

А. М. ЛЕТВИН

**О С Н О В Ы
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ**



ГОССТАТИЗДАТ

А. М. ЛИТВИН

О С Н О В Ы ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

*Утверждено Управлением кадров Министерства
электростанций СССР в качестве учебного пособия для
подготовки рабочих кадров и средне-технического персонала*

ИЗДАНИЕ ЧЕТВЕРТОЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1949 ЛЕНИНГРАД

Во вступительной части для малоподготовленного учащегося приводятся основные сведения из элементарной математики, физики и химии.

По основам теплоэнергетики дается изложение в приложении к технике газовых законов, законов термодинамики и основных сведений по вопросам теплообмена.

В главах, посвященных прикладной части, приводится описание конструкций, работы основного оборудования и технологического цикла электростанций. Приводятся методы расчета основных ее показателей. Изложение сопровождается решением типовых примеров.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ЧЕТВЕРТОМУ ИЗДАНИЮ

Новое издание книги предназначено служить учебным пособием для подготовки рабочих кадров и среднего технического персонала электростанций (бригадиров, мастеров).

В пособии изложены основные законы получения механической (электрической) энергии, принципы работы основного оборудования электростанций и рассмотрен технологический цикл электрической станции в целом. Таким образом материал книги должен служить как бы введением к тому более узкому специальному курсу, который явится основным в подготовке данного специалиста. Такое введение поможет учащемуся понять роль своего рабочего места в общем цикле электростанции, расширит его кругозор и поможет наметить пути продолжения своего технического образования.

Исходя из поставленной задачи, автор значительно расширил по сравнению с предыдущими изданиями материал книги, касающийся прикладной стороны — дано описание топок, котлов, турбин и основных приборов, применяемых на электростанциях. Как и в предыдущих изданиях, исходя из особой роли теплофикации в энергетике нашей страны, автор старался возможно подробнее развить относящийся к этому вопросу материал.

Настоящая книга может, как полагает автор, быть также пособием по общей теплотехнике и при подготовке механиков для фабрично-заводских предприятий всех отраслей промышленности.

Имея в виду самую разнообразную степень предварительной подготовки учащихся, в книге оставлены первые две главы, в которых изложены элементарные сведения из области математики (правила действия над дробями предполагаются известными), физики и химии.

При переиздании вновь просмотрен весь текст книги и графический материал, устранены замеченные опечатки.

Автор весьма заинтересован в получении отзывов и советов от пользующихся книгой и просит присылать их по адресу: Москва, Шлюзовая набережная, 10, Госэнергоиздат.

Первые три издания этой книги вышли под редакцией проф. Всесоюзного теплотехнического института Я. М. Рубинштейна. Автор пользуется случаем, чтобы выразить редактору свою глубокую благодарность за оказанную ему помощь.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие к четвертому изданию	3
Введение	5

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ИЗМЕРЕНИЕ

1. Техническая система мер	10
2. Давление, работа, мощность	17
3. Некоторые сведения из математики	20
4. Зависимость, таблица, график	30

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ФИЗИКИ И ХИМИИ

5. Строение тел. Три состояния вещества	34
6. Краткие сведения из курса химии. Реакции. Химические формулы. Молекулярный вес	36
7. Основные химические реакции. Горение топлива	39
8. Краткие сведения из курса физики. Законы механики	43
9. Инерция, сила, масса. Законы Ньютона	45
10. Центробежная и центроостремительная силы	48
11. Свойства твердых тел. Напряжения в материалах	49
12. Свойства жидкостей	51
13. Энергия и ее виды. Преобразование энергии. Закон сохранения и превращения энергии	56
14. Тепловая энергия. Температура	58
15. Единицы измерения энергии. Подсчет количества тепла при нагревании и охлаждении. Подсчет количества электрической энергии	64
16. Переход тел из одного состояния в другое	66

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ГАЗЫ И ПАРЫ КАК РАБОЧИЕ ТЕЛА

17. Свойства газообразных тел	69
18. Атмосферное давление	71
19. Измерение давления газа	73
20. Изменения состояния газа	78
21. Процесс изменения состояния газа при постоянном объеме	81

22. Процесс изменения состояния газа при постоянном давлении	84
23. Адиабатический процесс изменения состояния газа	89
24. Изотермический процесс изменения состояния газа	92
25. Газовые смеси	95
26. Водяной пар	99
27. Диаграмма ts для водяного пара	104

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

28. Законы термодинамики	113
29. Цикл Карно	120
30. Циклы двигателей внутреннего сгорания	124
31. Баланс тепла. Мощность двигателя. Расход топлива	130
32. Топливо и его использование	133
33. Топочные устройства	141
34. Паровые котлы	146
35. Паровые двигатели	156
36. Схема паросиловой установки	170
37. Экономические характеристики паросиловой установки. Баланс тепла. Расход пара	175
38. Регенеративный цикл. Вторичный перегрев пара	182
39. Расход топлива	88
40. Теплофикация	191
41. Типовые схемы тепловых электрических станций	195

ГЛАВА ПЯТАЯ

ТЕПЛОБМЕН

42. Теплообменные аппараты	202
43. Способы распространения тепла	206
44. Основные случаи теплообмена	209
45. Теплообмен излучением	214
Приложения	219

ВВЕДЕНИЕ

Нет нужды доказывать, что энергетика — одна из важнейших отраслей народного хозяйства. Вот почему, как только после окончания гражданской войны встал вопрос об организации хозяйственной жизни страны на новых началах, прежде всего было приступлено по инициативе В. И. Ленина к составлению общего плана электрификации страны. Этот план был составлен в 1920 г.; в его составлении принимал участие большой коллектив ученых и инженеров нашей страны. Разработанный план известен под названием плана ГОЭЛРО (Государственная комиссия по электрификации России).

До Октябрьской революции наша энергетика стояла на низком уровне развития. В деревне не только не знали электричества, но часто лучина была единственным способом освещения. По энерговооруженности Россия занимала среди капиталистических стран одно из последних мест: по выработке электроэнергии во всем мире — пятнадцатое, а в Европе — седьмое место.

План ГОЭЛРО наметил пути развития советской энергетики в общем плане развития хозяйства страны. Особо было при этом обращено внимание на развитие тяжелой промышленности — на производство металла и добычу топлива.

План ГОЭЛРО был не только выполнен, но и перевыполнен. Намеченное им строительство в течение 10—15 лет 30 новых районных электростанций на общую мощность в 1 750 000 *квт* было выполнено с превышением в 2,5 раза; в 1913 г. мощность электростанций России составляла всего 1 098 000 *квт*; к концу 1937 г. мощность электростанций была увеличена в восемь раз, а по выработке электроэнергии Советский Союз занял второе место в Европе и третье в мире.

В чем же основные пути развития советской энергетики? По идеям плана ГОЭЛРО советская социалистиче-

ская энергетика должна развиваться по пути построения централизованного хозяйства, базирующегося на районные электрические станции. Эти последние, соединенные между собой линиями передачи высокого напряжения, создают объединения — районные энергетические системы.

До Октябрьской революции была построена одна районная электрическая станция («Электропередача» — близ Москвы). В настоящее же время районные энергетические системы составляют основу энергохозяйства СССР. Последние годы ознаменовались новым крупным успехом в построении централизованного энергетического хозяйства страны: некоторые районные системы географически настолько близко подошли друг к другу, что появилась возможность соединить их между собой. Это является началом построения единой высоковольтной системы Советского Союза, создание которой позволит наиболее целесообразно использовать энергетические ресурсы страны.

В дореволюционной России на электростанциях использовалось, главным образом, дорогое топливо — нефть и лучшие сорта угля, донецкого, а иногда импортного — английского. Между тем, наша страна богата и местными низкосортными топливами — торфом, бурым углем, сланцами. Все развитие советской энергетике при построении крупных электрических станций идет по пути использования этих местных низкосортных топлив. Постройка районных станций в местах добычи топлива освобождает железные дороги от излишних перевозок.

Особо нужно отметить роль теплофикации в развитии советской энергетике. Плановые начала, лежащие в основе нашего хозяйства, создают особо благоприятные условия для централизованной совместной выработки электрической и тепловой энергии, что и составляет сущность проводимой в нашем народном хозяйстве теплофикации.

Годы мирного хозяйственного строительства СССР сменились периодом напряженной борьбы всего советского народа с немецко-фашистскими захватчиками, которые вторглись в пределы нашей родины с целью овладеть ее богатствами и поработить советские народы. Для ведения Отечественной войны понадобилось напряжение всех сил народа, мобилизация всей промышлен-

ности для снабжения фронта вооружением, боеприпасами, снаряжением, продовольствием. В этих условиях роль энергетики, обеспечивающей промышленность движущей силой и теплом, еще более выросла. Задачи энергетики в первые годы войны усложнились также вследствие необходимости переброски промышленности из временно захваченных врагом районов и областей и перебазирования ее в новые районы. По всей стране в невиданных масштабах шло развертывание промышленности и вместе с тем происходила перестройка и развитие энергетики, в первую очередь той ее части, которая добывает энергию путем сжигания топлива, т. е. теплоэнергетики.

Полная и окончательная победа над врагом выдвинула новые грандиозные задачи перед нашей промышленностью. Надо было не только восстановить разрушенные предприятия, но и обеспечить дальнейший расцвет всех отраслей промышленности.

Эти задачи нашли отражение в историческом законе о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг., принятом первой сессией Верховного Совета СССР в 1946 г. Он поставил перед энергетиками Советского Союза следующие почетные задачи:

«Полностью восстановить электростанции в районах, подвергавшихся оккупации, и ввести в действие на всех электростанциях СССР за пятилетие 11,7 млн. киловатт, доведя установленную мощность электростанций до 22,4 млн. киловатт в 1950 году».

«Установить выработку электроэнергии на 1950 год на 70 процентов больше, чем в 1940 году».

«Широко внедрить на электростанциях новейшую энергетическую технику — применение пара высокого давления и высокой температуры, новейших теплофикационных турбин и новейших типов котлов, генераторов и высоковольтной аппаратуры. Широко развернуть работы по автоматизации производственных процессов электростанций...».

Эти задачи успешно выполняются, что видно из письма, направленного 3/ХІІ 1948 г. участниками Совещания работников строительных и монтажных организаций Министерства электростанций СССР Председателю Совета Министров Союза ССР товарищу Сталину И. В.

В этом письме они сообщают:

...«В результате успешного выполнения плана ГОЭЛРО и сталинских пятилеток энергетическое хозяйство нашей страны преодолело прежнюю отсталость и теперь по выработке электроэнергии занимает второе место в мире.

...к декабрю 1948 г. установленная мощность районных электростанций страны на 25%, превышает довоенную, а выработка электроэнергии возросла более, чем на 32%.

К настоящему времени все разрушенные врагом электростанции восстановлены полностью или частично. Среди них крупнейшие электростанции страны—ДнепроГЭС, Сталиногорская, Зуевская, Днепродзержинская, Дубровская, Нижнесвирская, Алексинская и др.

Восстановление и развитие районных электростанций осуществляется на основе внедрения новейшей техники: пара высокого давления, широкой автоматизации процессов и работы сложных энергетических агрегатов, лучшего использования местных топливных и гидроресурсов.

...В осуществление этой великой программы энергетики-строители и монтажники за истекший период послевоенной пятилетки, помимо восстановления разрушенных электростанций, построили и ввели в эксплуатацию новые электростанции: Фархадскую, Храмскую, Сухумскую, Свистухинскую, ДзауджикауГЭС, ряд гидроэлектростанций в Узбекистане и Казахстане, Астраханскую, Сызранскую ГРЭС и др.

Всего за истекший период пятилетки смонтировано и введено на районных электростанциях 78 паровых и 42 гидравлических турбоагрегатов, 122 котла, 3 935 км линий электропередачи высокого напряжения; построено до 550 тыс. м² жилой площади».

Новой энергетике во все возрастающем количестве нужны новые кадры. Молодому рабочему, бригадиру, мастеру, готовящемуся к работе на ответственном посту на электростанции, необходимо наряду с изучением своей узкой специальности осознать роль энергетики в хозяйстве страны, понять принцип действия всех машин и устройство электростанции, усвоить физические основы, на которых они построены, узнать, как производятся простейшие расчеты. Эти вопросы и рассматриваются в настоящей книге.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ИЗМЕРЕНИЕ

1. ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МЕР

Человеку в разнообразных областях своей деятельности и в быту приходится иметь дело с различного рода измерениями. Так, при постройке здания приходится измерять площадь и объем его, а также вес различных строительных материалов. На предприятиях при исчислении стоимости продукции приходится измерять вес израсходованных материалов. На электростанциях при расчете стоимости электрической энергии среди прочего надо измерять вес расходуемого топлива и время, в течение которого оно израсходовано.

В этих примерах вес, площадь, объем, время являются величинами. Кроме названных существует много других величин, о которых будет идти речь

чтобы измерить какую-нибудь величину, надо выбрать единицу измерения. Например, чтобы измерить длину какого-либо предмета, надо выбрать о том, какой отрезок следует считать за единицу измерения длины. Если такая единица не выбрана, то для измерения длины предмета надо раз этот условленный отрезок измерять, измерения, заключается в том, сколько раз этот отрезок будет произведено на предмете. Например, если длина куска материи равна трем единицам, то значит, что измерить такую длину значит сравнить ее с другой величиной, принятой за единицу измерения данной величины.

В прежнее время в каждой стране были свои единицы измерения. Так, в России для измерения длины существовала единица измерения — аршин, для измерения веса — фунт. Однако пользование различными единицами при измерении одних и тех же величин причиняло большие неудобства, так как затрудняло хозяйственные сношения отдельных стран между собой.

В прошлом столетии во Франции была введена так называемая метрическая система мер. Благодаря своим преимуществам она была в дальнейшем принята во всех странах. Только Англия со своими колониями и Соединенные Штаты Америки не ввели пока у себя метрической системы, что и доставляет много помех в хозяйственных и научных сношениях с этими странами.

Рассмотрим некоторые величины и единицы измерения для них.

За единицу измерения длины в метрической системе принят метр. В Париже имеется Международное бюро весов и мер. Там хранится сделанный из платины брусок, длина которого является эталоном метра, иначе говоря, основным образцом метра. По этому образцу сделаны в каждой стране копии — эталоны, по которым изготовляют обычно «метры», т. е. линейки, служащие для измерения длин.

Было бы весьма неудобно пользоваться только одной единицей измерения длины. В этом случае при измерении больших расстояний получались бы очень большие числа. Например, никому не придет в голову измерять расстояние между Москвой и Ленинградом в метрах. Для этого пользуются другой единицей длины — километром, причем

$$1 \text{ километр} = 1\,000 \text{ метрам,}$$

т. е. метр составляет одну тысячную (0,001) километра.

С другой стороны, было бы также неудобно небольшие отрезки измерять в метрах; для этого существуют единицы измерения, меньшие метра. Эти единицы следующие: дециметр, равный 0,1 метра; сантиметр, равный 0,1 дециметра, или 0,01 метра, и миллиметр, равный 0,1 сантиметра, или 0,001 метра. Таким образом

можно составить следующую сводку единиц измерения длин:

$$\begin{aligned} 1 \text{ километр} &= 1\,000 \text{ метрам;} \\ 1 \text{ метр} &= 10 \text{ дециметрам;} \\ 1 \text{ дециметр} &= 10 \text{ сантиметрам;} \\ 1 \text{ сантиметр} &= 10 \text{ миллиметрам.} \end{aligned}$$

Легко получить из приведенного следующие, часто применяемые на практике соотношения:

$$\begin{aligned} 1 \text{ метр} &= 100 \text{ сантиметрам;} \\ 1 \text{ метр} &= 1\,000 \text{ миллиметрам.} \end{aligned}$$

Для того чтобы не писать полностью названий единиц измерения, приняты условные сокращенные обозначения их; так метр обозначают *м* (без точки), километр — *км*, дециметр — *дм*, сантиметр — *см*, миллиметр — *мм*.

