °Ц
- c = " уходящего " в °Ц
- d = " горячего газа в °Ц
- e = " кирпича на холодном конце в °Ц
- f = " " горячем " в °Ц
- N_G = количество молей горячего газа за цикл
- N_A = " " воздуха за цикл
- ρ = удельная теплоемкость насадки
- m = минуты на стороне газа (время пребывания)
- M = " " воздуха (время пребывания)
- s = молекулярная теплоемкость газа
- S = " " воздуха
- A = среднее свободное поперечное сечение в m^2
- B = полная нагревательная поверхность в m^2

Δ = среднее колебание температуры в насадке.

¹ Johnson, Blast Furnace Construction, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1917, 230. Diehl, Eng. Soc. W. Pa., Dec., 1912. Litinsky, Feuerungstechnik, 1917, 149. Maccoun, Year-book Am. Iron and Steel Ind., 1915.

и будет выполнено с большой выгодой. Такое сбережение тепла имеет бесспорное практическое, а не только теоретическое значение, так как хотя и возможно описанными выше способами рекуперации и регенерации тепла нагреть теплом уходящего азота весь поступающий в печь новый азот, но для этого ныне существующие нагреватели оказываются слишком громоздкими, дорого стоят и относительно мало эффективны.

7. РАСЧЕТЫ¹

Общие методы теплотехнических расчетов и решений задач, касающихся печей, могут быть показаны на следующих выкладках, относящихся к печи непрерывного действия, работающей на газовом топливе.

Данные наблюдений

Продолжительность наблюдения	12 час.
Загрузка	246 000 кг
Средняя температура загружаемого материала	30° Ц
" разгружаемого материала	1 167° Ц
" удельная теплота загрузки	0,153
Расход газообразного топлива, насыщенного водяным паром при 30° Ц и 750 мм бар. давл.	36 800 м ³
Б. кал. на м ³ газа (считая на сухой газ) при 30° Ц и 750 мм	4 615
Средняя температура газообразного топлива (относит. влажность 100%)	30° Ц
" воздуха	30° Ц
" относительная влажность воздуха	53%
Средняя температура газа, поступающего в трубу	450° Ц

Средний анализ газов:

	При выходе из печи	При входе в трубу	Газообразное топливо (считая на сухой газ)	
				в %
CO ₂	8,24	4,51	CO ₂	2,3
O ₂	1,15	12,05	Тяжелые углеводороды (свещающиеся)	3,3
CO	5,34	0,12	O ₂	0,4
N ₂	85,27	83,32	CO	7,0
			H ₂	53,0
			CH ₄	29,0
			N ₂	5,0
Всего (считая на сухой газ)	100,00	100,00		

Предварительные вычисления

1) Основание: 100 молей сухого топочного газа

Г а з	Моли	Атомы С	Моли Н ₂	Моли О ₂
CO ₂	2,3	2,3	. . .	2,3
Тяж. углеводороды ²	3,3	9,9	9,9	. . .
O ₂	0,4	. . .	. . .	0,4
CO	7,0	7,0	. . .	3,5
H ₂	53,0	. . .	53,0	. . .
CH ₄	29,0	29,0	58,0	. . .
N ₂	5,0	. . .	. . .	. . .
Всего	100,0	48,2	120,9	6,2

¹ См. также газогенераторы, стр. 169—187.

² Взято как эквивалент C₃H₆.

2) Основание: 100 молей сухого отходящего газа в печи

Г а з	Моли	Атомы С	Моли Н ₂	Моли О ₂
CO ₂	8,24	8,24	....	8,24
O ₂	1,15	....	....	1,15
CO	5,34	5,34	....	2,67
N ₂	85,27	....	....	....
Всего	100,0	13,58	....	12,06

3) Основание: 100 молей сухого отходящего газа в трубе

Г а з	Моли.	Атомы С	Моли Н ₂	Моли О ₂
CO ₂	4,51	4,51	....	4,51
O ₂	12,05	....	....	12,05
CO	0,12	0,12	....	0,06
N ₂	83,32	....	....	....
Всего	100,00	4,63	....	16,62

Отношение воздуха к отходящим газам; основание: 100 молей сухого хопочного газа.

1) В печи

По балансу углерода

$48,2 = 0,1358 y$; откуда $y = 355$ мол. сухого отходящего газа.

По балансу азота

$0,791 x + 5,0 = 0,8527 \cdot 355$; откуда $x = 377$ мол. сухого воздуха.

$\frac{377}{100} = 3,77$ мол. сухого воздуха на моль сухого отходящего газа.

2) В трубе

$48,2 = 0,0463 y$; $y = 1040$ мол. сухого отходящего газа.

$0,791 x + 5,0 = 0,8332 \cdot 1040$; $y = 1088$ мол. сухого воздуха.

$\frac{1088}{100} = 10,88$ мол. сухого воздуха на моль сухого отходящего газа.

3) Засос воздуха в дымоходы. Возрастание количества воздуха на расстоянии от печи до трубы является, очевидно, следствием засоса воздуха в дымоходы. Так как за основание расчета принят дымовой газ, то количества воздуха могут быть найдены непосредственно вычитанием, т. е. засос сухого воздуха будет равняться $10,88 - 3,77 = 7,11 \text{ м}^3/\text{м}^3$ сухого дымового газа.

Количество молей O₂, требуемое по теории для топлива $= 48,2$ (для углерода) $+ \frac{120,9}{2}$ (для H₂) $= 108,65$. Так как топливо содержит 6,2 молей O₂, то разность $- 102,45$ молей O₂ требует $\frac{102,45}{0,209} = 491$ молей сухого воздуха.

Теоретически потребное количество молей сухого воздуха в дымовом газе на моль сухого воздуха:

а) при выходе из печи:

$$\frac{377}{491} = 0,768; \text{излишек воздуха} = -23,2\%$$

б) при входе в трубу:

$$\frac{1088}{491} = 2,22; \text{излишек воздуха} = +122\%$$

Общий тепловой баланс; основание = 12 часов

- 1) $36\,800 \frac{750 - 31,7}{760 - 31,7} = 36\,300 \text{ м}^3$ насыщенного дымового газа при 30°Ц и при давлении одной атмосферы, так как давление водяного пара при $30^\circ \text{Ц} = 31,7 \text{ мм Hg}$.

Затрата тепла (газообразное топливо)

- 2) $36\,300 \cdot 4\,615 = 167,5 \cdot 10^6 \text{ б. кал.}$
 3) $36\,300 \frac{273}{22,4 \cdot 303} = 1\,460 \text{ кг-мол. насыщенного дымового газа.}$
 4) $1\,460 \frac{31,7}{750} = 61,8 \text{ кг-мол. влаги в топливе.}$
 5) $1\,460 - 61,8 \cong 1\,398 \text{ кг-мол. сухого топлива.}$
 6) $\frac{61,8 \cdot 100}{1\,398} = 4,42 \text{ молекулы влаги на 100 мол. сухого топлива.}$

Число молекул воды, получаемой при сгорании 100 мол. сухого топлива, равняется = 120,9.

Всего от 100 мол. сухого топлива = $120,9 + 4,42 = 125,3$.

Парциальное давление воды в воздухе = $0,53 \cdot 31,7 = 16,8 \text{ мм ртутн.}$

Парциальное давление воздуха = $750 - 16,8 = 733,2 \text{ мм.}$

Влаги в воздухе = $\frac{1088 \cdot 16,8}{733,2} = 24,9 \text{ молекулы.}$

Молекулы влаги в газах в трубе

В топливе = 125,3

В воздухе = 24,9

Всего . . 150,2

Скрытая теплота в верхней части трубы при основании расчета—12 часов:

$$\frac{1398}{100} 150,2 \cdot 18 \cdot 580 = 21,9 \cdot 10^6 \text{ кал.}$$

Потенциальная теплота в верхней части трубы при том же основании

$$\frac{1398}{100} \cdot 1\,040 \cdot 68\,000 \cdot 1,00012 = 1,19 \cdot 10^6 \text{ кал.}$$

Количество теплоты, уносимое в верхнюю часть трубы 100 мол. сухого дымового газа, имеющего температуру выше 30°Ц

Теплота выражена в б. кал. на молекулу

Газ	кг-молек.	При 450°Ц	При 30°Ц	Разность	Потери б. кал.
CO_2	4,51	4 550	297	4 253	19 150
$\text{CO}, \text{O}_2, \text{N}_2$	95,49	3 150	213	2 937	281 000
H_2O пар	14,44 ²	3 780	273	3 507	50 500

Всего 350 650

Общее количество теплоты, уносимое в верхнюю часть трубы дымовыми газами, выделяющимися за 12 часов

$$\frac{1\,398 \cdot 350\,650 \cdot 10,4}{100} = 51 \cdot 10^6 \text{ б. кал.}$$

Теплота, идущая на нагрев материалов при основании расчета—12 часов.

$$246000 \cdot 0,153 (1\,167 - 30) = 43 \cdot 10^6 \text{ б. кал.}$$

¹ 68,000 кг-калорий, выделяемых при сгорании 1 кг = мол. CO в CO_2 .

² $150,2/10,4 = 14,44$ молекулы всего пара H_2O на 100 молекул дымового газа.