Как видно из изложенного, все единицы измерения образованы так, что соотношения между ними представляют собой числа, состоящие из единицы с нулями. Это сильно облегчает расчеты и является большим преимуществом метрической системы мер.

Пример 1. При измерении длины паропровода найдено, что она равна 25 *м* 3 *см* 5 *мм*. Выразить длину паропровода в метрах. Выразим 3 *см* в метрах; так как 1 *см* = 0,01 *м*, то

$$3 \text{ см} = 3 \cdot 0,01 = 0,03 \text{ м.}$$

Далее выразим 5 *мм* в метрах; так как 1 *мм* = 0,001 *м*, то

$$5 \text{ мм} = 5 \cdot 0,001 = 0,005 \text{ м.}$$

Таким образом вся длина трубопровода составляет

$$25 + 0,03 + 0,005 = 25,035 \text{ м.}$$

Пример 2. Длину измеренного в примере 1 паропровода выразить в миллиметрах.

Так как 1 *м* = 1 000 *мм*, то

$$25 \text{ м} = 25 \cdot 1\,000 = 25\,000 \text{ мм.}$$

Так же находим

$$3 \text{ см} = 3 \cdot 10 \text{ мм} = 30 \text{ мм.}$$

Общая длина трубопровода

$$25\,000 + 30 + 5 = 25\,035 \text{ мм.}$$

Следующей величиной, имеющей чрезвычайно важное значение в технике, является сила. Понятие об этой величине каждый из нас имеет из непосредствен-

ного опыта. Если какой-либо предмет находится в покое и его нужно привести в движение, этого можно достигнуть, приложив к предмету силу; если какое-либо тело движется с некоторой скоростью и требуется увеличить скорость движения или, наоборот, уменьшить ее, этого можно достигнуть, также приложив к телу силу.

Далее, каждому известно, что все тела на земле имеют вес. Это свойство тел — иметь вес — является следствием того, что все тела притягиваются к земле, и сила, с которой тела притягиваются к земле, есть то, что мы называем весом тела.

За единицу измерения силы вообще и силы тяжести (веса) в частности в изучаемой здесь нами системе единиц измерения принят килограмм (обозначают кг).

Для измерения очень больших сил или весов применяют другую единицу измерения — тонну (t), причем

$$1 t = 1000 \text{ кг.}$$

Для измерения очень малых сил применяют силу — грамм (g), причем

$$1 \text{ кг} = 1000 \text{ г.}$$

Таким образом можно составить следующую сводку единиц измерения силы:

$$1 t = 1000 \text{ кг,}$$

$$1 \text{ кг} = 1000 \text{ г.}$$

В технике очень часто приходится измерять продолжительность какого-либо процесса. Для этого существует единица измерения времени — секунда. Другими единицами для измерения времени служат: минута, равная 60 секундам, и час, равный 60 минутам. Итак

$$1 \text{ мин.} = 60 \text{ сек.,}$$

$$1 \text{ час} = 60 \text{ мин.} = 3600 \text{ сек.}$$

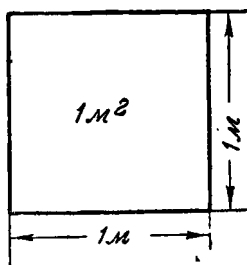
Изучение других величин, с которыми приходится иметь дело в технике, показывает, что все остальные величины могут быть образованы при помощи уже рассмотренных. Поэтому рассмотренные величины — длина,

сила, время — называются основными, а все остальные — производными величинами.

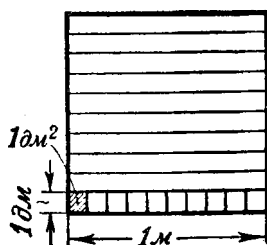
Рассматриваемая здесь система единиц измерения называется технической системой мер.

Познакомимся с некоторыми производными величинами и единицами измерения для них.

За единицу измерения площадей можно принять площадь такого квадрата, у которого длина равна 1 м и ширина равна 1 м. В уменьшенном виде такая площадь изображена на фиг. 1. Такая площадь называется квадратным метром (обозначается $м^2$). Для измерения больших площадей единицей измерения мо-



Фиг. 1. Квадратный метр.



Фиг. 2. Соотношение между одним квадратным метром и одним квадратным дециметром.

жет служить квадратный километр ($км^2$), а для малых площадей — $дм^2$, $см^2$, $мм^2$ (читается квадратный дециметр, квадратный сантиметр и т. д.).

Нетрудно установить соотношения между различными единицами измерения площадей. На фиг. 2 снова представлен 1 $м^2$. Длина и ширина его разделены на десять равных частей, каждая из которых равна 1 $дм$; следовательно, в 1 $м^2$ по длине укладывается в ряд 10 $дм^2$.

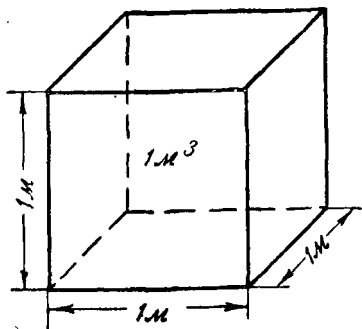
Таких рядов по ширине получится 10, а всего в 1 $м^2$ будет $10 \times 10 = 100$ $дм^2$, т. е. один квадратный метр равен 100 квадратным дециметрам. Пользуясь таким расчетом, можно установить и другие соотношения. Например, так как

$$1 м = 100 см,$$

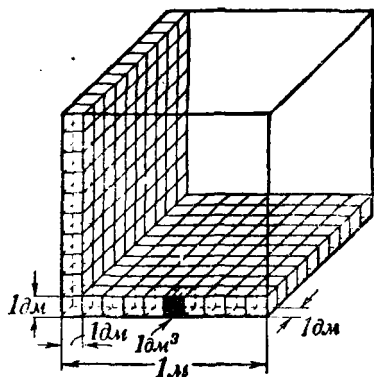
то

$$1 м^2 = 100 \times 100 = 10\,000 см^2.$$

При помощи единицы измерения длины можно получить и единицу измерения объема. Для этого образуем такой куб, у которого длина, ширина и высота равны каждая 1 м (фиг. 3). Полученный таким образом объем, называемый кубическим метром (обозначается $м^3$) и служит единицей для измерения объемов тел. Для той же цели может служить $см^3$ (кубический



Фиг. 3. Кубический метр.



Фиг. 4. Соотношение между одним кубическим метром и одним кубическим дециметром.

сантиметр), $дм^3$ (кубический дециметр) и $мм^3$ (кубический миллиметр). Общеупотребительная единица измерения объема жидкостей — литр ($л$) — равна кубическому дециметру.

Нетрудно составить соотношения между единицами измерения объемов. На фиг. 4 представлен $1 м^3$; на его нижнем основании по длине и по ширине укладывается по 10 $дм^3$, т. е. всего в один слой 100 $дм^3$. По высоте таких слоев получается 10, а всего в $1 м^3$ будет $100 \times 10 дм^3$. Таким образом

$$1 м^3 = 10 \times 10 \times 10 = 1000 дм^3$$

или

$$1 м^3 = 1000 л.$$

Пользуясь таким расчетом, можно установить и другие соотношения. Например, если $1 м = 100 см$, то

$$1 м^3 = 100 \times 100 \times 100 = 1000000 см^3.$$

Для различного рода расчетов в технике приходится пользоваться величинами — удельным весом и удельным объемом. Дадим определения этим величинам и установим единицы измерения для них.

Удельным весом тела называется вес такого количества его, которое образует единицу объема этого тела. Так как в технике единицей объема чаще всего служит 1 м^3 , а все измеряют в килограммах, то *удельным весом тела называется вес 1 м^3 этого тела, измеренный в килограммах*. Так, например, удельный вес железа 7800 кг в 1 м^3 . Очевидно, что единицей измерения в этом случае служит такой удельный вес, при котором 1 м^3 весит 1 кг .

Эта единица измерения обозначается $\text{кг}/\text{м}^3$ (килограмм в кубическом метре). Таким образом удельный вес железа $7800 \text{ кг}/\text{м}^3$. Чтобы самому найти удельный вес какого-либо тела, надо было бы отрезать кусок его, имеющий объем 1 м^3 (или, если это жидкость, налить в сосуд, вмещающий 1 м^3), и затем взвесить; полученный вес в килограммах и будет удельным весом этого тела. Но значения удельных весов многих тел уже хорошо известны, и их можно найти в таблицах (см. табл. I в конце книги); при этом должно быть указано, в каких единицах измерен удельный вес. Очень часто удельный вес в таблицах дают в других единицах — $\text{г}/\text{см}^3$ (грамм в 1 см^3), в технических же измерениях нужно часто уметь выразить удельный вес в $\text{кг}/\text{м}^3$. Для этого удельный вес, выраженный в $\text{г}/\text{см}^3$, надо умножить на 1000; полученное число и будет удельным весом в $\text{кг}/\text{м}^3$.

Удельным объемом какого-либо тела называется объем такого количества, которое составляет единицу веса этого тела; так, если за единицу веса принять кг , а объем измерять в м^3 , то *удельным объемом называется объем 1 кг тела, выраженный в м^3* ; единицей измерения удельного объема служит в этом случае величина $\text{м}^3/\text{кг}$.

Значит, чтобы найти удельный объем тела, надо отвесить 1 кг его и потом, измерив получившийся объем, узнать, сколько кубических метров он составляет.

Но если известен удельный вес тела, то удельный объем можно найти гораздо проще, разделив единицу на удельный вес; так, если удельный вес воды (при 0°C)

равен $1\,000\text{ кг/м}^3$, т. е. 1 м^3 воды весит $1\,000\text{ кг}$ или 1 т , то удельный объем воды (при 0°C) равен

$$1:1\,000 = 0,001\text{ м}^3/\text{кг}.$$

Полученное число показывает, что 1 кг воды занимает объем, равный одной тысячной кубического метра.

2. ДАВЛЕНИЕ, РАБОТА, МОЩНОСТЬ

Рассмотрим еще несколько величин, с которыми часто приходится встречаться. Сюда относятся прежде всего давление, которое в теплотехнике применяют, например, тогда, когда хотят характеризовать состояние пара в паровом котле; об этом состоянии можно судить по тому, с какой силой пар давит на поверхность определенного размера; отсюда *давлением называют ту силу, которая приходится на единицу площади*. Единицей измерения площади в технике служит квадратный метр (м^2), единицей силы — килограмм, отсюда давление 1 кг на 1 м^2 и принимают за единицу измерения давления; эта величина обозначается кг/м^2 . Однако эта единица измерения очень мала, и при пользовании ею для измерения давления, например, в котлах пришлось бы иметь дело с очень большими числами; это было бы так же неудобно, как, например, измерять расстояние между городами в метрах или сантиметрах. Поэтому для измерения больших давлений пользуются другой единицей измерения; в ней также взята сила в 1 кг , но приходящаяся на 1 см^2 . Эту единицу измерения давления обозначают кг/см^2 (килограмм на квадратный сантиметр)

Мы уже знаем, что площадь 1 см^2 в $10\,000$ раз меньше, чем площадь в 1 м^2 ; поэтому при давлении 1 кг/см^2 на каждый квадратный метр будет давить сила $10\,000\text{ кг}$, в то время как при давлении 1 кг/м^2 на квадратный метр приходится 1 кг . Значит давление 1 кг/см^2 в $10\,000$ раз больше, чем давление 1 кг/м^2 . Иначе говоря,

$$1\text{ кг/см}^2 = 10\,000\text{ кг/м}^2.$$

Так как давление 1 кг/см^2 приблизительно равно тому давлению, с которым атмосферный воздух, окружающий землю, давит своим весом на уровне моря на все те-

ла, то эту единицу измерения называют технической атмосферой или для краткости просто атмосферой (*ат*). Таким образом, если говорят, что давление в котле равно 20 атмосферам, это значит, что пар в нем находится в таком состоянии, что он давит на каждый квадратный сантиметр поверхности котла с силой 20 кг.

О других единицах измерения давления мы будем говорить позже, когда ближе познакомимся с газообразными телами.

Пример 3. На подставке, площадь которой равна 24 см^2 , лежит равномерно распределенный по ней груз, вес которого составляет 12 кг. Определить давление, которое оказывает груз на подставку.

Так как давлением называется сила, приходящаяся на единицу площади, то вычислим, с какой силой давит груз на площадь в 1 см^2 ; очевидно, получится

$$12:24 = 0,5 \text{ кг/см}^2.$$

Таким образом давление груза на площадку равно $0,5 \text{ кг/см}^2$, или $0,5 \text{ ат}$.

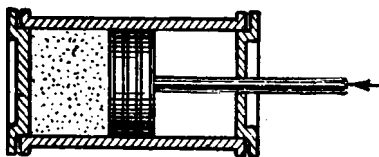
Пример 4. Давление пара в цилиндре машины (фиг. 5) равно 12 ат ; площадь поршня равна 5 см^2 . Вычислить, с какой силой пар давит на поршень.

Так как давление в 12 ат соответствует силе в 12 кг на 1 см^2 , то сила, приходящаяся на весь поршень, площадь которого равна 5 см^2 , составит

$$12 \cdot 5 = 60 \text{ кг}.$$

С понятием силы связана еще одна величина — работа. Если пар давит на поршень и перемещает его, говорят, что пар совершает работу. Работа совершается всегда и при подъеме груза. Чем больше весит груз и чем больше высота, на которую этот груз поднят, тем, очевидно, и большая работа была совершена. Из приведенных примеров видно, что совершение работы связано всегда с приложением силы и перемещением тела, к которому эта сила приложена.

Для того чтобы измерять работу, условились единицей работы считать такую работу, которую совершает сила в 1 кг при перемещении груза на 1 м . При этом только необходимо иметь в виду, что сила должна быть направлена в ту же сторону, в которую происходит пе-



Фиг. 5. Цилиндр с подвижным поршнем.

ремещение. Эта единица измерения работы носит название килограмметр и обозначается *кгм*.

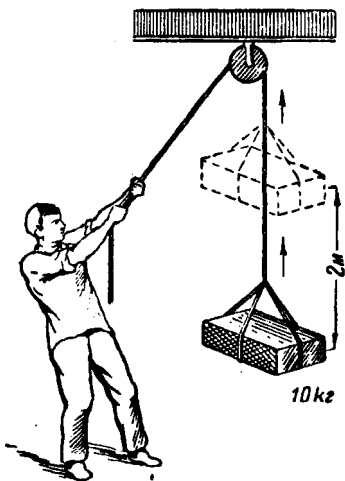
Если работу будет совершать сила в несколько килограммов, допустим в 10 кг, и перемещение будет произведено, положим, на 2 м, то работа, очевидно, будет равна 20 *кгм*. На фиг. 6 показано совершение такой работы человеком при подъеме груза. Здесь при помощи неподвижного блока направление силы, развиваемой человеком, изменено таким образом, что сила, с которой трос тянет груз, направлена в сторону его перемещения.