Распределение тепла

	Б. кал./12 часов	В % затраты
Приход тепла с топливом	167 500 000	100,0
Расход тепла на нагрев загрузки	43 000 000	25,6
" " потери в трубе:		
а) потенциальной теплоты	1 190 000	0,7
б) скрытой	2 190 000	13,1
с) физической	51 000 000	30,5
Потери, не поддающиеся точному учету (излучение, охлаждение водой)	50 000 000	30,1
Всего	167 500 000	100,0

ГЛАВА VIII
ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ

Сущность генераторного процесса (стр. 140) заключается в превращении твердого топлива в газообразное. Генераторный газ — продукт основного горения толстого слоя угля, через который пропускается пар, смешанный с воздухом. Это горючее играет все более и более видную роль в практике промышленных печных установок. Генераторный газ является логическим развитием идеи горения топлива „длинным пламенем“, при одновременном сокращении первичного горения и усилении вторичного. Как и в отопляемых углем печах, паром пользуются для получения возможности использовать не только летучее горючее, но и мало летучее топливо, а также для газификации всего горючего вещества в топливе. Газогенератор представляет аппарат для первичного горения, которое проводится при точно регулируемых условиях, так что здесь нет затруднений, связанных с согласованием требований к конструкции и режиму печи — с одной стороны, и с требованиями к конструкции и режиму генератора — с другой. Каждую из этих установок можно конструировать и эксплуатировать так, как это лучше всего отвечает особенностям идущего в ней процесса, без какого бы то ни было учета особенностей и целей другой установки. Поэтому современное проектирование стремится к полному прекращению непосредственного сжигания угля в печах. Так, например, уже существуют нагреваемые генераторным газом печи для обжига глины; работа их оказывается вполне успешной.

Из рассуждений, приведенных на стр. 140, с полной ясностью вытекает, что газогенератор должен работать с толстым слоем горючего. Кислород воздуха сжигается в CO_2 чрезвычайно быстро, нагревая основание горючего слоя до очень высокой температуры. Температура понижается благодаря присутствию пара с его „разбавляющим“ температурным действием, но надо иметь в виду, что скорость взаимодействия пара и углерода низка по сравнению со скоростью взаимодействия кислорода и углерода, а также и то, что образующийся водород, поскольку хватает имеющегося кислорода, почти целиком вновь окисляется, вследствие быстроты этой реакции. Но как только кислород пропадает, углерод начинает восстанавливать как пар, так и CO_2 , как указано на стр. 135. А вследствие того, что все эти восстановительные реакции поглощают тепло, горючий слой охлаждается. Поэтому горючий слой обнаруживает резкое изменение температуры, при чем тепло быстро переходит как благодаря излучению, так и теплопроводности, от более низких пластов слоя (пласт окисления или образования CO_2) к верхней восстановительной зоне. Это способствует

понижению температуры пласта окисления, но она быстро повышается с увеличением скорости горения, так как тепло, выделяемое увеличенным образованием CO_2 , значительно больше того, которое может перейти в восстановительный пласт. Поэтому, как это видно будет из дальнейшего, самые серьезные затруднения у газогенераторов получаются из-за плавления золы, в виду чего необходимо иметь пар в больших количествах и держать скорость горения низкой, в целях снижения температуры в пласте окисления, так как именно в этом месте находится преимущественно зола. Из-за этого в общем газогенераторы не выдерживают напряженности горения выше 100 кг угля на м^2 поперечного сечения горючего слоя в час, а со многими углями, дающими золу более легкоплавкую, даже интенсивность горения в 50 и 75 кг не может поддерживаться без опасений.

Там, где горячий газ проходит через холодное топливо, последнее коксуется при полном отсутствии воздуха. В случае если температура перегонки низка, как это обычно и бывает, образуется большое количество смолы, удаление которой является одной из серьезных проблем управления газогенератором. Если же температура перегонки выше, то эти углеводороды, подвергаясь крекингу, образуют сажу, почти столь же вредную. Там, где горячий газ может быть проведен прямо из генератора в печь (сырой генераторный газ), эти загрязнения не представляют серьезных затруднений. Образование смолы и сажи может быть избегнуто продуванием воздуха сверху сквозь горючий слой, но механические затруднения, встречающиеся при этом, оказались на практике настолько серьезными, что генераторы подобного типа не получили широкого распространения.

Метан и следы тяжелых углеводородов в генераторном газе получаются главным образом от перегонки топлива, и потому их бывает особенно много при углях с обильными богатыми летучими высококалорийными углей.

Из рассуждений на стр. 135 с ясностью вытекает, что генератор, работающий при низкой температуре, дает сравнительно большие количества CO_2 и меньшие CO и водорода, другими словами — малотеплотворный газ. Чем выше температура генератора, тем выше мощность генератора и тепловой эффект получаемого газа. Так как температура газогенератора имеет своим пределом температуру плавления золы, то, следовательно, ценность угля для производства генераторного газа в значительной степени зависит от свойств золы.

В тех случаях, когда газ очищают или по трубам отводят на большие расстояния, он охлаждается, и его физическая теплота теряется, в то время как сырой, неочищенный газ, употребляемый на месте, сохраняет это тепло. Эффективность перевода энергии, заключающейся в угле, в тепловую энергию газа определяют, принимая за основание расчета иногда „холодный“, а иногда „горячий“ газ. В целях сравнения удобнее придерживаться „холодного“ основания расчета даже тогда, когда условия обеспечивают использование дополнительно физической теплоты горячих газов.

В случае, если в газогенераторе на угольном топливе не пользуются паром и CO_2 полностью восстанавливается в CO , эффективность (на холодном основании) генератора, очевидно, равняется $\frac{136}{2,97}$ или 70% (см. стр. 134). Если исключить излучение, нехватящие 30% и будут составлять физическую теплоту газа. Пар уменьшает эту потерю, так как поглощаемая при его разложении теплота отнимается от газа, чем увеличивается общая эффективность. Эта реакция сама по себе не может охладить газ ниже температуры, при которой она проходит с некоторой обычной скоростью, но, применяя принцип встречных потоков газа и топлива, мы получаем газ, охлажденный до этой предельной температуры, который далее можем использовать для подогрева топлива, так что в этом случае газ будет выходить из генератора при температурах значительно ниже

температуры реакции. Неполное восстановление CO_2 и пара, особенно последнее, уменьшает эффективность, так как на парообразование расходуется много тепла, которое на практике обратно не получается. Наличие летучих горючих веществ в угле значительно увеличивает эффективность, так как перегонка их может быть произведена за счет тепла отработанных газов, но за то увеличиваются затруднения со смолой. В результате всех этих факторов, эффективность промышленного газогенератора в расчете на холодный газ составляет от 65 до 85%; практически в среднем эффективность равна 70%.

Так как пар, поглощая часть тепла, получаемого от первичного горения, превращает его в химическую энергию в результате образования водорода и окиси углерода, то благодаря неполному разложению пара и тому, что теплосодержание пара весьма велико из-за высокой теплоты парообразования, все же тепловые выгоды установки не превышают потери.

Вследствие этого холодная эффективность газогенератора уменьшается соответственно увеличению потребления пара. Поэтому желательно потребление пара держать на возможно низком уровне, поскольку это совместимо с необходимостью избегать плавления золы и поддерживать подходящую скорость горения в генераторе.

Необходимо помнить, что слой топлива в генераторе состоит из четырех зон: нижней зоны (слой золы), являющейся тепловой изоляцией раскаленного топлива и механической его поддержкой, зоны окисления, где температура чрезвычайно высока из-за образования CO_2 , зоны восстановления с низкой температурой, благодаря поглощению тепла реакцией разложения воды и CO_2 и, наконец, зоны подогрева и перегонки, где холодное топливо коксуется за счет тепла газов зоны восстановления. Ясно, что для получения возможно большего процента превращения топлива в генераторный газ желательно добиться наибольшей продолжительности взаимодействия CO_2 и пара с раскаленным коксом и наивысшей температуры в зоне восстановления.

Зона восстановления получает свое тепло исключительно от зоны окисления, и, следовательно, верхняя часть зоны восстановления имеет столь низкую температуру, что скорости восстановительных реакций здесь весьма медленны. Поэтому незачем пытаться обеспечить продолжительность взаимодействия CO_2 и пара с коксом, увеличивая глубину горючего слоя. Интенсивность взаимодействия должна быть достигнута увеличением поперечного сечения генератора, т. е. уменьшением скорости прохождения газов через горючий слой и снижением скорости горения. Этим уменьшается расстояние между зоной окисления, где образуется тепло, и зоной восстановления, где оно потребляется, чем облегчается поток тепла от первой ко второй. Вместе с тем усиливается восстановление CO_2 и пара, так как одновременно растут и продолжительность контакта, и температура зоны восстановления. Этим путем возможно поднять теплотворную способность генераторного газа на 20% и увеличить эффективность установки на соответствующую, хотя и несколько меньшую, величину.

Однако из предыдущих рассуждений не следует делать вывода, что работать газогенератор должен на тонком горючем слое. Чем толще этот слой, тем, при всех прочих одинаковых условиях, результаты будут благоприятнее, так как тем сильнее будут реакции в зоне восстановления и тем полнее будет происходить в зоне перегонки регенерация отработанного тепла. Дело все в том, что удлинение времени контакта из-за увеличения поперечного сечения горючего слоя гораздо более действительно для повышения эффективности зоны восстановления, чем соответствующее увеличение глубины горючего слоя.

Наивысшая температура, допустимая в зоне окисления генератора, от 10 до 100° Ц ниже температуры плавления золы. Скорость горения в генераторе должна быть достаточно низкой, и отношение пара к воз-

духу достаточно высоким для того, чтобы температура не доходила до этого предела. Если принять температуру плавления золы в 1100°C ; то скорость горения не должна превышать 25 кг угля в час на м^2 поперечного сечения горючего слоя, не прибегая к чрезмерному потреблению пара, вследствие чего получилась бы низкая эффективность установки и малотеплотворный, но богатый CO_2 газ. Точка плавления в 1650° дает возможность более чем удвоить эту скорость горения, снизить отношение пара к воздуху и усилить восстановительные реакции и тем поднять эффективность. Поэтому, хотя и возможно построить газогенератор, работающий на топливе с низкой температурой плавления золы, стоимость такого производства газа будет почти вдвое дороже, а качество получаемого газа ниже по сравнению с полученным из угля с тугоплавкой золой. С другой стороны, против топлива с тугоплавкой золой говорит быстрый износ футеровки и пода, тем не менее тугоплавкая зола дает возможность на короткое время чрезвычайно форсировать работу генератора, хотя бы и за счет долговечности футеровки.

Главным недостатком генераторного газа является его низкая тепловая ценность из-за большого содержания азота и неразложившейся двуокиси углерода (CO_2). Газ с теплотворной способностью меньшей $800 \text{ б. кал. на м}^3$ не в состоянии поддерживать собственное горение без предварительного нагрева, а такой газ очень легко получается в генераторе вследствие особых неблагоприятных условий, о которых будет сказано в главе об управлении газогенератором. Антрацит дает газ в $1100 - 1200 \text{ б. кал./м}^3$, а хороший битуминозный уголь легко дает газ в 1500 б. кал./м^3 . Высший сорт битуминозного угля в хорошо спроектированном генераторе, эксплуатируемом с подходящей скоростью горения, в состоянии давать постоянно 1600 б. кал./м^3 , а при особых условиях даже 2400 б. кал./м^3 . Эти блестящие результаты, однако, могут быть достигнуты лишь тогда, когда имеется полное разложение CO_2 и пара, при чем наличие CO_2 в получаемом газе оказывается много ниже 5% .

Одним из главнейших достоинств газогенераторов следует считать возможность пользоваться при их работе, при соответствующем устройстве их и эксплуатации, низкосортным топливом, как-то — многозольным (только не с легкоплавкой золой) или малотеплотворным топливом (бурый уголь, лигнит и пр.). В последнем случае тепловая ценность газа будет ниже. Невыгодным оказывается при этом то, что связанная вода этих низкосортных углей отгоняется в зоне перегонки и не может быть использована как источник для получения пара, необходимого для производства газа в генераторах с обычным дутьем. Тщательно продуманные усовершенствования в конструкции с обратным направлением дутья на много увеличат эффективность разложения такого низкосортного топлива.

Аппарат для производства газа для промышленных целей путем применения разобранных реакций, называемый газогенератором, состоит из следующих частей:

1. Кожух или реакционный сосуд, где происходят реакции.
2. Устройство для подачи топлива.
3. Устройство для подачи воздуха и пара.
4. Устройство для удаления золы.
5. Устройство для отвода получаемых газов.
6. Устройство для удаления пыли, сажи и смолы.

1. Кожух генератора. Кожух генератора представляет из себя цилиндр из стальных листов, выложенный огнеупорным кирпичом. Он неподвижен или вращается вокруг центральной оси, или же состоит из двух частей, из которых одна или обе могут вращаться. Верх генератора и другие важные места его обычно охлаждаются водой. По размеру генераторы колеблются от $1,5 \text{ м}$ в диаметре до 3 и $3,5 \text{ м}$ и перерабатывают от 250 до 1600 кг угля в час. Дно их иногда состоит из колосниковой

решетки (вращающейся), но гораздо чаще горючий слой покоится на слое золы, под которой находится неглубокий резервуар с водой.

Очень серьезное значение имеет тот хорошо известный факт, что пар при высоких температурах чрезвычайно разрушительно действует на огнеупорный кирпич. Равным образом горючий слой в генераторе постоянно опускается вниз, из-за чего изнашивается футеровка. Кроме того зола может расплавлять футеровку даже при температуре ниже ее температуры плавления (точно так же как соль вызывает таяние льда при температуре ниже 0°). Поэтому оказывается, что футеровка генератора находится в очень тяжелых условиях работы, в виду чего необходимо держать температуру зоны окисления более низкой, чтобы износ аппарата не выходил из приемлемых границ. Развитие производства особого огнеупорного материала, способного выдержать отмеченные тяжелые условия, позволит увеличить эффективность и мощность генераторов при условии работы с углем, дающим тугоплавкую золу.

2. Подача топлива. Подача топлива может быть постоянной или периодической; последняя более проста с механической точки зрения, но периодическая подача больших количеств сырого угля дает нерегулярную возгонку газа и смолы. Важно, чтобы верх горючего слоя держался на одном уровне и чтобы масса топлива была распределена равномерно. Большие куски угля стремятся продвинуться к наружному краю завалки, образуя здесь каналы с меньшим сопротивлением, чем в центре, и вызывая неравномерный ход горения. Дутье воздуха и пара, конечно, происходит по пути наименьшего сопротивления, а раз в горючем слое образовался канал или „труба“, — провал этот растет в своих размерах, вследствие сконцентрированного здесь горения. А это нарушает правильную работу генератора; во-первых, освобождающаяся интенсивная теплота расплавляет золу в большое количество шлака, причиняющего новые затруднения; во-вторых, большое количество пара столь быстро проходит сквозь слой топлива, что не успевает войти во взаимодействие с углеродом и, выходя из генератора при высокой температуре, уносит с собой большое количество тепла; наконец, несвязанный воздух, проходя через каналы или пустоты, сгорает поверх горючего слоя, давая высокое содержание CO_2 и низкую калорийность газа. Поэтому принятие мер к поддержанию однообразной плотности горючего слоя, свободного от указанных пустот, является делом большой важности, выполнимым более или менее успешно различными способами, о которых речь будет ниже.

Наиболее желательным по размеру является уголь, разбитый на одинаковые куски от 2 до 5 см и свободный от пыли, хотя обычно употребляют уголь, получаемый непосредственно с рудников, раздробленный и пропущенный через 10 см грохот. Почти всегда невыгодно пользоваться очень рыхлым углем, хотя бы первоначальная стоимость его была весьма низкой. Мощность установки снижается переборами в дутье, в виду чего само дутье приходится вести с несколько большим давлением. При неравномерности дутья в топливном слое легко образуются пустоты (каналы) и газ получается горячий, но малой калорийности. Газогенераторная (всасывающая) установка обычно эксплуатируется на антраците, хотя много стараний затрачено для возможного использования также и рыхлых углей; но высокое содержание золы, серы и условия коксования до сих пор препятствуют их успешному употреблению. Лигниты (западной Америки) в крупных кусках и германские брикеты из бурого угля дают превосходные результаты. Хорошо работают в нагнетательных генераторах также битуминозные угли, так что антрацитом пользуются лишь на сравнительно небольших генераторных установках этого рода.

3. Подача воздуха и водяного пара. Газогенераторы можно разделить на два типа по способу подачи воздуха и пара; в одном типе воздух засасывается при помощи эксгаустера или другого вида всасываю-

щего насоса, в другом — воздух и пар продуваются под давлением особым вентилятором или инжектором. Первый тип употребляется, главным образом, при эксплуатации машин внутреннего сгорания, в которых вакуум-цилиндр соединен непосредственно с генератором. В этих случаях имеется отдельное приспособление для полного насыщения воздуха влагой, в котором температура воды для насыщения может быть изменена по желанию.

В нагнетательных газогенераторах подача пара обычно происходит под большим давлением, и часто паровым дутьем пользуются для инжектирования необходимого объема воздуха в горячий слой. Очень желательно иметь возможность 1) управлять дутьем воздуха и 2) независимо от расхода воздуха видоизменять отношение пара к воздуху, так как от подачи воздуха зависит скорость горения в генераторе, а отношение пара к воздуху должно все время поддерживаться постоянным для данного сорта топлива и меняться лишь с переменной последнего. С пароструйным насосом этого достигнуть нельзя. Отношение пара к воздуху может поддерживаться постоянным или термостатическим регулированием состава смеси путем автоматического управления паровым клапаном или увлажнением воздуха горячей водой при термостатически регулируемой температуре. Паром для непосредственного инжектирования или для нагрева воды может служить отработанный пар паровой воздухоудовки. Конструкция распределительного устройства имеет большое значение, поскольку равномерное распределение воздуха и пара при его подаче влияет на работу генератора. В генераторах, в которых топливо поκειται на слое золы, лежащем в охлаждаемом водою плоском сосуде, распределительный инжектор помещен в середине, как-раз под зоной активного горения. Ясно, что во всасывающих генераторах решетка должна быть запроектирована так, чтобы было обеспечено равномерное распределение подаваемого газа. Образование больших количеств шлака находится в прямой зависимости от равномерного распределения этого дутья. Местное сильное нагревание, вызывающее образование прогаров и каналов, способствует образованию шлака, трудно удаляемого с пласта золы. Если это случается на краю горючего слоя, то шлак может прилипнуть к стенке и способствовать этим образованию топливом „свода“ или „настылей“, в сильной степени нарушая правильную работу генератора.