Вычисление работы еще ничего не говорит об интенсивности, с которой эта работа совершена. Очевидно, что большая работа, совершенная в очень длительный промежуток времени, может быть менее интенсивна, чем малая работа, совершенная в короткий промежуток времени.

Для того чтобы судить об интенсивности, с которой работа совершается, нужно знать, какая работа совершена в единицу времени, например, в одну секунду. *Работа, совершенная в единицу времени, называется мощностью.* Очевидно, что единицей измерения мощности является такая мощность, при которой работа в 1 *кгм* совершается в 1 сек.; она обозначается *кгм/сек*. Эта единица измерения очень мала, на практике пользуются единицей в 75 раз большей, чем 1 *кгм/сек*; эта единица измерения называется лошадиной силой и обозначается *л. с.*; таким образом

$$1 \text{ л. с.} = 75 \text{ кгм/сек.}$$

Название единицы мощности — лошадиная сила — происходит с того времени, когда для совершения работы применялась сила животных.



Фиг. 6. Работа подъема груза.

В энергетике наибольшее распространение имеет другая единица мощности — киловатт (обозначается *квт*); между киловаттом и ранее введенными единицами мощности существует такое соотношение

$$1 \text{ квт} = 1,36 \text{ л. с.} = 102 \text{ кгм/сек.}$$

Пример 5. Подъемником в течение 2 час. поднято 12 000 кг груза на высоту в 100 м. Вычислить мощность подъемника.

Найдем работу, совершенную подъемником. Она составляет

$$12\,000 \times 100 = 1\,200\,000 \text{ кгм.}$$

Вычислим теперь работу подъемника в 1 сек. Так как 1 час = 60 мин., а 1 мин. = 60 сек., то

$$2 \text{ часа} = 2 \times 60 \text{ мин.} = 120 \times 60 \text{ сек.} = 7\,200 \text{ сек.}$$

Отсюда работа в 1 сек., или мощность подъемника, составит

$$\frac{1\,200\,000}{7\,200} = 167 \text{ кгм/сек.}$$

Выразим эту мощность в л. с.:

$$167:75 = 2,23 \text{ л. с.}$$

В киловаттах мощность подъемника составит

$$2,23:1,36 = 1,64 \text{ квт} \text{ или } \frac{167}{102} = 1,64 \text{ квт.}$$

3. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МАТЕМАТИКИ

Чтобы найти значение какой-либо величины, надо знать правило ее вычисления. Например, чтобы найти стоимость какого-либо количества топлива, нужно знать вес этого количества и его цену, т. е. стоимость единицы его веса. Тогда стоимость топлива будет равна произведению цены топлива на его вес. Это правило вычисления можно было бы записать так:

Стоимость топлива = цена топлива \times вес топлива.

Однако такая запись очень громоздка. Для ее сокращения поступим так. Условимся величины, входящие в записанное правило, обозначать какими-либо буквами. В науке принято величины обозначать буквами латинского или греческого алфавита (см. в конце книги). Итак, обозначим стоимость топлива буквой *A*, цену топлива буквой *a*, а вес топлива буквой *G*. Тогда правило вычисления стоимости топлива можно будет записать так:

$$A = a \times G.$$

Знак \times часто заменяют точкой или при употреблении буквенных обозначений совсем опускают; тогда запись примет вид

$$\begin{aligned} \text{или} \quad & A = a \cdot G, \\ & A = aG. \end{aligned}$$

Если теперь нам для какого-либо случая будет задано численное значение G и численное значение a , то можно будет найти и численное значение величины A . Для этого в выражение

$$A = aG$$

нужно будет вместо a и G подставить их значения и перемножить. Пусть

$$a = 30 \text{ руб/т}, \quad G = 300 \text{ т},$$

тогда

$$A = 30 \cdot 300 = 9\,000 \text{ руб.}$$

Если для какого-либо другого случая требуется вычислить стоимость 500 т топлива по цене 20 руб. за тонну, т. е.

$$a = 20 \text{ руб/т} \quad \text{и} \quad G = 500 \text{ т},$$

$$\text{то} \quad A = 20 \cdot 500 = 10\,000 \text{ руб.}$$

Выражение

$$A = aG$$

можно назвать формулой вычисления стоимости топлива по заданным величинам a и G .

Таким образом формулой называется выраженное в буквенных обозначениях правило вычисления какой-либо величины по другим известным величинам.

В качестве примера вычислений по формулам укажем на вычисление веса и объема тел. Пользуясь понятиями удельного веса и удельного объема, можно установить такие правила:

1. *Вес тела равен объему его, умноженному на удельный вес, или вес тела равен объему его, деленному на удельный объем.*

Если обозначить G — вес тела, V — объем тела, γ (греческая буква гамма) — удельный вес, ν — удельный объем, то правило можно записать в виде таких формул:

$$G = V\gamma, \quad (1)$$

$$G = \frac{V}{\nu} \quad (2)$$

(наиболее важные формулы мы будем нумеровать, указывая номер справа в скобках; в дальнейшем при пользовании какой-либо формулой будем указывать ее номер).

2. Объем тела равен весу тела, умноженному на удельный объем, или объем тела равен весу тела, деленному на удельный вес. Пользуясь уже введенными обозначениями, правило 2 можно выразить такими формулами:

$$V = Gv, \quad (3)$$

$$V = \frac{G}{\gamma}. \quad (4)$$

При вычислении искомой величины (она обычно в формуле стоит слева) надо проделать ряд действий над величинами, стоящими в формуле справа. Укажем на основные правила производства этих вычислений.

Когда приводят формулу для вычисления какой-либо величины, обычно указывают, в каких единицах измерения должны быть подставлены значения величин, входящих в формулу. Если же нет прямого указания, то такую подстановку нужно делать, как говорят, в соответствующих единицах измерения. Это означает следующее. Если, например, удельный вес в формуле (1) взят в $г/см^3$, то объем следует брать в $см^3$; вес в этом случае будет получаться в $г$; если, например, в формуле (3) удельный объем взят в $м^3/кг$, то вес нужно брать в $кг$; объем в этом случае получится в $м^3$.

Если бы теперь мы в виде формул захотели выразить то, что ранее сказано о работе и мощности, то нужно было бы поступить так. Обозначим работу буквой W , силу буквой P , перемещение буквой s , мощность буквой N и время буквой t . Правило вычисления работы, иначе говоря, формула для вычисления работы запишется так:

$$W = Ps, \quad (5)$$

а формула для вычисления мощности так:

$$N = \frac{W}{t}, \quad (6)$$

При пользовании буквенными обозначениями величин применяют следующие условные обозначения: если

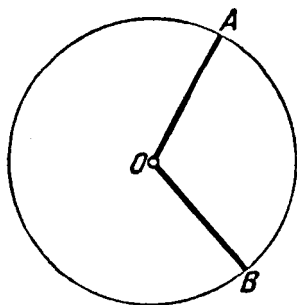
какое-нибудь число нужно несколько раз помножить само на себя, то над этим числом справа пишут другое, показывающее, сколько раз данное число нужно умножить само на себя, например,

$$a \cdot a \cdot a \cdot a = a^4,$$

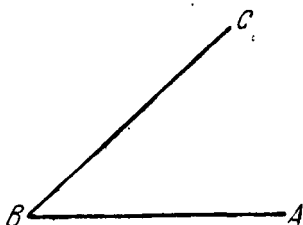
это выражение читают так: « a в четвертой степени».



Фиг. 7. Прямая линия.



Фиг. 9. Окружность.



Фиг. 8. Угол.



Фиг. 10. Параллельные линии.

Действие

$$a \cdot a \cdot a = a^3$$

читают так: « a в третьей степени», или « a в кубе».

Действие

$$a \cdot a = a^2$$

читают так: « a во второй степени», или « a в квадрате».

При решении многих теплотехнических задач приходится вычислять поверхности и объемы ряда тел. Изучением этих вопросов занимается часть математики — геометрия.

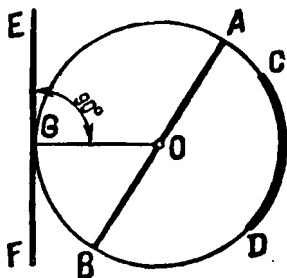
Простейшие геометрические фигуры — это прямая линия (фиг. 7), угол (фиг. 8), окружность (фиг. 9).

Обычно отрезок прямой линии обозначают буквами, поставленными на концах ее, например, прямая AB на фиг. 7.

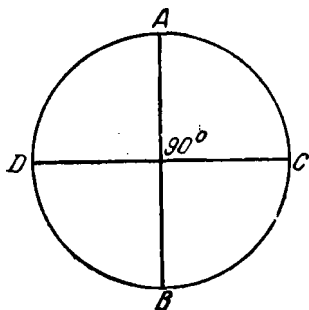
Две линии AB и CD , которые при продолжении не пересекаются, называются параллельными линиями (фиг. 10).

Угол обозначают тремя буквами, причем всегда букву, обозначающую точку пересечения двух линий, составляющих угол (вершина угла) ставят посередине; например, угол, начерченный на фиг. 8, читают так: ABC или CBA .

На фиг. 9 изображена окружность. Основное ее свойство заключается в том, что каждая точка, лежащая на



Фиг. 11. Диаметр, дуга, касательная.



Фиг. 12. Перпендикулярные диаметры.

окружности (A , B и др.), одинаково удалена от центра окружности, в данном случае от точки O . Эти равные отрезки OA , OB называют радиусами окружности. Обычно величину радиуса окружности обозначают буквой R или r . Вычерчивается окружность циркулем.

Прямая AB (фиг. 11), проходящая через центр O и соединяющая две точки окружности, называется диаметром. Диаметр обозначают обычно буквой D или d . Очевидно, диаметр равен двум радиусам, что можно записать так:

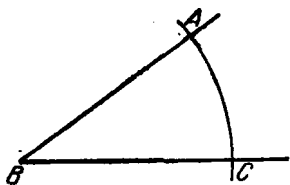
$$d = 2r \quad \text{или} \quad D = 2R.$$

Часть окружности, например, CD на фиг. 11, называется дугой. Для измерения дуг окружность делят на 360 равных частей; получаемая при этом дуга, равная $\frac{1}{360}$ части окружности, называется градусом и обозначается $^\circ$ (кружочком справа сверху); например, 30° — тридцать градусов.

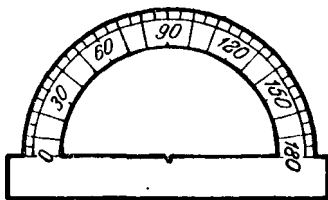
Линия EF (фиг. 11), проведенная таким образом, что имеет одну общую точку G с окружностью, называется касательной.

Касательная с радиусом, проведенным в точку касания, образует всегда угол в 90° .

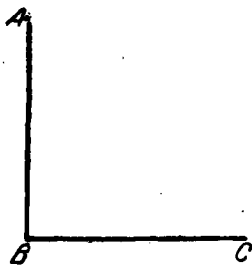
Если провести в окружности два диаметра (фиг. 12), один вертикальный AB , другой горизонтальный CD , то они разделят окружность на четыре равных части. Очевидно, каждая из дуг AC , CB , BD и DA будет иметь по 90° .



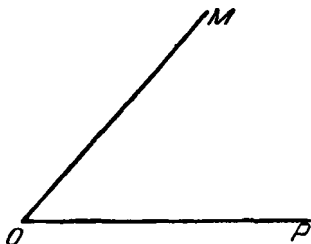
Фиг. 13. Измерение угла дугой.



Фиг. 14. Транспортир.



Фиг. 15. Прямой угол.



Фиг. 16. Острый угол.

Величиной градуса пользуются и для измерения углов.

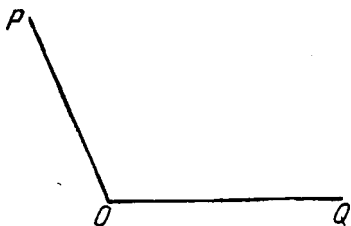
Для этого поступают следующим образом. Из вершины угла B (фиг. 13) каким-либо радиусом проводят дугу так, чтобы она пересекала обе стороны угла. Затем измеряют дугу AC , на которую опирается своим концом угол ABC . Число градусов дуги и будет определять величину угла ABC . Так, если дуга AC имеет, например, 48° , что и угол ABC имеет 48° . Прибор, служащий для измерения углов, называется транспортиром (фиг. 14).

Углы бывают острые, прямые и тупые. Угол ABC (фиг. 15), имеющий 90° , называется прямым. Все прямые углы, очевидно, равны между собой. Угол MOP (фиг. 16), имеющий меньше 90° , называется острым,

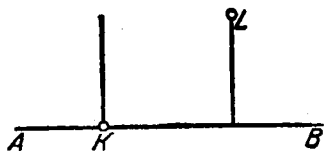
а угол POQ (фиг. 17), имеющий больше чем 90° , называется тупым.

Линия AB (фиг. 15), образующая с линией BC прямой угол, называется перпендикуляром.

Возвращаясь к фиг. 11, укажем, что касательная всегда перпендикулярна к радиусу, проведенному в точку касания, так как образует с ней угол в 90° . Таким образом линия OG перпендикулярна к линии EF .



Фиг. 17. Тупой угол.



Фиг. 18. Перпендикуляры.

Если на линии AB (фиг. 18) в точке K должен быть построен перпендикуляр к этой линии, то говорят, что в точке K нужно вставить перпендикуляр к линии AB ; если через точку L , лежащую вне линии AB , должен проходить перпендикуляр к линии AB , то говорят, что из точки L нужно опустить перпендикуляр на линию AB .

Окружность обладает одним замечательным свойством: длина любой окружности в одинаковое число раз больше, чем ее диаметр. Это число равно 3,14 (три целых и четырнадцать сотых), обозначается оно греческой буквой π ¹. Отсюда следует: для того чтобы найти длину окружности, нужно величину ее диаметра умножить т. е. на 3,14. Если длину окружности обозначим C , то правило вычисления длины окружности можно написать в виде такой формулы:

$$C = \pi d, \quad (8)$$

а так как диаметр равен двум радиусам, то то же правило можно написать и так:

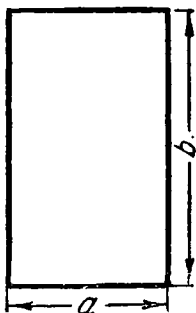
$$C = 2\pi r. \quad (8')$$

¹Число π не совсем точно равно 3,14, но более точная цифра практически не нужна.

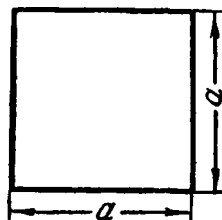
Если, например, вал имеет диаметр 4 см, то длина окружности вала будет:

$$C = \pi d = 3,14 \cdot 4 = 12,56 \text{ см.}$$

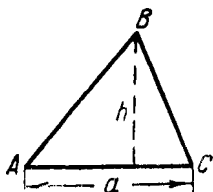
При помощи числа π можно найти также площадь, ограниченную окружностью, или, как говорят, площадь круга. Для этого нужно величину радиуса помножить на самое себя, или, как иначе говорят, радиус



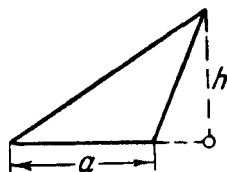
Фиг. 19. Прямоугольник.



Фиг. 20. Квадрат.



Фиг. 21. Остроугольный треугольник.



Фиг. 22. Тупоугольный треугольник.