4. Удаление золы. С решеток, употребляемых во всасывающих и иных генераторах, зола удаляется движением колосников. Для равномерности дутья по всему сечению, чтобы компенсировать более свободный проход газа в пространстве между горючим слоем и футеровкой, в середине слоя следует удалять золу в несколько большей степени, чем по бокам. В различных типах генераторов, работающих под давлением, усовершенствование решетки подвигалось вперед медленно, но постоянно и достигло своего высшего развития в имеющем вовсе решетки днище, в котором зола находится в сосуде с водой, доступном со всех сторон; промежуточными стадиями такого развития конструкции решетки были: обыкновенная стационарная решетка, вращающаяся или каким-либо иным способом движущаяся решетка и решетка, погружаемая в воду. Периодическое удаление золы и шлака по необходимости вносит расстройство в горючий слой и нарушает производство однообразного газа. Поэтому в большинстве современных генераторов или предусмотрено для золы много места, что позволяет удалять золу лишь с большими интервалами, или она удаляется непрерывным движением пода по направлению к наружному краю с периодическим извлечением вытолкнутого количества при помощи сошника.

5. Отвод получаемого газа. Обычно газ отводится через трубу в верхней части генератора в хододильники и скрубберы, по большей части через водяной затвор. Были сделаны попытки отвода газа из

центра генератора несколько ниже самого верхнего пласта горючего слоя, с целью разложения смолы крекингом, но встретившиеся механические затруднения заставили отказаться от этого способа отвода.

6. Удаление пыли, сажи и смолы в дымоходах. Когда газ предназначен для употребления в двигателях внутреннего сгорания, он должен быть охлажден и очищен от зольной пыли, сажи и смолы, постоянно сопровождающих разложение рыхлых углей. До самого послед-

него времени угольная смола всякого рода не имела широкого сбыта, разве только с очень больших установок, вследствие чего логически правильным выходом было бросать эти вещества обратно в генератор для дальнейшего использования, не взирая на тот факт, что для многих отопительных целей этот богатый углеродом материал имеет особую ценность, благодаря даваемому им сильно светящемуся пламени и выделяемой лучистой энергии. Принципы удаления жидких и твердых примесей из газа изложены в главе разложения смесей, и их применение здесь ясно. Распределение холодного чистого газа по большой площади может производиться при низком давлении (от 0,1 до 0,3 атм.) и не приводит к затруднениям в смысле потерь, утечек или в отношении тепловой изоляции. Вследствие неполного удаления смолы из газа при его производстве обычно приходится бороться с ее конденсацией в газовой сети. Поэтому важно предусмотреть для нее надлежащим образом расположенные отводные приспособления.

Применение всех вышеприведенных соображений при проектировании и эксплуатации современных газогенераторов будет показано на примере нескольких агрегатов, вполне себя оправдавших на практике.

Генератор Моргана (Morgan) состоит из стационарной охлаждаемой водою верхней части, снабженной дверцей для автоматического регулярного питания топливом и отводом для газа. Корпус отчасти охлаждается водою и покоится на основании, вместе с которым вращается, а горючий слой поддерживается слоем золы, находящейся в охлаждаемом водою сосуде. Спиралеобразный брус на дне корпуса заставляет золу продвигаться к наружному краю, откуда она непрерывно удаляется сошником. Горючий слой поддерживается сплошным и плоским при помощи тяжелого лежащего на нем прута, который, будучи установлен на требуемой высоте, разравнивает свежее топливо и заполняет прогары. Дутье расположено в зольной коробке и состоит из центральной трубы с раструбом. Рабочая мощность аппарата около 1000 кг угля в час.

Генератор Чапмена (Chapman) состоит из стационарного кожуха, помещенного над сосудом с водою, который служит как водяной затвор

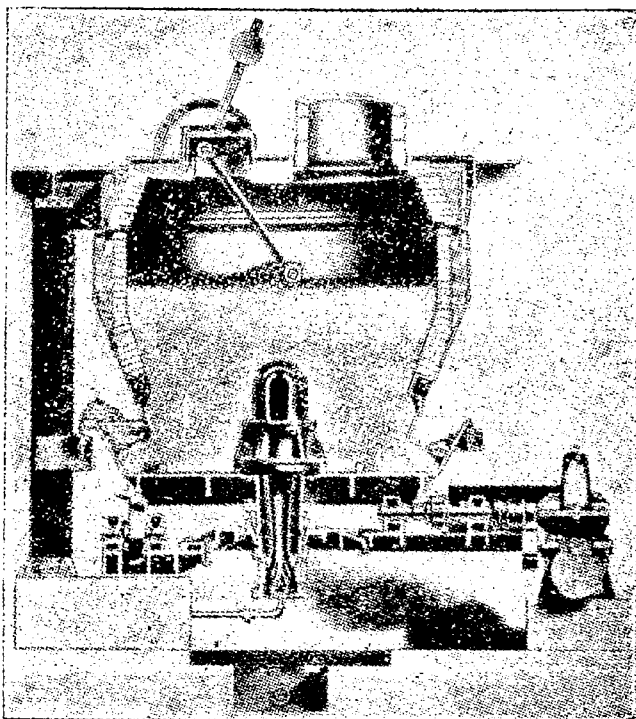


Рис. 64. Генератор Моргана.

и имеет такую форму, что зола может быть без затруднения извлечена из него скребком. Он непрерывно питается топливом при помощи вращающихся звездчатых барабанов, снабженных храповым механизмом. Охлаждаемые водою гребки поддерживают ровный уровень горячего слоя и заполняют в нем прогары, так что последние, в отличие от генератора Моргана, уничтожаются скорее боковым давлением, чем вдавливанием в слой свежего угля.

Генератор Смита (Smith) состоит из ряда бок-о-бок находящихся прямоугольных отделений, каждое из которых имеет свою топочную решетку и подачу воздуха. Решетка имеет уклон назад на 35° и механическую подачу угля через переднюю стенку, при чем для всех отделений образуется один общий горячий слой. Воздух, насыщенный при определенной температуре водяным паром, прогоняется сквозь слой всасывающим насосом, а газ выходит наружу через центральную отводную трубу и охлаждается и очищается перед дальнейшим распределением.

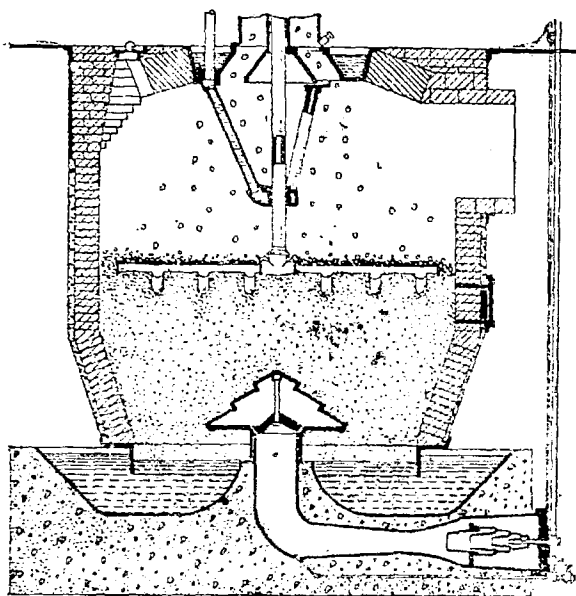


Рис. 65. Газогенератор Чапмена.

Генератор Хьюга (Hughes) состоит из вращающегося, выложенного огнеупорным кирпичом кожуха, с неподвижной, охлаждаемой водою верхней частью, имеющей топочные дверцы и выход для газа, и из вращающегося вместе с кожухом чана для золы. Слой топлива поддерживается ровным, а масса, в которой происходят реакции, освобождается от прогаров (каналов) при помощи специального охлаждаемого водою вибрирующего рычага, который, будучи приделан к стационарной верхней части генератора, доходит до раскаленного слоя. Этот рычаг качается вперед и назад, а так как корпус вращается, то он, описывая дугу, проводит как бы ряд эллиптических дорожек между центром слоя и стенками на расстоянии нескольких см от футеровки. Дутье проведено в середине генератора через колоколообразный распылитель. Мощность около 1000 кг угля в час.

Генератор Монда (Mond) употребляет очень большое количество пара и работает при низких температурах. Газ его поэтому мало теплоносен и с высоким содержанием CO_2 . В нем достигнуто то преимущество, что избегнуто разложение аммиака, образуемого возгонкой угля. Ценность этого уловленного аммиака очень значительно снижает себестоимость газа. Вероятно будущее принесет нам существенные усовершенствования в этом направлении.

Расчет газогенераторного процесса. Точно так же, как и в печных установках, работа газогенератора может быть очень легко рассчитана на основании анализа газа. Производство полного испытания генератора требует много времени, при чем оборудование его обыкновенно таково, что бывает трудно, а иногда и невозможно, получить все необходимые данные. Поэтому весьма важно, что один анализ газа может дать нам требуемые сведения.

Часто бывает затруднительно измерить количества получаемого газа, так как они бывают очень велики, а газометры достаточной мощности не

всегда доступны, а еще чаще потому, что скорость образования газа подвержена колебаниям в широких пределах.

Легко составить баланс углерода в установке по известному количеству затраченного топлива, а также по содержанию углерода в топливе, которое можно легко определить, анализом. Углеродный баланс покажет выход газа, если принять во внимание поправки на образование смолы и сажи и на некоторое количество несгоревшего топлива в золе. Последнюю поправку можно получить из анализа золы, но точные данные по смоле и саже трудно получить при непродолжительном опыте. Если пользоваться одним и тем же топливом в течение продолжительного времени при более или менее постоянных условиях эксплуатации генератора, данные об образовании смолы и сажи могут быть получены из заводских отчетов; количество смолы и сажи удобно выражать в процентах от топлива или еще лучше в процентах от собственно горючего. Для угля определенного месторождения эти данные будут постоянны; для данного угля они не будут сильно изменяться даже при больших изменениях в условиях работы генератора.

Вычисление выхода газа. Нижеследующий пример покажет нам общий метод вычисления данных по газогенераторам. В избранном примере выход газа был измерен непосредственно, а потому можно сравнить с ним результат, полученный вычислением. В большинстве промышленных установок нельзя в точности измерить получающиеся количества газа без нежелательных перебоев в эксплуатации и без расходов, но другие данные, которыми пользуемся ниже, могут быть получены без всяких затруднений. Так как нельзя было получить полного элементарного анализа угля (как это обыкновенно бывает), то пришлось содержание в нем углерода определить по его теплотворной способности (см. стр. 132).

Испытание 105 (U. S. Bureau of Mines, Bull. 13)

Топливо:	Данные
Зола	11,41%
Теплота сгорания	2660 кал.
Сера	1,33%
Топливо (израсходовано в кг за час)	168,0
Смола (в кг на тонну топлива)	65,2

Анализ газа	
CO ₂	9,2%
C ₂ H ₄	0,4%
CO	20,9%
H ₂	15,6%
CH ₄	1,9%

Расчеты

	C	H ₂	O ₂
CO ₂ 9,2	9,2	—	9,2
C ₂ H ₄ 0,4	0,8	0,8	—
CO 20,9	20,9	—	10,45
H ₂ 15,6	—	15,6	—
CH ₄ 1,9	1,9	3,8	—
N ₂ 52,0	—	—	—
	32,8	20,2	19,65
O ₂ из воздуха			13,73
O ₂ , пара			5,92
H ₂ , пара		11,84	
H ₂ , чистого водорода в угле		8,36	

Обозначим весовой процент углерода в угле, переходящего в газ, через x , весовой процент кислорода в угле (общий, за исключением O₂ золы) — через y и весовой процент чистого водорода — через z .

Примем состав смолы $(\text{CH}_2)_n$ или 9,17 кг Н и 55,8 кг С на тонну угля, или 1,035% Н 6,165% С сожженного топлива.

Исходим из того, что $\frac{\text{С}}{\text{О} + \text{зола}} = \frac{4350}{4225 - 2660} = 0,98$, т. е. $(x + 6,165) : (y + 11,41) = 1,79$.

Отношение углерода к чистому водороду в газе (в молях) может быть приравнено к тому же отношению, исчисленному по углю:

$$\frac{32,8}{8,36} = 3,823 = \frac{x/12}{(z - 1,035)/2,016}$$

Таким образом, приняв содержание азота в угле в 1,2%, имеем

$$x + 6,165 + z + \frac{18,02}{16} y + 1,2 + 1,33 + 11,41 = 100.$$

Из этих трех уравнений $x = 52,5\%$ углерода в угле, переходящего в газ. Отсюда количество газа за час будет:

кг топлива в час	кг С, пере- ходящего в газ за час	молей С, переходящих в газ за час	молей газа за час
168,0	0,525	$\frac{1}{12}$	$\frac{100}{32,8}$
$= 534 \text{ м}^3/\text{час.}$			

Действительный измеренный выход газа 515 м³ в час.

Расчет потребления и разложения пара. Еще важнее, пожалуй, чем знание выхода газа, является определение потребления пара и степени его разложения в генераторе. При нормальных условиях работы установки, непосредственное определение количества затраченного пара так же затруднительно, как и определение полученного газа, т. к. существенное значение имеет отношение пара к газу, а количества их подвержены большим колебаниям. Если завод случайно оборудован так, что пар для данного агрегата подается к нему в виде воды, нетрудно исчислить общее количество этой воды за определенное время. Если же оказывается необходимым прибегать к измерителям скорости, будь то диафрагмы, трубки Вентури или Пито, то их показания, даже если приборы самого совершенного типа, не совсем надежны из-за резких колебаний в условиях эксплуатации. Можно прибегнуть к охлаждению газа ниже его точки росы в приборе, что дает возможность измерить сконденсированную воду, хотя конденсирующаяся одновременно смола делает это затруднительным. Отсюда, сделав поправку на остаточный пар в насыщенном газе, получаем водяной пар в газе, выходящем из генератора. Этот результат, однако, включает в себе всю воду как свободную, так и связанную, находившуюся в употребленном топливе, при чем очень незначительная часть ее разложилась в генераторе.

Для определения потребления пара и процента его разложения, можно воспользоваться выведенными на стр. 142 уравнениями скоростей реакции. Следует вспомнить, что в зоне окисления генератора кислород почти количественно переходит в CO_2 , в то время как водяной пар восстанавливается в незначительной степени, так как весь образующийся водород немедленно вновь окисляется. В восстановительной зоне CO_2 и водяной пар вступают во взаимодействие с углеродом, как описано на стр. 169, при чем единственным различием будет присутствие разбавляющего азота, а так же и то, что первоначальное количество CO_2 велико, в то время как при образовании водяного газа оно равно нулю.

Следует хорошо запомнить, что эти уравнения имеют один определенный смысл, а именно: если пар восстанавливается углеродом, то и все количество CO_2 , смешанной с паром, также будет восстановлено, и поэтому

количественное отношение этих двух восстановленных реагентов зависит только от их относительных концентраций, а не от продолжительности взаимодействия и температуры (каковые имеют второстепенное значение), так как всякое изменение последних двух переменных будет иметь одинаковое влияние на восстановление каждого из них.

Для расчетов лучше всего принять 100 частей азота за основание, так как это дает нам неизменяющийся стандарт. Обозначим долю CO_2 через v , а долю водяного пара, как раньше, через x , но будем помнить, что основание у нас иное. Легко показать, что дифференциальные уравнения будут совершенно идентичны с таковыми для водяного газа, т. е.:

$$dv/d\Theta = K_7x - K_2v \text{ и } dx/d\Theta = -(K_6 - 2K_7)x,$$

откуда

$$dv/dx = \frac{\beta v - x}{\alpha x},$$

где

$$\beta = K_2/K_7 \text{ и } \alpha = 2 + (K_6/K_7),$$

а после интегрирования:

$$(\beta - \alpha)v = x + [(\beta - \alpha)v_0 - x_0] \left(\frac{x}{x_0} \right)^{\beta/\alpha}.$$

Для упрощения принимаем, что весь кислород перешел в CO_2 в верхней части зоны окисления. Так как воздух состоит из 20,9% кислорода и 79,1% азота, то это означает, что количество CO_2 в начале восстановительной зоны равно 26,4% при основании расчета 100 N_2 . Пусть x_0 — количество введенного пара на 100 частей азота. Вводя эти величины и принимая, что значения для β и α те же, что и раньше, мы получим уравнение, выражающее соотношение между содержанием в генераторном газе CO_2 , вошедшим в реакцию, и оставшимся неразложенным паром:

$$(1,01)v = x + (26,4 - x_0) (x/x_0)^{1,319}.$$

Если этим уравнением пользоваться для вычисления содержания CO_2 в газе, подставляя в него полученные опытным путем из испытаний газогенератора значения для потребления и разложения пара, то обыкновенно оказывается, что вычисленная величина для CO_2 ниже наблюдаемой. В этих случаях полагают, что реакция



при температурах, преимущественно наблюдаемых наверху горючего слоя в газогенераторе, и в частности вследствие каталитического действия горячих частиц угля протекает чрезвычайно быстро по сравнению с восстановительными реакциями, рассмотренными на стр. 139—142. Кроме того при этих температурах равновесие реакций значительно сдвигается в сторону CO_2 . Другими словами, эта реакция превращает CO в CO_2 , не меняя, однако, общего количества газа-восстановителя в смеси. Это увеличение CO_2 за счет CO не только в верхних слоях горючего слоя, но и в газовом пространстве над ним, было замечено уже давно. То взаимодействие, которое имеет место в газовом пространстве над горючим слоем, называется обращением Неймана. Дифференциальное уравнение, приведенное выше, не учитывает этой реакции, а потому дает для количества CO_2 в газе слишком низкие значения. Изучение результатов целого ряда испытаний газогенераторов показывает, что действительное процентное содер-

жение CO_2 в газе в среднем на 3,6 выше получаемого из уравнений. Следовательно, уравнение даст нам отношение между разложением пара и анализом газа, если написать его в следующем видоизмененном виде:

$$\frac{101(\text{процент } \text{CO}_2 \text{ в газе} - 3,6)}{(\text{процент } \text{N}_2 \text{ в газе})} = x + (26,7 - x_0) \left(\frac{x}{x_0} \right)^{1,319}.$$

Это уравнение дает нам решение важной задачи определения потребного для газогенератора количества пара по данным анализа газообразных продуктов, без необходимости иметь какие-либо дополнительные данные. Техника пользования этим уравнением уяснится после изучения ниже-следующей таблицы:

№ испытания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Состав сухого газа в %						% разложенного пара по отчетам	Атомы О в газе	Атомы О в воздухе	Молекулы H_2 из пара	$x_0 - x = \text{H}_2$ из пара (по отношению к N_2)	x_0 вычисленное	% пара разлож. $\frac{x_0 - x}{x_0} \cdot 100$
	CO_2	CO	H_2	CH_4	N_2	O_2	—	—	—	—	—	—	—
1	5,25	27,3	16,60	3,25	47,50	....	87,4	37,80	25,25	12,55	26,4	30,1	87,7
5	13,25	16,05	22,65	3,50	44,55	....	42,0	42,55	23,7	18,85	42,3	98,0	43,2
103	11,03	20,35	15,63	0,11	52,13	0,75	59,1	43,92	27,7	16,22	31,1	55,0	56,6

В первых семи графах помещены опытные данные, полученные при испытании газогенераторов; из них шесть граф содержат данные газового анализа, а седьмая — процентное содержание разложенного пара по данным исследователя. Остальные графы таблицы содержат отдельные стадии вычислений, необходимые для пользования вышеприведенным уравнением. Из трех опытов два принадлежат Бону и Уилеру (Bone и Wheeler),¹ а третий Хасламу, Макки и Риду (Haslam, Mackie и Reed).² Первые употребляли сильно летучие угли, а последние антрацит.