известно в квадрат и полученное выражение умножить на π ; указанное правило вычисления площади круга можно записать в виде формулы

$$S = \pi r^2, \quad (9)$$

где буквой S обозначена площадь круга.

Из других плоских фигур, с которыми приходится иметь дело в расчетах, укажем на следующие: прямоугольник (фиг. 19), квадрат (фиг. 20), треугольник (фиг. 21 и 22).

В прямоугольнике стороны перпендикулярны друг другу, т. е. образуют прямые углы; при обозначениях,

указанных на чертеже, площадь прямоугольника может быть вычислена по формуле

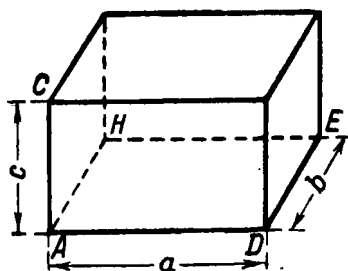
$$S = ab, \quad (10)$$

т. е. для того, чтобы вычислить площадь прямоугольника, нужно длину его умножить на ширину.

Квадрат — это такой прямоугольник, в котором стороны равны. Его площадь может быть вычислена по формуле

$$S = a^2. \quad (11)$$

В треугольнике ABC (фиг. 21), образованном тремя сторонами AB , BC и AC , любую из сторон, например AC , можно назвать осно-



Фиг. 23. Параллелепипед.

ванию; перпендикуляр, опущенный из противоположной вершины B на основание AC , называется высотой. Если обозначить основание буквой a , а высоту h , то площадь треугольника может быть вычислена по формуле

$$S = \frac{ah}{2}. \quad (12)$$

В теплотехнических расчетах приходится иметь дело и с пространственными фигурами или геометрическими телами. Тело, образованное шестью плоскостями, перпендикулярными друг другу, называется параллелепипедом (фиг. 23). Основанием такого тела является прямоугольник $AHED$; длины сторон его AD и DE на чертеже обозначены буквами a и b . Линия AC — высота параллелепипеда; ее длина обозначена буквой c . Объем параллелепипеда вычисляется по формуле

$$V = abc, \quad (13)$$

где буквой V обозначен объем.

Из этой формулы видно, что для вычисления объема параллелепипеда нужно длину умножить на ширину и на высоту; при этом все три отрезка должны быть измерены в одних и тех же единицах, например в метрах; тогда и объем будет выражен в кубических метрах.

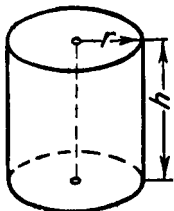
Из других тел, часто встречающихся в технике, укажем на цилиндр (фиг. 24). Основанием цилиндра является круг.

Если развернуть боковую поверхность цилиндра, она представит собой прямоугольник; боковая поверхность цилиндра может быть вычислена по формуле:

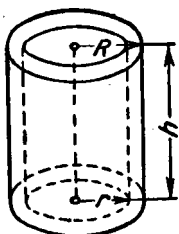
$$S = 2\pi rh \quad (14)$$

или

$$S = \pi dh.$$



Фиг. 24. Цилиндр.



Фиг. 25. Полый цилиндр.

В этой формуле приняты следующие обозначения: S — боковая поверхность цилиндра; r — радиус круга, являющегося основанием цилиндра; d — диаметр; h — высота цилиндра.

Для того чтобы найти полную поверхность цилиндра, надо к боковой поверхности прибавить площади двух кругов, являющихся верхним и нижним основаниями. Тогда получим

$$S = 2\pi rh + 2\pi r^2.$$

Эту же формулу можно написать иначе:

$$S = 2\pi r (h + r). \quad (15)$$

Объем цилиндра можно найти по формуле

$$V = \pi r^2 h. \quad (16)$$

В этой формуле V — объем цилиндра. Все другие буквы имеют прежние значения.

Если из цилиндра удалить среднюю часть его, представляющую собой также цилиндр, но меньшего радиуса, то оставшаяся часть представит собой полый цилиндр (фиг. 25). Так, всякая прямая труба представляет собой полый цилиндр.

Объем полого цилиндра можно вычислить по формуле

$$V = \pi h (R^2 - r^2).$$

Значения букв, входящих в эту формулу, понятны из фиг. 25.

В теплотехнических расчетах могут встретиться самые разнообразные геометрические тела. В конце книги приведена таблица с формулами для вычисления объемов некоторых из них.

Пример 6. Вычислить объем и вес стальной трубы, высота которой $h = 2 \text{ м } 4 \text{ см}$, наружный диаметр $D = 70 \text{ мм}$, внутренний диаметр $d = 54 \text{ мм}$.

Для вычисления объема нужно все величины выразить в одних и тех же единицах измерения; лучше всего выразить их в метрах, получим

$$h = 2,04 \text{ м}; R = 0,035 \text{ м}; r = 0,027 \text{ м}.$$

Тогда объем трубы составит

$$V = \pi h (R^2 - r^2) = 3,14 \cdot 2,04 (0,035^2 - 0,027^2) = 0,00318 \text{ м}^3.$$

Удельный вес стали $\gamma = 7,8 \text{ т/м}^3$; отсюда вес стальной трубы

$$G = V\gamma = 0,00318 \cdot 7,8 = 0,0248 \text{ т} = 24,8 \text{ кг}.$$

4. ЗАВИСИМОСТЬ, ТАБЛИЦА, ГРАФИК

Формула дает возможность вычислить одну какую-либо величину по другим; вместе с тем формула указывает, как искомая величина зависит от тех, при помощи которых эту величину вычисляют. Так, формула вычисления стоимости топлива показывает, что чем больше цена топлива, тем больше и стоимость его (при одном и том же весе), или — чем больше вес топлива, тем больше и стоимость его (при одной и той же цене).

Формула вычисления веса тела (1) показывает, что чем больше удельный вес тела, тем больше вес одного и того же объема тела; из нее же видно, что чем больше объем тела, тем больше и его вес (при одном и том же материале).

Если с увеличением (или уменьшением) в несколько раз какой-либо величины, во столько же раз увеличивается (или уменьшается) другая, от нее зависящая, то такие величины называются прямо пропорциональными величинами. Так, вес тела и его объем — это величины прямо пропорциональные.

Из формулы (2) видно: чем больше удельный объем, тем при одном и том же объеме меньше его вес; на основании формулы (4) можно заключить: чем больше удельный вес тела, тем меньше объем одного и того же весового количества тела.

Если с увеличением (или уменьшением) в несколько раз какой-либо величины другая, зависящая от нее, во столько же раз уменьшается (или увеличивается), то такие величины называются обратно пропорциональными величинами.

Так, вес тела и его удельный объем — величины обратно пропорциональные; объем тела и его удельный вес также величины обратно пропорциональные.

Зависимость между величинами можно представить в таблице. Так, если путем взвешивания или расчета узнать веса различных объемов тела, то можно записать их следующим образом:

Объем тела в m^3	1	2	3	4	5	6
Вес тела в кг	5	10	15	20	25	30

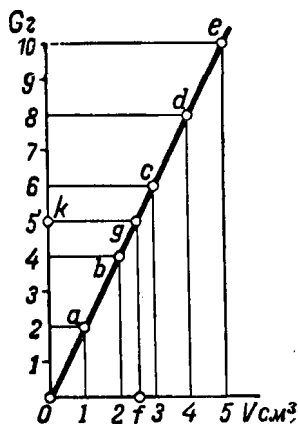
Такая таблица показывает, как вес тела зависит от его объема.

Очень наглядно зависимость между величинами может быть представлена графическим путем. Для того чтобы понять этот способ, разберем следующий пример. Пусть удельный вес некоторого тела $\gamma = 2 \text{ г/см}^3$, тогда зависимость веса этого тела от объема может быть представлена формулой

$$G = 2V. \quad (a)$$

Для того чтобы выразить эту формулу графически, поступим следующим образом. Возьмем две перпендикулярных линии, выходящих из точки O (фиг. 26), и условимся на горизонтальной линии откладывать в виде отрезков значения объемов, а на вертикальной тоже в виде отрезков значения весов этих объемов. Для этого нужно предварительно условиться относительно масштаба для рассматриваемых величин. Пусть для объемов отрезок в 5 мм соответствует 1 см^3 , а для весов отрезок в 5 мм — 1 г; тогда согласно выбранному масштабу объ-

емам в 1, 2, 3, 4 см^3 и т. д. будут соответствовать отрезки в 5, 10, 15, 20 мм и т. д., а весам в 1, 2, 3 г — отрезки в 5, 10, 15 мм и т. д. Отложим эти отрезки на взятых нами линиях от точки O : на горизонтальной прямой — отрезки для значений объемов, на вертикальной — отрезки для значений весов; концы отрезков будем отмечать черточками и под ними выставлять значения объемов на горизонтальной прямой и значения весов на вертикальной прямой. Чтобы видно было, какие величины на каждой из линий откладываются, поставим около линии объемов букву V , около линии весов — букву G ; рядом с каждой из букв поставим единицы измерения, в которых измерена каждая из величин.



Фиг. 26. Изображение зависимости между величинами в виде графика.

Найдем далее вес 1 см^3 . На основании формулы (а) этот вес составляет

$$G = 2 \cdot 1 = 2 \text{ г.}$$

Чтобы изобразить полученный результат на нашем чертеже, восставим два перпендикуляра: один в точке, соответствующей нашему объему, другой в точке, соответствующей найденному для этого объема весу 2 г . Точка a пересечения этих перпендикуляров и показывает, что объем тела в 1 см^3 весит 2 г .

Найдем теперь вес 2 см^3 . По формуле (а) этот вес составит

$$G = 2 \cdot 2 = 4 \text{ г.}$$

Для того чтобы изобразить полученный расчет на нашем чертеже, опять восставим два перпендикуляра: один в точке, соответствующей нашему объему 2 см^3 , а другой в точке, соответствующей найденному для этого объема весу в 4 г , и в пересечении этих перпендикуляров получим искомую точку b . Точка b пересечения этих перпендикуляров и показывает, что тело объемом в 2 см^3 весит 4 г . Таким же образом найдем точки c, d, e и т. д., показывающие веса объемов в 3, 4, 5 и т. д. см^3 . Соеди-

нив между собой точки a, b, c, d, e , получаем линию, дающую в графической форме зависимость веса тела от объема, соответствующую формуле (а).

Имея такой график, мы можем найти вес тела и для других значений объемов. Пусть, например, требуется найти вес тела для объема $V = 2,5 \text{ см}^3$. Найдем на горизонтальной линии точку f , соответствующую объему в $2,5 \text{ см}^3$, и восставим в ней перпендикуляр; в точке пересечения этого перпендикуляра с линией ae , характеризующей вес тела по формуле (а), находим точку g , опустив из нее перпендикуляр на линию весов G , находим точку k , по положению которой видим, что объему в $2,5 \text{ см}^3$ соответствует вес в 5 г .

В нашем построении горизонтальная линия, на которой мы откладывали значения объемов, называется осью абсцисс, вертикальная линия, на которой мы откладывали значения весов, — осью ординат; обе линии вместе — осями координат, точка O — началом координат. Для любой точки g отрезок Of и равный ему отрезок kg называют абсциссой точки g , а отрезок fg и равный ему отрезок Ok — ординатой точки g .

График зависимости по формуле (а) получился в виде прямой линии. Однако так получается не всегда. Зависимость между величинами может быть представлена и в виде кривой линии. В дальнейшем мы познакомимся и с такими зависимостями.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите основные величины технической системы мер и единицы их измерения.
2. Приведите соотношения между метром и другими единицами измерения длины. Сделайте то же для величины килограмм.
3. Что такое давление и в каких единицах его измеряют?
4. Какое давление называют атмосферой?
5. Почему давление 1 кг/см^2 больше, чем давление 1 кг/м^2 ?
6. Что такое мощность? Назовите единицы измерения мощности и соотношения между ними.
7. По соответствующим формулам выразите словами правила:
 - а) вычисление диаметра окружности по радиусу;
 - б) длины окружности по диаметру и по радиусу;
 - в) площади круга;
 - г) площади треугольника;
 - д) объема параллелепипеда;
 - е) боковой поверхности цилиндра

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПРОРАБОТКИ

1. Длину 5 м 8 см 6 мм выразить в метрах; эту же длину выразить в миллиметрах.

2. Вес 10 кг 180 г выразить в килограммах и в граммах.

3. Поверхность 3 м² 250 см² выразить: 1) в квадратных метрах; 2) в квадратных сантиметрах.

Отв.: 1) 3,025 м², 2) 30 250 см².

4. На круглой чашке весов диаметром 15 см равномерно рассыпана дробь, вес которой 46 кг; вычислить давление, оказываемое дробью на поверхность чашки.

Отв.: 0,255 ат.

5. Пар в котле находится под давлением 10 кг/см²; вычислить силу, с которой пар давит на днище, площадь которого 1,3 м².

6. Давление пара в цилиндре под поршнем равно 3 ат; радиус поршня $r = 20$ мм; вычислить, с какой силой пар давит на поршень.

7. При поднятии груза подъемником совершено 2 400 кгм работы в течение 15 сек.; вычислить мощность подъемника в л. с. и квт.

Отв.: 2,13 л. с., 1,57 квт.

8. Имеется мотор мощностью в 2 квт; выразить мощность мотора в л. с. и кгм/сек.

Отв.: 2,72 л. с., 204 кгм/сек.

9. Мотор имеет мощность 120 л. с.; выразить эту мощность в квт.

Отв.: 88,2 квт.

10. Диаметр окружности 30 см; вычислить длину окружности и площадь круга.

Отв.: 94,2 см, 706 см².

11. Диаметр одного вала 15 см, а другого 3 см; во сколько раз площадь сечения первого вала больше, чем второго?

12. Найти кубатуру (объем) помещения, у которого длина 5 м 120 см, ширина 3 м 12 см, а высота 4 м 25 см.

13. Вычислить объем, боковую поверхность и полную поверхность бака, имеющего форму цилиндра, радиус которого равен 80 м, а высота 1,5 м.

Отв.: 30,1 м³; 75,4 м²; 116 м².

14. Вычислить объем и вес стального кольца, у которого внутренний диаметр $d = 4,5$ мм, внешний диаметр $C = 65$ мм, а высота $H = 15$ мм.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ФИЗИКИ И ХИМИИ

5. СТРОЕНИЕ ТЕЛ. ТРИ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Наблюдая явления, происходящие в природе, человек стремится дать им объяснение, т. е. выявить причину их появления и предсказать их дальнейшее течение. Наука, изучающая явления, происходящие в неживой природе, называется физикой.

Для объяснения явлений, происходящих в природе, необходимо знать, из чего состоят тела. К выяснению этого и направлены усилия ученых с древнейших времен. Хотя в этом направлении сделано уже очень многое, в особенности в двадцатом столетии, однако работы продолжают, и наука делает все новые и новые открытия в этой области.

Все тела в природе состоят из мельчайших частиц — молекул; между молекулами имеются свободные промежутки.

Однако не следует считать, что молекула представляет собой нечто неделимое; молекула составлена из отдельных атомов, причем число атомов, образующих молекулу, самое разнообразное, от одного до нескольких десятков. Не следует также думать, что и атом неделим. Наука в последние годы доказала, что атомы состоят из более мелких составных частей.

Молекулы чрезвычайно малы. Для того чтобы составить представление о их размерах, укажем, что если бы можно было около 3 000 000 молекул среднего размера плотно уложить рядом, то их длина составила бы всего около 1 мм.