Графа 8-я содержит полное количество атомов кислорода, приводимое в анализах газа, т. е. два атома в CO_2 + один в CO + два в O_2 (если таковой имеется). Графа 9-я содержит количество атомов кислорода в воздухе, получаемое от умножения количества азота на отношение $2 \times 21/79$. Разность между данными этих двух граф дает нам количество кислорода, получаемого от разложения пара, а потому равняется численно количеству молекул водорода из того же источника, а также и количеству молекул пара, разложенного химически. Следующая графа получается от деления последней величины на часть азота в газе. Она, следовательно, дает отношение разложенного пара к азоту, или, по вышеприведенным обозначениям, $x_0 - x$, где x_0 обозначает количество молей пара на 100 молей азота в поступающей смеси пар-воздух, а x — ту часть пара, которая выходит из генератора неразложенной. Обозначая значения графы 11 через a , мы можем переписать уравнение так:

$$\frac{101(\text{процент } \text{CO}_2 \text{ в газе} - 3,6)}{(\text{процент } \text{N}_2 \text{ в газе})} = x_0 - a + (26,7 - x_0) \left(\frac{x_0 - a}{x_0} \right)^{1,319}.$$

¹ Journ. Iron Steel Inst. 73 (1907), 126.

² Ind. Eng. Chem. 19 (1927), 119.

В этом уравнении единственным неизвестным является x_0 ; процент CO_2 находится из графы 1, процент азота — из графы 5, и а — из 11-й. Оно поэтому может быть решено для x_0 методом последовательных приближений. Результаты — в графе 12. Отсюда процент разложения пара вычисляется путем деления 11-й графы на 12-ю, давая значения, приведенные в графе 13-й. Припомним, что эти значения вычислены на основании одних данных анализа и могут быть сравнены с результатами, непосредственно полученными исследователями и приведенными в графе 7-й. Следует отметить, что совпадение получается полное.

Это уравнение показывает, что если увеличить подачу пара в генератор, процент разложенного пара по необходимости падает, а количество двуокиси углерода увеличивается, и отношение CO к H_2 уменьшается; изменения в этих величинах дают возможность вычислить те перемены в инъекции пара, которыми они вызваны. Далее, если подвергаемый анализу газ так собран, что он может быть принят в качестве среднего образца, то вычисленный таким образом результат дает нам среднее потребление пара, несмотря на колебания в отношении пар-воздух, если только эти колебания не слишком велики. Наконец, уравнение более зависит от изменений в величине x_0 , чем от ошибочного определения содержания CO_2 ; другими словами, ошибка в процентном содержании x_0 , исчисленном этим путем, очевидно, мала. Не требуя довольно сложных операций, необходимых для точно проводимых непосредственно измерений потребления и разложения пара в генераторе, это уравнение дает нам достаточно верный способ для определения этих величин.

Графа 12-я вышеприведенной таблицы дает количество молекул инжеск-тированного пара на каждые 100 молекул азота; так как 26,6 молекул кислорода поступают в генератор вместе с этим азотом, отношение по объему инжеск-тированного пара к воздуху может быть найдено путем деления значений графы 12 на 126,6. Если известно содержание углерода в данном угле и процент газификации этого углерода, то значения графы 12 могут быть легко превращены в кг инжеск-тированного пара, отнесенные к кг сожженного угля, — выражения, более часто встречаемые в практике газогенераторов. Далее, если перемножить молекулярные отношения инжеск-тированного пара к азоту и азота к общему количеству углерода, указанному в анализе газа, то получим отношение количества молекул инжеск-тированного пара к количеству атомов газифицированного углерода. Умножая, наоборот, на отношение молекулярного веса пара к атомному весу углерода, получим отношение пара в кг к кг газифицированного углерода, а умножив на отношение углерода в кг к количеству угля в кг, получим требуемые величины. Последнее испытание, отмеченное в таблице, было произведено с антрацитом, содержавшим 78,84% углерода, и газификация его, благодаря характеру угля, была полная. Поэтому в этом случае выкладки примут вид:

$$\frac{55}{100} \cdot \frac{52,13}{31,49} \cdot \frac{18,02}{12} \cdot 0,7884 = 1,08.$$

Отчет исследователя показал потребление пара в 1,03 на кг угля.

Другой метод решения поставленной задачи был предложен Хасламом,¹ который, исследуя результаты большого числа испытаний газогенераторов, произведенных при весьма разнообразных условиях, нашел, что составные части генераторного газа приходят в состояние кажущегося равновесия:

$$K' = \frac{(\text{CO}_2)(\text{H}_2)}{(\text{CO})(\text{H}_2\text{O})},$$

¹ Journ. Ind. Eng. Chem., 16 (1924), 782.

зависящего только от толщины горючего слоя и независящего от скорости газа (скорость сгорания); от весового отношения пара к углю и от температуры получаемого газа. Это эмпирическое отношение выражается следующим уравнением:

$$K' = \frac{(\text{CO}_2)(\text{H}_2)}{(\text{CO})(\text{H}_2\text{O})} = 0,305 L,$$

где L означает толщину горючего слоя в м. Так как концентрации газов могут быть выражены в любых условных единицах, принято выражать их в объемах на 100 объемных частей сухого генераторного газа.

Это уравнение было выведено на основании данных Клементса (Clements)¹ и Бона и Уилера² в Англии и результатов испытаний, произведенных в Америке Гунтом, Джонсоном и Виллисом (Hunt, Johnson и Willis).³ Насколько эти данные разнятся между собой видно из нижеследующей таблицы:

Наименование данных	Пределы		Отношения крайних пределов
	от	до	
Толщина горючего слоя в м.	1,05	2,1	2
$K' = (\text{CO}_2)(\text{H}_2)/(\text{CO})(\text{H}_2\text{O})$	0,31	0,75	2,42
Температура газа при выходе в °Ц.	1096	1481	1,35
кг угля на м ² площади решетки.	45	145	3,28
Пар, разложенный, в %	40,4	87,4	2,17
кг пара на кг угля	0,28	1,57	5,61
% CO в сухом газе	16,1	27,3	1,70
Неразложившаяся H ₂ O в % на сухой газ	5,6	28,2	5,03
% H ₂ в сухом газе	9,5	22,7	2,39

Для большинства данных отношение крайних пределов колеблется от 2 до 6; что же касается употребленного угля, то для величины K' была найдена зависимость лишь от толщины горючего слоя. Уравнение $K' = 0,305 L$ определяет величину K' с точностью до 10%.

Этот метод требует в дополнение к анализу газа определения влажности и количества связанного кислорода в употребляемом угле, так же как знания действительной толщины горючего слоя. С этими добавочными данными уравнением, очевидно, можно пользоваться для вычисления количества инжектированного пара. Следует обратить внимание на то, что водяной член в уравнении Хаслама не равен x , как это было раньше (x обозначает ту часть протекающего сквозь горючий слой пара, которая в нем не разлагается), в то время как в уравнении Хаслама выражение для пара включает в себя в дополнение к x еще влажность и связанную воду топлива.

Количественное отношение между потреблением пара, скоростью горения и толщиной горючего слоя генератора до сих пор еще не было определено. Из вышеприведенных рассуждений видно, что как повышение скорости горения, так и снижение отношения пара к воздуху повышают температуру в зоне окисления. Знание этого отношения весьма важно, учитывая необходимость держать температуру в генераторе ниже точки плавления золы.

Можно составить тепловой баланс для части генератора, начиная от дна до любого сечения восстановительной зоны. Рассмотрим 100 молекул

¹ J. Iron and Steel Inst. (London), 1923. Engineering, 115, 597 (1923).

² J. Iron and Steel Inst. (London), 76, 126 (1907).

³ 1923 Thesis, Mass. Inst. Tech.

вводимого азота, соответствующих 26,6 молекулам кислорода. В зоне окисления, где этот воздух впервые встречается с горячим коксом, он сгорает в CO_2 . Назовем через t температуру некоторого сечения в восстановительной зоне. Если горючий слой имеет соответствующую толщину, то встречный поток горячих газов, поднимающийся над этим сечением, нагреет спускающийся вниз кокс до температуры t . Часть полученной от горения теплоты расходуется ниже этого сечения для восстановления CO_2 и водяного пара, а остаток ее подымается в верхние части генератора, частью в виде теплоты, уносимой через горючий слой вследствие теплопроводности и радиации в силу градиента температуры, а частью в виде физической теплоты газов. Та часть теплоты, которая протекает сквозь сечение благодаря теплопроводности и радиации, может быть вычислена путем вычитания из всей суммы теплоты, получаемой от горения, происходящего выше температурного уровня t части теплоты, поглощаемой происходящими ниже данного сечения реакциями восстановления, полагая что восстановление протекает при температуре t . Это вполне допустимо, так как, хотя механизм реакций и совершенно различен, общий окончательный результат один и тот же.

Тепло, получаемое от сжигания 26,6 молекул кислорода в CO_2 , равно: $26,6 \cdot 97\,000 = 2\,580\,000$ б. кал. К этому, однако, следует прибавить теплоту, содержащуюся в коксе при температуре t , так как кокс подлежит наблюдению в той части генератора, где уровень температуры равен t . Средняя температура активной части зоны восстановления равняется 925°C , а средняя теплоемкость углерода при этой температуре приблизительно равна 4,7 б. кал./кг-мол. Если принять температуру t_a , при которой реагирующие вещества поступают в генератор, за основание, теплота, внесенная горячим углеродом, потребленным в зоне окисления, выразится как:

$$4,7 \cdot 26,6 (t - t_a) = 125 (t - t_a).$$

Общее количество тепла, получающееся выше температурного уровня t , равно сумме всех предыдущих количеств без тепла продуктов первичного горения при этой температуре t . Здесь имеем 100 молекул азота со средней теплоемкостью (см. стр. 12) около 7,4, что соответствует $740 (t - t_a)$ тепловым единицам и 26,6 молекулам CO_2 с теплоемкостью около 11,5, отвечающей $305 (t - t_a)$ единицам тепла. Имеем также x_0 молекул пара, подаваемого вместе с воздухом; их средняя теплоемкость (см. стр. 12) равна 9, а количество содержащейся в них теплоты равно $x_0 (t - t_a)$. Алгебраическая сумма этих количеств будет

$$2\,580\,000 - (920 + 9 x_0) (t - t_a).$$

Тепло, поглощаемое при восстановлении углеродом, падает частью на реакцию образования CO , а частью на пар. На молекулу восстановленного газа в первой реакции потребляется около 38 000 б. кал. при температуре зоны восстановления (несколько меньше, чем при комнатной температуре), а во второй — около 30 000 б. кал. Относительное восстановление этих двух реагентов, конечно, меняется для каждого отдельного случая, но если принять среднюю теплоту восстановления равной 34 000 б. кал., то можно без серьезной ошибки говорить о полном восстановлении этих двух связанных друг с другом газов.¹ Обозначая начальное количество CO_2 + пар через z_0 и количество невосстановленных CO_2 и пара в данном сечении через z , для полного восстановления имеем $z_0 - z$. Кроме того, $z_0 = 26,6 + x_0$. Теплота, затрачиваемая на эти реакции

¹ Это правильно, если количество CO в получающемся газе превосходит количество H_2 , образующегося от разложения пара. Это почти всегда имеет место, за исключением тех случаев, когда употребляются чрезмерные количества пара.

восстановления, следовательно, будет $34\,000 (z_0 - z)$ б. кал. Поэтому, на каждые 100 молекул поступающего в генератор снизу азота, остаточная теплота, протекающая сквозь данное наблюдаемое нами сечение, путем теплопроводности и радиации, будет:

$$[2\,580\,000 - (920 + 9x_0)(t - t_a) - 34\,000(z_0 - z)] \text{ б. кал.}$$

Обозначая через Γ количество азота, протекающее в час через m^2 поперечного сечения генератора, выраженное в сотнях молекул, для количества тепла, текущего благодаря теплопроводности вверх сквозь данное сечение, будем иметь

$$\frac{Q}{A\theta} = \Gamma [2\,580\,000 - (920 + 9x_0)(t - t_a) - 34\,000(z_0 - z)] \text{ б. кал.} \quad (1)$$

Это уравнение отнесено к $1\, m^2$ поперечного сечения генератора и одному часу. Этот поток тепла может быть приравнен термической проводимости горючего слоя применительно к градиенту, т. е.

$$Q/A\theta = a dt/dL \quad (1a)$$

Это допустимо, несмотря на то, что много теплоты уходит излучением, если только коэффициент a эмпирически подобран для данного промежутка температур (см. стр. 118). Кроме того, так как скорость восстановления обоих газов приблизительно одинакова, а скорость реакции возрастает обычно в геометрической прогрессии с возрастанием температуры, то можно для скорости реакции установить выражение:

$$rdz/dL = -kze^{bt} \quad (2)$$

Точное решение этих уравнений, если оно вообще возможно, должно быть очень сложным. Для приближенного решения можно придать t в уравнении (1), в каждом отдельном случае, определенное среднее значение и написать:

$$B = 2\,580\,000 - (920 + 9x_0) \left(\frac{t_0 + t_1}{2} - t_a \right) - 34\,000 z_0 \quad (1b)$$

С этим приближением решение будет следующее:

$$e^{bt_0} - e^{bt_1} = \frac{br^2}{ak} \left[B \ln \frac{z_0}{z_1} + 34\,000(z_0 - z_1) \right] \quad (3)$$

где индекс 0 означает условия на границе между зонами окисления и восстановления, а индекс 1 относится к концу зоны восстановления и началу зоны перегонки.

При нормальных условиях работы генератора с обычной толщиной слоя горючего можно пренебречь вторым членом на левой стороне уравнения (3), так как его величина редко достигает 5% первого члена. Поэтому можно его отбросить и переписать уравнение так:

$$e^{bt_0} = Kr^2 \left[B \ln \frac{z_0}{z_1} + 34\,000(z_0 - z_1) \right] \quad (3a)$$

Постоянная B приближенно равна 0,0128; K лучше всего определить по данным употребляемого угля или в крайнем случае угля близкого типа в отношении коксуетости и зольности.

Качественное толкование этого уравнения весьма поучительно. Левая сторона его быстро растет с температурой, хотя скорость азота дана на правой стороне во второй степени. Поэтому, хотя скорость работы генератора (т. е. его мощность) и увеличивается с температурой, она увеличивается не так быстро, как обычно возрастает скорость реакции для данной температуры зоны окисления. Это происходит оттого, что средняя температура зоны восстановления значительно ниже температуры зоны окисления

и растет медленнее, чем последняя. Кроме того, для определенного возрастания температуры, т. е. для определенного возрастания левой стороны нашего уравнения, мы имеем двоякую выгоду, а именно увеличение как производительности, так и количества разложенного пара и CO_2 . В известных пределах можно воспользоваться этой выгодой для любой цели, меняя отношение пара к воздуху. Так как член, выражающий скорость, дан во второй степени, в то время как член разложения дан в первой, то ясно, что увеличение температуры имеет большее влияние на достижение полного разложения, чем увеличение производительности. Практика газогенераторов подтверждает этот вывод.

Полезной работой, происходящей в зоне восстановления газогенератора, является восстановление $z_0 - z_1$ молекул CO_2 и водяного пара в горючий газ. Численное значение этого выражения можно получить из анализа газа, взяв сумму величин из граф 2 и 10 таблицы на стр. 180 и разделив ее на отношение азота ко всему объему газа. При сравнимых условиях работы эта величина удивительно постоянна. При употреблении холодной смеси пара с воздухом она в среднем равняется 30, редко отклоняясь от этого числа более чем на 10%. Это показывает, как и следовало ожидать, что восстановление уменьшается незначительно с увеличением отношения пар-воздух. Подогрев воздуха очень увеличивает значение $z_0 - z_1$. Так, Бон и Уилер, взяв 30 молекул пара на 100 молекул азота с воздухом, нагретым до 250°C , получили значение для $z_0 - z_1$ в 42, в то время как Хаслам при подобных условиях при подогревании одним паром мог добиться всего 31. Его смесь пара с воздухом подавалась в генератор при 80°C . Уравнением (1) можно пользоваться для определения того, какие условия работы благоприятствуют увеличению величины $z_0 - z_1$. Другими словами, обозначив приращение $z_0 - z_1 = \Delta z$, имеем:

$$\Delta z = -\frac{920 + 9x_0}{34000} \Delta(t_1 - t_a) \quad \dots \dots \dots (4)$$

Бон и Уилер употребляли значительно более толстый слой топлива, чем Хаслам, и могли потому охлаждать газ приблизительно на 100°C . Их полный выигрыш в температуре был, следовательно, $250 + 100 - 80 = 270^\circ$. Поэтому, на основании вышеприведенного выражения, Δz должно быть 9,5, т. е. близкое к 11, полученным в действительности. Этим подчеркивается та большая роль, которую играет нагревание смеси пара с воздухом в деле увеличения холодной эффективности генератора.