Молекулы в теле находятся в непрерывном движении, причем это движение неодинаково в различных телах.

Все тела в природе бывают в трех состояниях — твердом, жидком и газообразном. Твердое тело (например, уголь, сталь, резина) способно сохранять свою форму. Для того чтобы изменить форму твердого тела, например, согнуть лист стали или резины необходимо применить более или менее значительное усилие. Это объясняется тем, что молекулы в твердом теле расположены сравнительно близко друг к другу, а силы сцепления, действующие между молекулами, велики. Можно сказать, что молекулы твердого тела далеко не отходят от своих мест, а колеблются около некоторого среднего положения.

У жидкостей (например, у воды, ртути) молекулы также находятся на близком расстоянии друг от друга, однако силы сцепления между молекулами здесь значительно меньше. Вследствие этого молекулы уже не колеблются, а перемещаются с места на место; правда, это движение ограниченное, и молекулы как бы пере-

катываются друг по другу. Отличительным свойством жидкости является то, что жидкость принимает форму того сосуда, в который она налита, и почти не оказывает никакого сопротивления изменению своей формы. Вместе с тем жидкость имеет свой объем, иначе говоря, какую бы форму мы ни придавали определенному количеству жидкости, величина объема этого количества будет одна и та же. В этом можно убедиться, переливая одно и то же количество жидкости в разные по форме сосуды.

У газообразного тела (например, у воздуха) силы сцепления между молекулами ничтожны, молекулы здесь удалены друг от друга на значительно большие расстояния и находятся в непрерывном беспорядочном движении. Как и жидкость, газообразное тело не имеет своей формы, а принимает форму сосуда, в котором оно находится. Однако в отличие от жидкости газообразное тело не имеет своего объема и стремится всегда занять как можно больший объем. Если некоторое количество газа ввести в большое помещение, то очень скоро газ равномерно распределится по всему объему помещения. Если из баллона выкачивать находящийся там газ, то остающийся газ тоже всегда будет равномерно заполнять весь баллон.

6. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ КУРСА ХИМИИ; РЕАКЦИИ. ХИМИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ. МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ВЕС

Среди явлений, которые приходится наблюдать и изучать, имеются такие, в которых участвующие в них вещества исчезают, а вместо них появляются другие вещества, отличающиеся от исчезнувших своими свойствами. В качестве примера таких явлений укажем на процесс горения топлива. В состав каждого топлива входят углерод, водород, азот и другие вещества. При горении топлива получаются новые вещества — углекислый газ, водяной пар и др.

Изучением свойств тел и их превращений занимается химия. Явления же, которые сопровождаются появлением новых веществ, называются химическими превращениями или химическими реакциями. Если при реакции из одного вещества получаются два или три новых, то такая реакция называется

скоростью. В другом случае нас может интересовать движение этих же тел по отношению других в свою очередь движущихся тел: в этом случае его называют относительным движением, а скорость тел относительно движущихся тел — относительной скоростью.

В качестве примера рассмотрим движение человека по палубе парохода. Пусть человек движется по палубе со скоростью 2 м/сек относительно палубы в направлении движения парохода, скорость которого также составляет 2 м/сек . Очевидно что относительная скорость движения человека составляет 2 м/сек , а абсолютная (по отношению к берегу) 4 м/сек . Рассмотрим теперь значения скоростей после того, как, дойдя до носа корабля, человек повернулся и пошел с прежней скоростью относительно палубы в противоположном движению парохода направлении. Очевидно, что относительная скорость его прежняя, т. е. 2 м/сек . Чему же равна будет его абсолютная скорость пока он движется от носа до кормы? Так как пароход движется тоже со скоростью 2 м/сек в обратном направлении, то, очевидно, абсолютная скорость человека, т. е. его скорость по отношению к берегу, будет в это время равна нулю.

9. ИНЕРЦИЯ, СИЛА, МАССА. ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

Еще с давнего времени человек пытался осознать законы движения тел. Грандиозные сооружения древности (пирамиды, башни) показывают, что большой ряд сведений из механики был известен уже очень давно. Однако только в XVI—XVII столетиях были открыты законы движения тел, которыми наука пользуется и до сих пор, развивая и дополняя их. Установил эти законы Исаак Ньютон, живший от 1648 г. до 1727 г.

Первый закон касается известного каждому из личного опыта свойств инерции тел.

Различают инерцию покоя и инерцию движения. Инерция покоя заключается в том, что тело, находящееся в покое, само по себе не придет в движение до тех пор, пока какая-либо внешняя причина, называемая силой, не выведет его из этого состояния покоя. Инерция покоя наблюдается в начале всякого движения. Например, если вагон, в котором сидит человек, быстро трогается, туловище человека отклоняется назад. Это происходит потому, что нижняя часть тела начинает движение вместе с вагоном, верхняя же часть туловища, не связанная с вагоном, запаздывает в начале движения и потому, как говорят, по инерции несколько отклоняется.

Инерция движения заключается в том, что тело, находящееся в движении, всегда стремится сохранить

направление и скорость своего движения, т. е. стремится двигаться прямолинейно и равномерно. Для того чтобы заставить тело изменить свое движение, необходимо приложить силу.

При очень быстром движении автомобиля трудно изменить направление движения; при резком повороте задние колеса автомобиля, как говорят, «заносит». С другой стороны, если движение происходит с некоторой скоростью, то изменение ее немедленно чувствуется. Например, если поезд резко затормаживает, то человек, находящийся в вагоне, подается вперед. Происходит это потому, что после торможения тело человека стремится сохранить скорость, которую оно имело до торможения поезда.

Сказанное об инерции покоя и об инерции движения составляет содержание первого закона Ньютона, который можно формулировать так: *всякое тело, если на него не действует какая-либо сила, стремится сохранить состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, в котором оно находится.*

Наблюдая проявления инерции тел, мы замечаем, что тела имеют различную инерцию. Так, большой камень труднее сдвинуть с места, чем маленький; груженный вагон труднее остановить, чем пустой. Происходит это потому, что массы сравниваемых тел различны. Таким образом инерция тела определяется его массой. Иначе можно сказать, что масса тела, характеризуя количество его вещества, является мерой инерции тела.

Мы уже говорили о том, что к телу нужно приложить силу для того, чтобы вывести его из состояния покоя или из состояния прямолинейного и равномерного движения. В связи с этим возникает вопрос, как измерять силу.

Так как сила преодолевает инерцию тела, а мерой инерции является масса тела, то, следовательно, величина силы, которую нужно приложить к телу, должна зависеть от массы тела. Далее, прилагая к телу силу, мы изменяем его скорость, т. е. сообщаем телу ускорение. Очевидно, что величина силы также зависит и от того, какое ускорение сообщается телу. Итак, величина силы, действующей на тело, определяется массой его и сообщаемым телу ускорением. Исходя из этих соображений, Ньютон установил, что сила, действующая на

тело, измеряется *произведением массы тела на его ускорение*.

Если обозначить массу тела буквой m , а ускорение, вызываемое силой, буквой a , то сила P , действующая на тело, составит

$$P = ma. \quad (26)$$

Это положение и составляет содержание второго закона Ньютона.

На основании этого закона можно утверждать, что если тело движется с ускорением (все равно — с положительным или отрицательным), то на тело действует сила, и, наоборот, если на тело действует сила, то оно будет двигаться с ускорением. Например, если по ровной поверхности движется шар, то скорость его все время уменьшается. Происходит это потому, что трение между шаром и поверхностью, по которой происходит движение, а также трение между шаром и окружающим его воздухом представляют собой силу, направленную в сторону, противоположную движению, что и вызывает уменьшение скорости; это движение имеет отрицательное ускорение. В приведенном примере мы обнаруживаем, что в результате взаимодействия тел: с одной стороны шара и с другой — поверхности, по которой он двигался, и воздуха, возникла причина — сила трения, которая вызвала отрицательное ускорение, т. е. замедление движения шара. В разобранным ранее движении поезда с нарастающей скоростью имеется положительное ускорение, возникающее вследствие давления пара на поршень паровой машины паровоза.

В обоих рассмотренных примерах мы видим, что сила, вызывающая ускорение, приложена непосредственно к движущемуся телу. Однако это не обязательно. Возникновение силы может иметь место и тогда, когда два взаимодействующих тела не соприкасаются друг с другом.

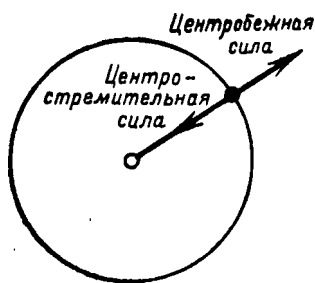
В § 1 уже было сказано, что все тела имеют вес, который иначе называется силой тяжести. Из наблюдений известно, что тело, лишенное опоры, падает на землю, причем движение это происходит с ускорением. Тот обстоятельство, что тело падает на землю с ускорением, показывает, что на него действует сила. Она возникает вследствие того, что земля притягивает к

себе все тела. Эта сила и есть вес тела, иначе называемая силой тяжести.

Для выявления сил, возникающих при взаимодействии тел между собой, необходимо знать и третий закон Ньютона, который гласит: *действия двух тел друг на друга всегда равны и противоположны по направлению*. В качестве примера рассмотрим следующий случай. Пусть на подставке лежит тело весом 5 кг. Следовательно, наше тело давит на подставку с силой 5 кг. Согласно третьему закону Ньютона и подставка действует на наше тело с силой в 5 кг, но в обратном направлении. В самом деле, если бы такой силы не было, т. е. тело не прижималось бы к подставке, то оно должно было бы двигаться вниз. Но подставка мешает этому и противодействует силе 5 кг, тянущей тело вниз.

10. ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНАЯ И ЦЕНТРОБЕЖНАЯ СИЛЫ

Важный для техники случай действия сил имеем мы при движении тел по криволинейному пути. С таким движением приходится встречаться на каждом шагу.



Фиг. 28. Центробежная (приложена к грузу) и центростремительная (приложена к нити) силы.

Шкив вращается вместе с валом, на который он насажен, — в этом случае каждая точка на окружности шкива совершает криволинейное движение; пар, подведенный к паровой турбине, движется между лопатками, которые имеют криволинейное очертание, таким образом и движение пара — криволинейное.

Рассмотрим простейший случай криволинейного движения — равномерное движение груза, прикрепленного к нити, противоположный конец которой закреплен (фиг. 28). На основании изложенного в предыдущем параграфе можно утверждать, что на шарик действует сила, так как если бы ее не было, груз двигался по инерции прямолинейно; и действительно, если в какой-либо момент нить оборвется, то в тот же момент груз станет двигаться прямолинейно, по касательной к окружности. Если же груз при наличии нити движется по окружности,

то это значит, что на него действует сила, удерживающая его на окружности; эта сила приложена к грузу и направлена к центру; ее называют **центростремительной силой**; как видно, центростремительная сила приложена к движущемуся телу; по третьему закону Ньютона возникает другая сила, равная и противоположная центростремительной, — она называется **центробежной силой**; эта сила приложена к тем предметам (их называют «связями»), которые образуют криволинейное движение тела. В данном случае связью является нить, к которой и приложена центробежная сила; вследствие наличия центробежной силы нить оказывается натянутой.

При постройке машин с вращающимися частями они должны быть так рассчитаны, чтобы не произошло повреждения машины от возникающих при движении центробежных сил.

11. СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ. НАПРЯЖЕНИЯ В МАТЕРИАЛАХ

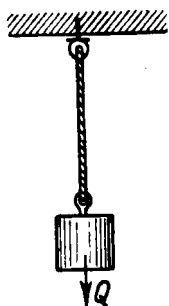
Уже раньше было сказано, что между молекулами твердого тела существуют значительные силы сцепления, и требуется часто большое усилие для того, чтобы изменить форму твердого тела. Всякое изменение формы называют **деформацией**.

Если верхний конец металлического стержня закрепить накрепко, а к нижнему концу подвесить тяжелый груз, то при точном измерении можно обнаружить, что длина стержня увеличится. Если груз снять, то стержень, если груз был не очень большой, вернется к своей прежней длине. Свойство тел возвращаться к своей первоначальной форме по удалении силы, вызывающей деформацию, называют **упругостью**. Однако не всегда твердое тело полностью возвращается к своей прежней форме. Есть определенный предел упругости тел. Если груз достаточно велик и предел упругости перейден, то деформация может быть такая, что по удалении этого груза тело не вернется полностью к своей форме. Такую деформацию называют **остаточной деформацией**. Наконец, груз может быть настолько велик, что произойдет разрыв стержня. Наименьшее усилие, при котором это происходит, называют **разрушающим**

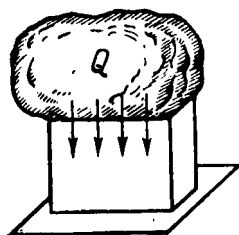
усилием; если это усилие относится к единице поверхности, его называют разрушающим напряжением.

При построении сооружений и машин усилия, действующие в отдельных частях, должны быть таковы, чтобы от них не произошло ни остаточной деформации, ни, тем более, разрушения сооружения и машины.

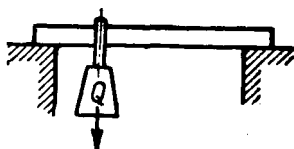
Для этого напряжения в материалах не должны быть больше так называемых допускаемых напряжений, устанавливаемых для каждого материала. Так, если



Фиг. 29. Растяжение.



Фиг. 30. Сжатие.



Фиг. 31. Изгиб.

при растяжении разрушающее напряжение для стали составляет 50 кг/мм^2 , то допускаемое напряжение берут приблизительно $\frac{1}{4} - \frac{1}{6}$ от него, т. е. берут четырехкратный или шестикратный запас прочности. Таким образом при запасе прочности 5 допускаемое напряжение составляет 10 кг/мм^2 . Если при этом известна площадь поперечного сечения растягиваемой части машины, то можно вычислить и допускаемую нагрузку на нее. Обозначим буквой S площадь поперечного сечения, буквой H — разрушающее напряжение, буквой e — запас прочности; тогда допускаемая нагрузка может быть определена по формуле

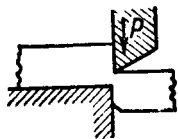
$$F = \frac{HS}{e}. \quad (27)$$

Изучая силы, действующие в отдельных частях сооружений и машин, различают следующие виды напряжений:

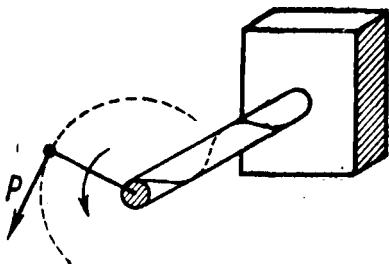
- 1) растяжение (фиг. 29);
- 2) сжатие (фиг. 30);
- 3) изгиб (фиг. 31);
- 4) срез (фиг. 32);
- 5) скручивание (фиг. 33).

Растяжению подвергаются нагруженные цепи, канаты, проволоки; сжатию — колонны, стойки, сваи; изгибу — балки, мосты; срезу — заклепки, болты; скручиванию — валы.

Наука, изучающая условия прочности материалов, называется сопротивлением материалов.



Фиг. 32. Срез.



Фиг. 33. Скручивание.

Пример 7. Вычислить вес груза, который можно подвесить на проволоке диаметром $d = 1$ мм.