На основании изучения всех доступных данных оказалось возможным с достаточной точностью выразить достижимое в данном генераторе восстановление через выражение:

$$z_0 - z_1 = 54 - 0,04x_0 - 0,018(t_1 - t_a) \quad \dots \dots \dots (5)$$

Однако при этом нужно помнить, что это выражение предполагает горючий слой равной толщины со специальным приспособлением для поддержания его однообразным. В тех случаях, когда общее восстановление оказывается на много ниже, чем следовало бы ожидать согласно выражению (5), по всей вероятности, мы имеем дело с недостаточным горючим слоем. Пользуясь уравнением (5), следует также помнить, что чем толще бывает слой топлива, тем ниже температура t_1 , хотя при толщине слоя, не выходящей из разумных пределов, изменения температуры t_1 не велики. Она редко бывает выше 800 и ниже 600°C .

Все вышеприведенные выражения основаны на определенном количестве воздуха, поступающего в генератор (126,6 молекул, эквивалентных 100 молекулам азота N_2). Причиной выбора такого основания расчета является то, что подача тепла и, следовательно, работа агрегата определяются скоростью горения, а последняя в свою очередь опреде-

ляется подачей воздуха. Скорость горения не должна быть и не бывает величиной постоянной; необходимо лишь быть уверенным, что на решетке всегда находится соответствующее количество топлива, хотя в конце концов это означает, что средняя скорость горения приблизительно пропорциональна средней скорости подачи воздуха.

Интересные данные о температурах топливного слоя сообщены Хасламом и его сотрудниками.¹ Изучение этих данных показывает, что в пределах изменения температуры зоны восстановления величина постоянной В лежит между 0,0126—0,013. Точное измерение температурных условий в топливном слое генератора, однако, очень затруднительно. Если при надлежащем обслуживании генератора температурные условия в каком-либо сечении, взятом близко к вершине слоя топлива, еще более или менее одинаковы, то на дне его, в зоне окисления и в более горячих частях зоны восстановления, этого ни в коем случае не бывает.

В самой зоне окисления и как-раз под ней нельзя избежать местного скопления золы и прогаров в топливе. Поэтому воздух, поступающий через одни части топливного слоя, течет быстро, а через другие гораздо медленнее. Первое эквивалентно малому генератору при главном агрегате, работающем при больших скоростях горения и, следовательно, при значительно более высоких температурах. Вследствие этого там на любом данном уровне более низких частей топливного слоя изменения температуры бывают очень значительны. Таким образом, на определенном уровне, как-раз над зоной окисления, где скорость воздуха незначительна, температура бывает низкой, а в точке, лежащей несколько в стороне от этого места, температура бывает значительно выше. На данном уровне, однако, разница в составе газа будет менее значительной, чем разница в температурах, наблюдающихся в слое. Горячие пустоты — „трубы“ также производят газ, хотя работают со скоростями значительно выше средних. Температура t_0 в уравнении (3) будет обозначать температуру зоны окисления, т. е. максимум температуры в топливном слое. Это крайне важно, так как это определяет предел производительности генератора, доступный без опасения неполадок из-за образования шлака, но при непосредственном измерении этой максимальной температуры следует помнить, что возможно сперва найти ее на одном уровне топливного слоя, а затем на другом.

Употребление уравнения (3) лучше всего может быть показано в применении к некоторым данным Хаслама. Согласно его сообщениям, он произвел опытную газификацию угля, содержащего 78,84% углерода, вводил при этом 0,413 кг пара на кг угля, вел горение со скоростью 42,3 кг угля на м² решетки в час и получил газ, содержащий 7,88% CO₂, 0,10% O₂, 23,4% CO, 8,72% H₂ и 59,9% N₂. При этом опыте наивысшая определенная им температура топливного слоя была 1038° Ц. Подведенная смесь пар-воздух имела, как можно предположить, температуру 38° Ц, а поверх горячего слоя температура была 648° Ц. Полагая В = 0,007, найдем значение К для этого угля.

Нижеследующая таблица понятна без объяснений

		С	О
CO ₂	7,88	7,88	7,88
O ₂	0,10		0,10
CO	23,40	23,40	11,70
H ₂	8,72		
N ₂	59,90		
	100,00	31,28	19,68

$$\text{O}_2 \text{ из воздуха} = 59,9 \frac{21}{79} = 15,93$$

$$\text{O}_2 \text{ из пара, разность} = 3,75; \text{ H}_2 \text{ из пара} = 7,50$$

¹ Haslam, Mackie and Reed, Jour. Ind. Eng. Chem., 19 (1927), 119. Haslam, Ward and Mackie, Jour. Ind. Eng. Chem., 19 (1927), 141.

1 кг пара/1 кг С	Мол. пара/атом. С	
0,413	12	31,28
0,7884	18,02	0,599

$$= 18,24 \text{ мол. пара на } 100 \text{ N}_2 = x_0$$

Атомы С/час./м ³		
42,3 · 0,7884	0,599	$= 0,053 = r = \frac{N_2/\text{час}}{100}$
12	31,28	

$$\text{CO}_2/100 \text{ N}_2 = 7,88 \cdot \frac{100}{59,9} = 13,15$$

$$x_0 - x_1 = 7,50 \cdot \frac{100}{59,9} = 12,52$$

$$\begin{aligned} x_1 \text{ по разности} &= 5,72 \\ z_0 &= 26,6 + 18,24 = 44,84 \\ z_1 &= 13,15 + 5,72 = 18,87 \\ z_0 - z_1 &= 25,97 \end{aligned}$$

$$B = 2\,580\,000 - (920 + 9 \cdot 18,24) \left(\frac{1\,038 + 648}{2} - 38 \right) - 34\,000 \cdot 44,84 = 182 \cdot 692.$$

Подставив полученные значения в уравнение (3а), получим $K = 200$.

Положим, что требуется увеличить скорость горения в этом генераторе, увеличив скорость воздухоудки в 9,7 раз, пользуясь, однако, отношением пар-воздух лишь в 90% прежнего. (Эти значения выбраны потому, что Хаслам действительно оперировал такими скоростями). Какую наивысшую температуру можно ожидать в топливном слое при этих новых и более резких условиях? Величину восстановления $z_0 - z_1$ можно вычислить, пользуясь уравнением (5) на стр. 185. Нижеследующая таблица не требует пояснений:

$$\begin{aligned} r &= 9,7 \cdot 0,053 = 0,515 \\ x_0 &= 0,90 \cdot 18,24 = 16,4 \\ z_0 &= 26,6 + 16,4 = 43,0 \\ z_0 - z_1 &= 54 - 0,04 \cdot 16,4 - 0,018 \cdot (1200 - 100) = 33,7. \end{aligned}$$

$$B = 2\,580\,000 - (920 + 9 \cdot 16,4) \left(\frac{1\,424 + 648}{2} - 38 \right) - 34\,000 \cdot 43 = 52\,536.$$

Член $t_0 = 1424$ в B найден методом подбора корней уравнения. Подставив найденные величины в уравнение (3а), получим $t_0 = 1408^\circ \text{C}$. Хаслам фактически получил температуру в 1424° .

Чтобы сделать более очевидным значение изменения отношения пар-воздух, вычислим максимальную температуру топливного слоя сперва для скорости воздуха в 3,9 раза большей, чем в первом примере, с отношением пар-азот в 0,175, температурой вводимой смеси пар-воздух в $66,5^\circ \text{C}$ и с температурой газов поверх горячего слоя в 790°C и, во-вторых, для тех же условий, кроме количества введенного пара, которое теперь в 2,8 раза больше, и температуры топливного слоя в 705°C . При первых условиях, вычисляя как раньше, $z_0 - z_1 = 29,9$; $z_1 = 14,2$; $B = 200\,000$ (полагая $t_1 = 1260^\circ$), откуда из уравнения (3а) $t_0 = 1255^\circ$. Хаслам нашел при указанных условиях 1314° . Равным образом, полагая количество пара в 2,8 раза больше, $x_0 = 49$, $z_0 = 75,6$, $z_0 - z_1 = 31,3$, $z_1 = 44,3$, $B = 115\,000$ (полагая $t_0 = 1175^\circ$), откуда из уравнения (3) для $t_0 = 1186^\circ$. Фактическая измеренная Хасламом температура была 1200°C .

Следует заметить, что t_0 во всех случаях при исчислении B берется методом последовательных приближений подбором значений. Если в конечном результате не подтвердится взятая для t_0 величина, то придется повторить вычисления. Впрочем, в уравнении для B небольшая ошибка для t_0 не делает большой разницы.

Полученные числа подтверждают тот факт, что температура зоны окисления падает гораздо быстрее с понижением скорости горения, чем с увеличением отношения пар-воздух $= x_0$. Тем не менее количество пара является могущественным средством для повышения мощности агрегата, не вызывая затруднений, связанных со шлакообразованием.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие редактора	3
Предисловие авторов	4
Глава I. Основные законы промышленной стехиометрии	7
„ II. Жидкостные пленки	28
„ III. Движение жидкостей (прикладная гидродинамика).	33
„ IV. Теплопередача	84
„ V. Топливо и энергия	131
„ VI. Горение	134
„ VII. Печи	143
„ VIII. Газогенераторы	169

Типография им. Володарского. Ленинград, Фонтанка, 57.

Редактор: *В. С. Гуляев.*
 Сдано в набор 30/IV—32 г.
 Статформат 72 X 104
 Ленгорлит № 14186

Техн. редактор: *Б. П. Спиро.*
 Подписано к печати 16/IX—33 г.
 11³/₄ л.
 Тираж 5200 экз.

Заказ № 6666