Прежде всего находим площадь поперечного сечения проволоки:

$$S = \pi r^2 = 3,14 \cdot 0,5^2 = 0,785 \text{ мм}^2.$$

Пусть разрушающее напряжение (его берут из таблиц) составляет $H = 60 \text{ кг/мм}^2$, а запас прочности $e = 4$, тогда допустимая нагрузка для проволоки данного диаметра составит

$$F = \frac{HS}{e} = \frac{60 \cdot 0,785}{4} = 11,8 \text{ кг.}$$

12. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Налитая в какой-либо сосуд произвольной формы жидкость на любой глубине производит своим весом давление, которое одинаково направлено во все стороны. Если в сосуде (фиг. 34а) выбрать одинаковые площадки на одной глубине, то как бы ни было направление площадок, давление на каждую из них может быть вычислено в формуле

$$p = h\gamma. \quad (28)$$

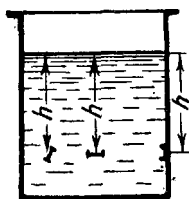
Здесь p — давление, производимое жидкостью; h — высота от уровня жидкости; γ — удельный вес жидкости. Если имеется сосуд, наполненный водой, и высота $h = 2$ м, то давление воды на дно сосуда составляет $p = h\gamma = 2 \cdot 1000 = 2000 \text{ кг/м}^2 = 0,2 \text{ кг/см}^2 = 0,2 \text{ ат.}$

Здесь принято, что удельный вес воды $\gamma = 1\,000 \text{ кг/м}^3$.

Такое же давление вода оказывает на той же глубине и на боковые стенки. Если же взять площадку на боковой стенке на высоте 1 м, то давление воды в этом месте составит

$$p = h\gamma = 1 \cdot 1\,000 = 1\,000 \text{ кг/м}^2 = 0,1 \text{ кг/см}^2 = 0,1 \text{ ат.}$$

Если взять изогнутую трубку (так называемую U-образную трубку) и налить в нее жидкость, то в обоих коленах жидкость установится на одной и той же высоте (фиг. 34б). С обеих сторон площадки АВ жидкость



Фиг. 34а. Давление жидкости.



Фиг. 34б. Сообщающиеся сосуды.

будет давить на нее с одинаковой силой. Поэтому жидкость будет оставаться в покое и не будет переливаться из одного колена в другое. То же самое получится, если оба колена будут и разного сечения — одно узкое, другое широкое, так как давление жидкости зависит только от глубины, но не от поперечных размеров сосуда.

Жидкость обладает способностью передавать оказываемое на нее давление во все стороны. Этот закон был открыт французским ученым Паскалем, родившимся в 1623 г. и умершим в 1662 г.

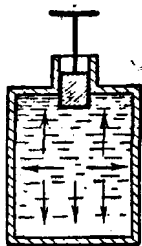
Представим себе сосуд, наполненный жидкостью (фиг. 35а). Пусть в верхней крышке имеется отверстие со вставленным в него поршнем. Если при помощи этого поршня произвести давление, например, в 2 кг/см^2 , на жидкость, то каждый квадратный сантиметр поверхности внутри жидкости испытает дополнительное давление в 2 кг .

Пользуясь этим свойством, можно при помощи небольшого усилия поднять большой груз. Возьмем два соединенных трубой цилиндрических сосуда (фиг. 35б), причем сечение АВ одного из них в 1 000 раз больше, чем сечение *ab* у другого. Если в оба сосуда налить жидкость, то, несмотря на разные сечения, жидкость установится в них на одной и той же высоте (закон сообщающихся сосудов). Если в обоих сосудах на

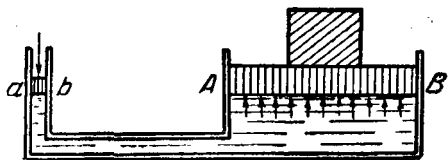
жидкость положить поршни и на сосуд с малым диаметром сверху положить груз в 1 кг, давление его передастся во все стороны; так как вся поверхность во втором сосуде в 1 000 раз больше, то, для того чтобы уравновесить давление груза слева, справа нужно будет положить груз в 1 000 раз больший.

На этом принципе основано устройство гидравлических прессов

Итак, если рассматривать площадку, расположенную в покоящейся жидкости на какой-либо глубине, то давление на этой площадке будет зависеть от того, какое давление оказывают извне на рассматриваемую жидкость, и от глубины погружения площадки, но не



Фиг. 35а. Передача давления жидкости во все стороны.



Фиг. 35б. Передача давления в гидравлическом прессе.

будет зависеть от того, расположена ли площадка вертикально, горизонтально или наклонно.

Если внешнее давление составляет $p_в$, а глубина, на которую погружена площадка, h , то давление на площадку в неподвижной жидкости составит

$$p_{ст} = p_в + h\gamma;$$

давление $p_{ст}$ называют статическим или гидростатическим давлением.

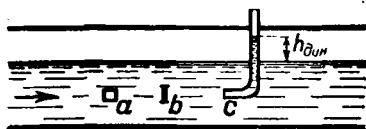
Иное дело, если жидкость движется с некоторой скоростью по каналу или трубопроводу.

В этом случае давление жидкости в каждой точке будет неодинаково по разным направлениям. На площадку a , взятую на стенке канала (фиг. 36), т. е. направленную вдоль движения, жидкость оказывает статическое давление. Если же расположить площадку b на том же уровне перпендикулярно к движению жидкости, то эта площадка под влиянием напора жидкости испытывает добавочное так называемое динамическое

давление, тем большее, чем больше скорость жидкости и ее удельный вес. Динамическое давление можно подсчитать по формуле

$$p_{дин} = \gamma \frac{\omega^2}{2g}. \quad (29)$$

Здесь ω — скорость движения в м/сек; γ — удельный вес в кг/м³; $g = 9,81$ м²/сек² — ускорение силы тяжести; $p_{дин}$ — динамическое давление в кг/м².

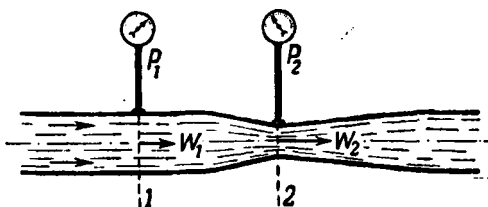


Фиг. 36. Динамический напор.

Наглядно динамическое давление можно показать (фиг. 36) при помощи трубки *c*, нижний конец которой отогнут и расположен против движения. В вертикальной части трубки уровень жидкости поднимается выше уровня жидкости в канале, и высота как раз уравнивает динамическое давление, так что

$$p_{дин} = h_{дин} \cdot \gamma. \quad (29')$$

Такая трубка носит название трубки Пито и служит прибором для измерения скорости движения жидкости в канале; эту скорость легко определить по динамическому давлению, пользуясь формулой (29). Величина $h_{дин}$ называется динамическим напором жидкости.



Фиг. 37. Изменение динамического напора при изменении скорости.

Полное давление на площадку *b* или в отверстии трубки *c* равно сумме статического и динамического давлений:

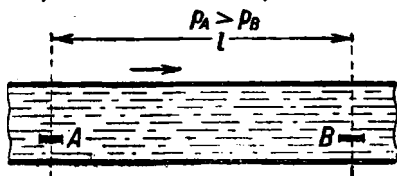
$$p_{полн} = p_{ст} + \frac{\gamma \omega^2}{2g}.$$

Если жидкость движется по трубопроводу, который в разных местах имеет различное сечение (фиг. 37), то скорость в узком сечении больше, чем в широком. Значит и динамическое давление в узком сечении больше, как видно из формулы (29). Опыт показывает, что в том и другом сечении, если они расположены на одинаковом уровне, получается одно и то же полное давление, а следовательно, статическое давление (т. е. давление на стенку трубопровода) в узком сечении меньше, чем в широком. Эта зависимость выражается формулой

$$p_1 + \gamma \frac{w_1^2}{2g} = p_2 + \gamma \frac{w_2^2}{2g},$$

которая носит название уравнения Бернулли по имени открывшего ее знаменитого ученого, жившего с 1700 г. по 1788 г. Значком 1 отмечены здесь давление и скорость в одном сечении, а значком 2 — в другом.

Но если более точно измерить давления при движении жидкости по трубопроводу постоянного сечения (фиг. 38), то можно обнаружить, что статические, а следовательно, и полные давления даже на одном уровне (точка *A* и *B*) будут неодинаковы. Давление в точке *A* (p_A) больше, чем давление в точке *B* (p_B) на величину Δp (читается — дельта пе), называемую падением давления. Происходит это вследствие трения жидкости о стенки и трения между отдельными ее слоями.



Фиг. 38. Падение давления при движении жидкости или газа по трубопроводу.

Падение давления в прямой трубе тем больше, чем длиннее труба и чем больше скорость жидкости. Оно прямо пропорционально динамическому давлению; его подсчитывают по формуле

$$\Delta p = \zeta \frac{l}{d} \frac{\gamma w^2}{2g}. \quad (30)$$

Здесь обозначено: l — длина трубопровода; d — его диаметр; ζ (греческая буква дзета) — коэффициент трения, который изменяется в пределах 0,02 — 0,04 и зависит сильно от шероховатости стенки.

Особенно большое сопротивление движению оказывают всякого рода нарушения прямолинейности трубопровода (колена, тройники) и изменения его сечения (сужения, расширения, задвижки, вентили). Сопротивления в них называются местными сопротивлениями. В справочниках даются указания о том, какая длина прямолинейного пути оказывает такое же падение давления,

какое имеется в том или ином местном сопротивлении. Так подсчитывают длину трубопровода, на которой падение давления соответствует падению давления во всех коленах, загибках и т. д. К этой длине прибавляют фактическую длину трубопровода, и для общей длины по формуле (30) подсчитывают полное падение давления на рассматриваемом участке. Этот метод одинаково применим как для жидкостей, так и для газообразных тел.

Падение давления в узких длинных трубопроводах при большом расходе жидкости или газа может иногда быть очень высоким, например, в паропроводе между котлом и турбиной падение давления достигает иногда нескольких атмосфер (3—10).

13. ЭНЕРГИЯ И ЕЕ ВИДЫ. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ

В повседневной жизни на каждом шагу мы встречаемся с различными проявлениями энергии. Летящий камень, движущийся автомобиль, вращающийся вал — все эти предметы обладают энергией. Всякое движущееся, а следовательно, обладающее энергией тело может совершить работу. Так, движущийся пар, движущаяся вода, ветер могут вращать различные механизмы. Отсюда мы видим, что энергия тела проявляется в способности совершать работу.

Из повседневных же наблюдений мы отмечаем, что энергия бывает различных видов. Так, рассмотренная нами энергия движения тел (движение камня, автомобиля, вала) в определенном направлении есть механическая энергия.

Из предыдущего мы знаем, что все тела состоят из мельчайших невидимых частиц — молекул, о существовании которых мы знаем по различным их проявлениям. Они находятся в непрерывном беспорядочном движении. Это движение молекул есть проявление особого вида энергии — тепловой энергии. Чем интенсивнее происходит движение молекул в теле, тем большей тепловой энергией обладает это тело.

Есть и другие виды энергии: электрическая, проявление которой мы наблюдаем в повседневном быту и производстве; химическая энергия, проявляющаяся во время химических реакций.

Все виды энергии делятся на два крупных класса на энергию кинетическую и энергию потенциальную. Кинетической энергией называют энергию движения. Так, летящий камень, движущаяся молекула, вращающийся шкив, текущая вода — все это проявления

кинетической энергии. С другой стороны, скопившаяся в каком-нибудь высоко расположенном озере вода хотя и не движется, но обладает потенциальной энергией. Она может быть использована, т. е. может быть получена работа, если выпустить воду из озера и заставить ее вращать колесо водяной мельницы. Химическая энергия топлива — это тоже потенциальная энергия. Она может быть использована, если сжечь топливо, т. е. осуществить реакцию соединения углерода топлива с кислородом; при этом выделится тепло. Находящийся в цилиндре с подвижным поршнем пар некоторого давления тоже обладает потенциальной энергией. Она может быть использована, если дать пару расшириться, т. е. предоставить поршню возможность двигаться и совершать работу. Эта же потенциальная энергия может быть использована, если пару дать возможность вытекать через отверстие в среду с меньшим давлением.

Наблюдая различные виды энергии, мы узнаем одно замечательное их свойство, а именно — способность всех видов энергии превращаться один в другой. Действительно, летящий с большой скоростью камень при столкновении со стенкой останавливается; это значит, что механическая энергия камня исчезает, при этом как самый камень, так и стенка, где камень прикоснулся к ней, нагреваются. Падающий молот при ударе о наковальню нагревается сам и нагревает предмет, который он ударяет. Появившаяся тепловая энергия возникает здесь за счет исчезнувшей механической энергии.

Обратный случай — преобразование тепловой энергии в механическую наблюдаем мы, например, при движении автомобиля. За счет тепла, выделяющегося при сгорании бензина в двигателе автомобиля, происходит преобразование тепловой энергии в механическую, которая и проявляется в движении автомобиля.

В быту мы на каждом шагу наблюдаем преобразование электрической энергии в световую (электрическая лампочка) или электрической энергии в тепловую (электрический чайник, утюг). На производстве мы наблюдаем преобразование электрической энергии в механическую. Это преобразование состоит в том, что электромотор, получающий из электрической сети электрическую энергию, приводит в движение станок, движущиеся части которого получают механическую энер-

гию. За счет этой энергии станок совершает полезную работу.

В середине прошлого столетия ряд ученых занимался изучением превращений отдельных видов энергии одного в другой. Точные измерения количеств энергии, исчезающих при таких преобразованиях, показали, что вместо определенного количества исчезнувшей энергии одного вида возникает всегда вполне определенное количество энергии другого вида. Это дало основание установить закон сохранения и превращения энергии, сущность которого состоит в том, что *энергия не создается и не исчезает бесследно, а превращается в другой вид энергии в строго определенном количестве.* Введению этого закона в науку способствовали работы ряда ученых. Одним из первых высказал этот закон М. В. Ломоносов в 1758 г. В окончательной форме он был установлен работами Майера в 1842 г. Этот год и считают годом введения в науку закона сохранения и превращения энергии.

14. ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ. ТЕМПЕРАТУРА

В природе имеются громадные запасы энергии. Наиболее значительными природными энергетическими ресурсами (источниками энергии) являются залежи топлива в виде различных углей, нефти, сланцев, торфа и т. д. В качестве источников энергии используют также энергию движущейся воды (так называемый белый уголь) и ветра. Несмотря на то, что в последние годы использование энергии воды начинает приобретать все большее и большее значение и строят много гидравлических станций, все же использование топлива в качестве источника энергии стоит на первом месте.

Рассмотрим процесс возникновения тепловой энергии из топлива. Как известно, в процессе горения топлива, т. е. соединения его горючих составных частей с кислородом, выделяется тепло. Получающиеся при горении газы образуют смесь, которая называется продуктами сгорания. Таким образом можно сказать, что в результате процесса горения химическая энергия топлива и кислорода воздуха, участвовавшего в горении, превратилась в тепловую энергию продуктов сгорания.

Горячие газы используют различным образом. В паровых котлах их используют для получения водяного

пара из воды, в двигателях — непосредственно для выработки механической энергии, в сушилках — для выпаривания влаги.

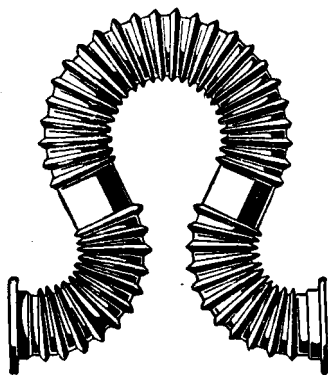
Прикасаясь рукой, мы чувствуем, что тепловое состояние тел неодинаково — одни из них теплее, другие холоднее. В этом случае говорят, что температура этих тел различна. Таким образом температурой оценивают степень нагретости тел.

Для измерения температуры тел применяют приборы, называемые термометрами. Устройство термометров бывает самое разнообразное. В этой книге мы рассмотрим ртутные термометры, употребляемые для измерения сравнительно невысоких температур, и термоэлектрические пирометры — для измерения повышенных температур.

Наблюдения над телами при их нагревании и охлаждении показывают, что почти все тела при нагревании расширяются, а при охлаждении сжимаются. У твердых тел эта способность меньше, чем у жидких и газообразных.

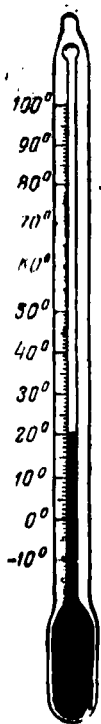
Способность тел к расширению от нагревания и сжатию от охлаждения учитывается в технике при устройстве сооружений.

Так, при прокладке железнодорожных путей оставляют между отдельными рельсами небольшие промежутки, и в жаркую погоду, когда рельс удлиняется, эти промежутки уменьшаются; иначе рельсы уперлись бы концами и выпучились бы. Мост устанавливают таким образом, что один конец его жестко прикрепляют к своей опоре, а другой покоится свободно на катках, и в жаркие дни при удлинении мост на катках несколько передвигается. При монтаже паропроводов в них включают изогнутые гибкие трубы, так называемые компенсаторы (фиг. 39), которые принимают на себя удлинение или укорочение паропроводов, происходящее при изменении температуры металла.

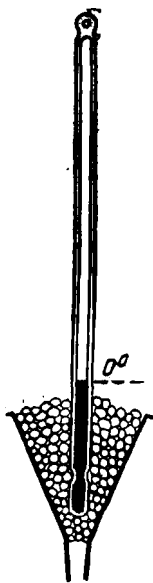


Фиг. 39. Компенсатор.

На свойстве тел расширяться при нагревании и сжиматься при охлаждении основано устройство жидкостных термометров, т. е. таких, показания которых основаны на изменении объема какой-нибудь жидкости. Опишем устройство ртутного термометра (фиг. 40). В узкую трубку, имеющую расширение внизу, наливают ртуть и помещают эту трубку в тающий лед (фиг. 41). Уровень ртути отмечают цифрой 0° (нуль градусов). Затем эту же трубку помещают (фиг. 42) в пары кипящей воды



Фиг. 40. Ртутный термометр.



Фиг. 41. Определение нулевой точки на термометре.



Фиг. 42. Определение точки кипения (100° C) на термометре.

(при нормальном атмосферном давлении. Ртуть расширяется, и ее уровень занимает в трубке новое более высокое положение. Новый уровень отмечают числом 100° (сто градусов). После этого расстояние между 0° и 100° делят на 100 частей, каждая из которых составляет 1° . Так получают стоградусную шкалу температур, которая иначе называется шкалой Цельсия. Рядом с числом, измеряющим темпера-

туру тела, ставят букву С (стоградусная). Если теперь построенный нами термометр погрузить в жидкость, температуру которой желают измерить, и ртуть в трубке поднимется до деления 50, то это будет означать, что температура этой жидкости 50°C (пятьдесят градусов стоградусной шкалы). Таким образом, в стоградусной шкале отсчет температуры производится от точки таянья льда. Существуют и другие шкалы (Реомюра, Фаренгейта), но их в СССР не применяют.

Деления на шкале термометра можно продолжить выше 100°C и ниже 0°C . При обозначении температуры ниже нуля ставится знак — (минус).

Ртутные термометры можно применять в пределах между температурами -39°C и примерно 550°C ; при более низких температурах ртуть замерзает, а при более высоких температурах в стекле получают слишком большие напряжения. Для измерения более низких температур применяются другие жидкости — спирт, толуол, замерзающие при более низких температурах (спирт при -115°C , толуол при -95°C).

Если понижать температуру газа, то молекулы его будут двигаться все с меньшей скоростью. Подсчетами установлено, что при понижении температуры на 273° ниже 0°C должно прекратиться всякое движение молекул. Это недостижимое на практике состояние можно принять за новое начало отсчета температур и придать ему значение нуль. В отличие от 0° в стоградусной шкале это состояние называется абсолютным нулем, а вся шкала абсолютной шкалой температур. Очевидно, что точка таянья льда по абсолютной шкале будет иметь температуру в 273° и вообще всякое тело с температурой в стоградусной шкале t° в абсолютной шкале будет иметь температуру на 273° больше, и отрицательных температур в этой шкале не будет. Из описания обеих шкал видно, что стоградусная шкала и абсолютная отличаются только началом отсчета температур.

Если обозначить буквой T температуру в абсолютной шкале, а буквой t — температуру в стоградусной шкале, то между ними будут существовать такие соотношения:

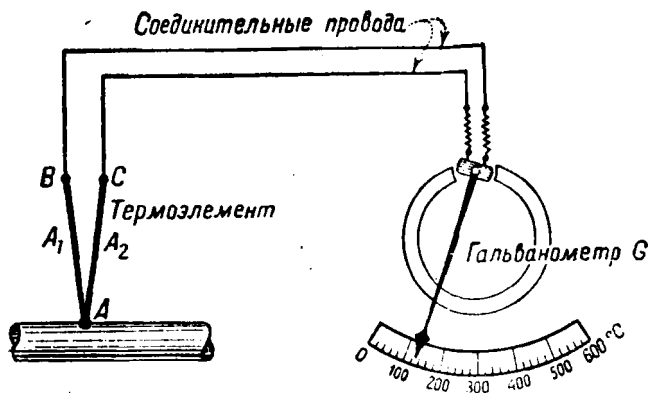
$$t = T - 273 \quad (31)$$

$$T = t + 273 \quad (31')$$

Температуры, отсчитанные от абсолютного нуля, обозначают $^{\circ}\text{K}$. Таким образом, если написано: $T = 500^{\circ}\text{K}$, это значит, что тело имеет температуру 500° по абсолютной шкале температур; в стоградусной шкале ей будет соответствовать по формуле (31') температура

$$t = T - 273 = 500 - 273 = 227^{\circ}\text{C}.$$

Для измерения высоких температур применяют другие приборы.



Фиг. 43. Термоэлектрический пирометр (термопара).

Среди них широко распространен так называемый термоэлектрический пирометр (термопара), позволяющий измерять высокие температуры и относить показания измеренных температур на далекие расстояния. Устроен он так (фиг. 43). Берут две проволоки A_1 и A_2 из разных металлов и спаивают два их конца (A); два других конца C и B при помощи проволок присоединяют к электрическому прибору G , который называется гальванометром. Если теперь конец A присоединить к телу с высокой температурой (в нашем случае — труба: к ней конец A припаян), которую хотят измерить, и принять меры к тому, чтобы температура в точках B и C не менялась, то в наших проволоках потечет электрический ток, который будет отклонять стрелку прибора G , и тем больше, чем выше температура в точке A . На приборе часто имеется шкала, по ко-

торой можно прямо прочесть температуру, измеряемую прибором.

Не каждая пара металлов годна для изложенных здесь целей измерения температур. Чаще других применяют такие пары: медь — константан, железо — константан (константан — это сплав, состоящий из 60% меди и 40% никеля); применяют и другие комбинации некоторых металлов.

После того как мы научились измерять степень нагретости тел, можно указать, как вычисляется изменение длины какого-либо тела при нагревании. Для этого нужно знать определяемый опытным путем коэффициент линейного расширения. Он обозначается буквой α (греческая буква «альфа»). Этот коэффициент показывает, на какую долю увеличивается длина тела при нагревании его на 1°C . Например, если для стали $\alpha = 0,000011$, то это значит, что при нагревании на 1°C брусок стали длиной в 1 м увеличится на 11 миллионных метра, или на 11 тысячных миллиметра. Отсюда происходит известное практическое правило: при нагреве на 100° каждый метр стальной трубы удлиняется на 1,1 мм, т. е. немного более, чем на 1 мм.

Если известна длина тела при какой-либо температуре t_1 и нужно узнать, на сколько увеличится эта длина при нагревании тела до температуры t_2 , то можно применить с достаточной для технических расчетов точностью следующую формулу:

$$\Delta l = \alpha l_1 (t_2 - t_1). \quad (32)$$

Здесь две буквы Δl обозначают увеличение длины тела при нагревании его от t_1 до t_2 (Δ — греческая буква дельта); l_1 — длина тела при температуре t_1 .

Отсюда длина тела при температуре t_2 , назовем ее l_t , определится по следующей формуле:

$$l_t = l_1 + \Delta l. \quad (32')$$

Пример 8. Измерением найдено, что длина стального трубопровода при температуре 20°C составляет 50 м. Вычислить, на сколько миллиметров увеличится длина трубопровода, если по трубопроводу пройдет пар и температура трубы станет 320°C . По формуле (32):

$$\Delta l = \alpha l_1 (t_2 - t_1) = 0,000011 \cdot 50 (320 - 20) = 0,165 \text{ м,}$$

$$\Delta l = 165 \text{ мм.}$$

15. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ. ПОДСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛА ПРИ НАГРЕВАНИИ И ОХЛАЖДЕНИИ. ПОДСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Для подсчета количества тепла необходимо иметь соответствующую единицу измерения. Условились единицей измерения тепла считать такое количество тепла, которое требуется для того, чтобы 1 кг воды нагреть на 1°C . Это количество тепла называется большой калорией или килокалорией (обозначается *ккал*).

Разные тела требуют и разных количеств тепла для поднятия температуры 1 кг их на 1°C . Так, для нагревания 1 кг стали на 1°C требуется всего 0,11 *ккал*, т. е. почти в 10 раз меньше, чем для нагревания 1 кг воды на 1°C .

В этом случае говорят, что теплоемкость стали почти в 10 раз меньше теплоемкости воды. Таким образом можно сказать, что *теплоемкостью тела называют количество тепла, требующееся для того, чтобы 1 кг его нагреть на 1°C* . Значения теплоемкостей тел приводятся в справочниках (см. табл. 3 и 4 в конце книги). Обозначают теплоемкость буквой *c*.

Для воды $c = 1$ *ккал/кг град*,
для стали $c = 0,11$ *ккал/кг град*.

Справа от значения теплоемкости здесь стоит единица измерения теплоемкости *ккал/кг град* (килокалория на килограмм и на градус).

Если известно значение теплоемкости тела, то нетрудно вычислить и количество тепла, которое требуется для нагревания любого весового количества его на любое число градусов. Если обозначить это количество тепла буквой *Q*, а вес тела, который подвергается нагреванию, буквой *G*, то для того, чтобы это тело нагреть от t_1 до t_2 нужно подвести к нему тепла

$$Q = Gc(t_2 - t_1) \text{ ккал.} \quad (33)$$

С другой стороны, чтобы охладить тело от температуры $t_1^{\circ}\text{C}$ до $t_2^{\circ}\text{C}$, от него нужно отнять

$$Q = Gc(t_1 - t_2) \text{ ккал} \quad (33')$$

Ранее было указано, что для измерения мощности приняты единицы измерения — киловатт и лошадиная

сила. Отсюда за единицу измерения электрической энергии можно принять такое ее количество, которое вырабатывает источник энергии (или берет на себя потребитель) мощностью в 1 *квт* в течение 1 часа. Такое количество энергии называется *киловаттчас* (обозначается *квтч*). Очевидно, что такое же количество энергии может выработать источник энергии в 2 *квт* в течение получаса или 5 *квт* в течение одной пятой часа.

Таким же образом устанавливается и другая единица электрической энергии — *силочас* (обозначается *л. с. ч.*). Это такое количество энергии, которое вырабатывает источник энергии мощностью в 1 лошадиную силу (*л. с.*) в течение 1 часа.

Можно установить такую формулу подсчета количества энергии: если мощность N , а время t , то количество энергии \mathcal{E} составит

$$\mathcal{E} = Nt. \quad (34)$$

Обратно, мощность N источника (или потребителя) энергии можно вычислить по формуле

$$N = \frac{\mathcal{E}}{t}. \quad (35)$$

Согласно закону сохранения энергии преобразования энергии происходят в строго определенных количествах, следовательно, между приведенными в этом параграфе единицами измерения тепловой и электрической энергии должна существовать определенная зависимость. Оказывается, что

$$\begin{aligned} 1 \text{ квтч} &= 860 \text{ ккал}, \\ 1 \text{ л. с. ч.} &= 632 \text{ ккал}, \\ 1 \text{ квтч} &= 1,36 \text{ л. с. ч.} \end{aligned}$$

Механическую энергию измеряют той же единицей измерения, что и работу, т. е. килограммом (*кгм*). Из опытов найдено, что

$$1 \text{ ккал} = 427 \text{ кгм},$$

Это число называется механическим эквивалентом тепла.

Обратно,

$$1 \text{ кгм} = \frac{1}{427} \text{ ккал}.$$

Это число называется термическим эквивалентом работы.

Пример 9. Мотор у строгального станка мощностью в 2 *квт* работал в течение 3 час. Вычислить, сколько тепла при этом выдилось.

По формуле (34)

$$\mathcal{E} = Nt = 2 \cdot 3 = 6 \text{ квтч.},$$

что составляет количество тепла

$$Q = 6 \cdot 860 = 5160 \text{ ккал.}$$

Это тепло в большей своей части пошло на нагревание резца и обрабатываемой детали; остальная часть тепла воспринята окружающей средой.

Пример 10. Электрическим нагревательным прибором нагрели 4,3 кг воды от $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до $t_2 = 70^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Определить мощность нагревательного прибора.

Количество тепла, подведенного к воде, по формуле (33) составляет

$$Q = Gc(t_2 - t_1) = 4,3 \cdot 1(70 - 20) = 215 \text{ ккал.},$$

что соответствует количеству электрической энергии

$$\mathcal{E} = \frac{215}{860} = 0,25 \text{ квтч.}$$

Отсюда мощность нагревательного прибора (учитывая, что 30 мин. = 0,5 час.) по формуле (35)

$$N = \frac{0,25}{0,5} = 0,5 \text{ квт.}$$

16. ПЕРЕХОД ТЕЛ ИЗ ОДНОГО СОСТОЯНИЯ В ДРУГОЕ

Известно, что нагреванием можно многие твердые тела превратить в жидкие, а жидкие в газообразные.

Переход твердого тела в жидкое называется *плавлением* (или *таянием*). Обратный переход жидкого тела в твердое называется *отвердеванием*. Температура, при которой происходит плавление, неодинакова для различных тел, но вполне определенная для одного и того же тела. Отвердевание тел происходит при тех же температурах, что и плавление.

Для того чтобы твердое тело расплавить, его нужно сначала нагреть до температуры плавления. Самый процесс плавления требует также затраты некоторого вполне определенного количества тепла. Это количество тепла называют *теплотой плавления* и измеряют в *ккал/кг*. Во время всего процесса плавления температура плавящегося тела остается постоянной.

Составим формулу для подсчета количества тепла, которое требуется для того, чтобы расплавить 1 кг твердого тела. Пусть температура его t_1 , а плавится оно при

температуре t_n ; если теплоемкость его c , то количество тепла, требующееся для того, чтобы нагреть это тело до температуры плавления, будет $c(t_n - t_1)$; если теплота плавления этого тела равна m (берется из табл. 5 в конце книги), то общее количество тепла, требующееся для плавления 1 кг тела, составит

$$Q = c(t_n - t_1) + m. \quad (36)$$

Пример 11. Свинец плавится при температуре 327°C , а теплота плавления его 5 ккал/кг . Теплоемкость твердого свинца $0,03 \text{ ккал/кг}$. Вычислить количество тепла, которое потребуется, чтобы расплавить $0,5 \text{ кг}$ свинца, если температура свинца 27°C .

По формуле (35) на 1 кг потребуется затратить:

$$Q = c(t_n - t_1) + m; \quad Q = 0,03(327 - 27) + 5 = 14 \text{ ккал/кг.}$$

Значит для того, чтобы расплавить $0,5 \text{ кг}$, потребуется

$$Q = 14 \cdot 0,5 = 7 \text{ ккал.}$$

Процесс перехода в газообразное состояние (этот процесс называется парообразованием) также происходит для одного и того же тела при вполне определенной температуре, но разной для разных тел, причем в этом случае температура перехода в газообразное состояние зависит в сильной степени и от того, под каким давлением находится жидкость. Так, при давлении в 1 ат вода переходит в пар при температуре около 100°C , а при давлении в 10 ат вода кипит только при температуре в 179°C .

Таким образом, для того чтобы превратить воду в пар, необходимо прежде всего взятое количество воды нагреть до температуры кипения. Далее, для того чтобы превратить кипящую воду в пар, нужно продолжать подводить тепло. Если при этом давление будет оставаться постоянным, то подведение тепла не вызовет повышения температуры, а все тепло будет расходоваться на превращение воды в пар. Количество тепла, которое тратится на превращение 1 кг воды в пар, называют скрытой теплотой парообразования и обозначают обыкновенно буквой r . Оно тоже зависит от того, при каком давлении происходит процесс парообразования. Так, при давлении в 1 ат для воды $r = 539 \text{ ккал/кг}$.

Нетрудно теперь подсчитать общее количество тепла, которое требуется затратить, чтобы 1 кг воды при тем-

пературе t превратить в пар. Если при заданном давлении температура кипения t_s , то это количество можно найти по формуле

$$Q = c(t_s - t) + r, \quad (37)$$

где c — теплоемкость воды; для не очень высоких давлений можно принять $c = 1$ ккал/кг град.

В табл. 6 в конце книги приведены значения температур кипения и значения теплоты парообразования для некоторых тел.

Пример 12. Определить количество тепла, необходимое для того, чтобы воду при $t = 80^\circ\text{C}$ и давлении $p = 20$ ат превратить в пар.

Из табл. 7 (в конце книги) находим, что при $p = 20$ ат, $t_s = 211^\circ\text{C}$, $r = 452$ ккал/кг. Отсюда по формуле (37) находим

$$Q = c(t_s - t) + r = 1(211 - 80) + 452,$$

$$Q = 131 + 452 = 583 \text{ ккал/кг.}$$

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

8. Какое различие существует между твердыми, жидкими и газообразными телами?

9. Что такое химическая реакция; какие типы реакций вы знаете?

10. Что такое атомный и молекулярный вес?

11. В чем заключается разница между полным и неполным горением углерода.

12. Приведите примеры равномерного и неравномерного движения.

13. Объясните смысл трех законов Ньютона.

14. В чем заключается содержание закона Паскаля?

15. Назовите известные вам виды энергии.

16. В чем заключается содержание закона сохранения и превращения энергии? Приведите примеры преобразования энергии.

17. Чем отличается температура, измеренная по стоградусной шкале от абсолютной температуры тела?

18. Что такое теплоемкость? Напишите формулу для вычисления количества тепла, идущего на нагревание тела?

19. Как подсчитать количество тепла, требующееся на превращение твердого тела в жидкое и жидкого в газообразное?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПРОРАБОТКИ

15. Расстояние от Москвы до Ленинграда 650 км. Поезд проходит это расстояние в 10 час. Чему равна средняя скорость движения поезда?

Отв.: 65 км/час.

16. Стальная мостовая ферма при 0°C имеет длину 25 м. На сколько увеличится длина фермы в летний день, если температура фермы станет равной 45°C ?

Отв.: 0,0124 м = 12,4 мм.

17. Антенна из медной проволоки при 0°C имеет длину 40 м. Какова будет ее длина при температуре в 35°C ?

18. Сколько тепла надо затратить, чтобы вскипятить 5 л воды? Начальная температура воды 10°C .

Отв.: 450 ккал.

19. Сколько тепла нужно затратить, чтобы при атмосферном давлении превратить в пар 5 кг льда, температура которого -10°C ?

$$Q = 5 \cdot 0,5 \cdot 10 + 5 \cdot 80 + 5 \cdot 1 \cdot 100 + 5 \cdot 539 = 3620 \text{ ккал.}$$

20. Сколько килограмметров работы надо произвести, чтобы полученным за счет этой работы теплом нагреть при 1 ат до кипения 2 кг воды от начальной температуры в 20°C ?

Отв.: 68300 кгм.

21. Тягач тянет груз, развивая силу в 300 кг. Определить мощность тягача, если за 1,5 часа тягач прошел расстояние в 12 км?

Отв.: 8,9 л. с.

22. Электромотор потребляет 150 квтч энергии за 1,5 часа. Вычислить его мощность.

Отв.: 100 квт.

23. Мотор мощностью в 3 л. с. работает 5 час. Вычислить в киловаттчасах расход энергии.

Отв.: 11 квтч.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ГАЗЫ И ПАРЫ КАК РАБОЧИЕ ТЕЛА

17. СВОЙСТВА ГАЗООБРАЗНЫХ ТЕЛ

Мы уже ранее отметили, что газообразные тела, так же как и жидкие, не имеют своей формы; кроме того, они не имеют своего определенного объема, а обладают свойством равномерно заполнять весь предоставленный им объем. Молекулы, составляющие газ, находятся в непрерывном беспорядочном движении. Силы сцепления между молекулами газа чрезвычайно малы, поэтому газ стремится занять как можно больший объем.

В настоящее время наука добилась того, что всякий газ может быть превращен в жидкое состояние. Переход тел из одного состояния в другое, газообразного в жидкое и жидкого в газообразное, для разных тел происходит при разных условиях. Мы уже знаем, что такой переход происходит у каждого тела при вполне определенной температуре для одного и того же давления. Так, вода при 1 ат превращается в газообразное состояние (пар) приблизительно при 100°C , но если давление изменить, то такой переход произойдет при другой температуре.

Рассмотрим переход тел из газообразного в жидкое состояние при 1 ат, т. е. приблизительно при том давлении, которое имеет окружающий нас воздух на уровне моря. Как было уже сказано, вода превращается в газообразное состояние в этом случае при 100°C ; обратно, если взять водяной пар при 100°C , то, отнимая у него тепло, этот пар можно превратить в воду. Если взять другую жидкость (например, эфир), то окажется, что она кипит при 35°C , если находится под давлением в 1 ат; с другой стороны, газообразный эфир, находящийся при 35°C , можно путем отнятия теплоты парообразования превратить в жидкость. Чтобы превратить в жидкость газ аммиак, применяемый в холодильных установках, приходится, если он находится под атмосферным давлением, сначала охладить его до температуры $-33,5^{\circ}\text{C}$; азот, составляющий большую часть воздуха, до -196°C , кислород до -183°C , а гелий — газ, служащий для наполнения оболочек дирижаблей, даже до -269°C . Из приведенных данных мы видим, что одни газы (водяной пар, эфир) при атмосферном давлении легко переходят в жидкое состояние, а другие (кислород, азот, гелий) — с трудом, и для этого требуются особые условия.

В технике принято те газообразные тела, которые при атмосферном давлении легко превращаются в жидкость, называть парами, а трудно превращаемые — газами.

У газов, поскольку они очень далеки от жидкого состояния, силы сцепления между молекулами настолько малы, что с этими силами можно не считаться. Это допущение значительно облегчает изучение газов (называемых в этом случае идеальными газами), и законы, которым они подчиняются, сравнительно легко обнаруживаются.

Иное дело с парами. Силы сцепления у них достаточно велики, и не считаться с ними нельзя. Свойства их отличаются от свойств идеальных газов.

В теплотехнике приходится иметь дело с разнообразными газообразными телами. Как уже указывалось, тела в газообразном состоянии очень удобно применять для передачи тепла на расстояние для различных технологических процессов — сушки, варки, нагревания, и в особенности они удобны для осуществления процесса

превращения тепловой энергии в механическую. Вот почему нам следует более подробно познакомиться со свойствами газообразных тел.

Газообразные тела, применяемые в одном из перечисленных выше процессов, называют рабочими телами.

В теплотехнике нам придется иметь дело прежде всего с газами, входящими в продукты сгорания топлив, — это кислород, азот, углекислый газ, окись углерода. Большое применение в теплоэнергетике имеет воздух; прежде всего он находит применение как тело, участвующее в процессе горения топлив, и кроме того как рабочее тело в компрессорах.

Очень большое распространение имеет в теплоэнергетике водяной пар. Здесь он встречается прежде всего как составная часть продуктов сгорания. Водяной пар в этом случае находится при очень малом давлении и при высокой температуре, т. е. далеко от жидкого состояния, и поэтому обладает свойствами газов.

Водяной пар входит как составная часть и в воздух. Здесь также он находится в таком состоянии, что по свойствам его можно причислить к газам.

И, наконец, водяной пар имеет широкое применение как рабочее тело в паровых машинах, паровых турбинах и для отопительных целей. В этом случае водяной пар, как находящийся недалеко от жидкого состояния, не обладает свойствами идеальных газов, и изучение его в этих состояниях производится отдельно.

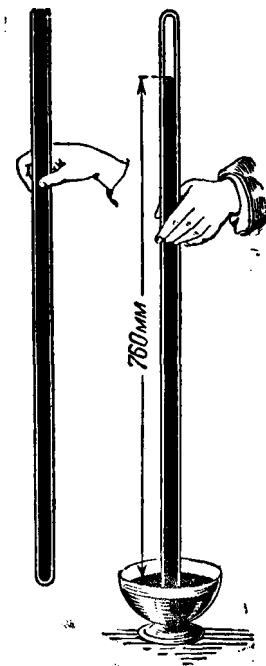
18. АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Воздух, окружающий землю, имеет вес и поэтому он оказывает равномерное давление на все тела. Давление окружающего землю воздуха, или, как говорят, атмосферное давление, зависит от погоды и все время меняется, однако пределы изменения невелики.

Если наполнить ртутью доверху длинную трубку с запаянным концом и опустить ее открытым концом в чашку с ртутью, то часть ртути выльется в чашку и высота оставшегося столба ртути в трубке над уровнем в чашке будет равна приблизительно 760 мм (фиг. 44). Это значит, что атмосферный воздух, оказывающий давление на свободную поверхность ртути в чашке, своим давлением уравнивает давление ртутного столба

высотой около 760 мм. При этом над ртутью в трубке будет пустота, как ее называют — торичеллиева пустота, по имени ученого Торичелли, открывшего атмосферное давление.

Так как атмосферное давление меняется в зависимости от погоды, то нормальным атмосферным давлением условились считать такое, которое уравнивает давление столба ртути высотой 760 мм при температуре ртути в 0°C . Указание на температуру ртути необходимо потому, что ее удельный вес зависит от температуры, и поэтому столб ртути высотой 760 мм при другой температуре имеет другой вес и оказывает несколько иное давление на свое основание.



Фиг. 44. Определение барометрического давления.

Если взвесить вертикальный столб ртути высотой в 760 мм при температуре ртути в 0°C в трубке с площадью основания 1 см^2 , то окажется, что вес его равен 1,033 кг; это значит, что нормальное давление равно $1,033\text{ кг/см}^2$, а так как давление 1 кг/см^2 называется технической атмосферой, то получается, что нормальное атмосферное давление равно 1,033 технической атмосферы. Нетрудно теперь сосчитать, что 1 техническая атмосфера, или, как ее просто называют, 1 ат, выдерживает давление столба ртути высотой в 735,6 мм рт. ст. при температуре ртути 0°C .

Если бы вместо ртути была взята вода, которая в 13,6 раза легче ртути, то оказалось бы, что нормаль-

ное атмосферное давление равно давлению водяного столба в 10,33 м, а техническая атмосфера равна давлению водяного столба в 10 м.

Давление воздуха, окружающего землю, измеряют специальными приборами—барометрами. Простейший из них изображен на фиг. 45, по принципу действия он ничем не отличается от показанного на фиг. 44. Атмосферное давление называют также барометрическим.

19. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА

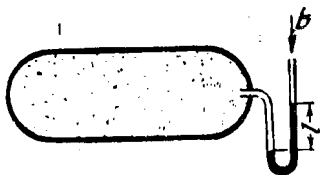
Газ, заключенный в стеклянный сосуд, оказывает на стенки этого сосуда равномерное давление. Это давление есть результат ударов молекул о стенки при столкновениях с ними.

Состояние газа характеризуется рядом величин. Эти величины носят название параметров состояния. Давление газа есть одна из величин, характеризующих его состояние, т. е. один из параметров состояния газа.

Пусть в сосуде (фиг. 46) имеется газ. Вставим в стенку сосуда один конец изогнутой трубки с жидкостью, у которой другой конец открыт. При этом окажется, что слева на жидкость в трубке будет давить газ, а справа атмосферный воздух. Если жидкость расположится так, как указано на чертеже, т. е. в правом колене ее высота окажется больше, чем в левом, то это будет означать, что давление газа в сосуде выше, чем атмосферное давление. Разность уровней в обоих коленях трубки показывает, что давление газа в сосуде больше, чем атмосферное, на величину давления столба жидкости высотой l . Иначе говоря, давление, измеряемое высотой столба жидкости l , представляет собой избыток давления газа в сосуде над давлени-



Фиг. 45. Ртутный барометр.



Фиг. 46. Измерение избыточного давления газа в сосуде.

нием атмосферы, поэтому это давление называют избыточным давлением. Если теперь к избыточному

давлению, которое будем обозначать $p_{изб}$, прибавить барометрическое давление, которое обозначим буквой B , то получим полное давление газа в сосуде. Оно называется абсолютным давлением и обозначается $p_{абс}$. Таким образом можно написать

$$p_{абс} = p_{изб} + B. \quad (38)$$

Прибор, измеряющий избыточное давление, называется манометром. Поэтому избыточное давление называют часто манометрическим.

Обычно в паровых котлах $p_{изб}$ значительно больше, чем B ; поэтому барометрическое давление в этих случаях точно не измеряют, а к измеренному избыточному давлению просто прибавляют 1 ат.

Так, например, если манометр показывает 10 ат, то абсолютное давление будет равно 11 ат.

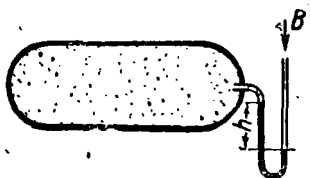
Манометр, измеряющий давление на фиг. 46, называется жидкостным. Он служит для измерения небольших давлений.

Может, однако, случиться, что при присоединении жидкостного манометра к сосуду с газом жидкость расположится так, как показано на фиг. 47, т. е. в левом колене жидкость будет стоять выше, чем в правом. Это будет означать, что барометрическое давление, оказывающее давление на жидкость, в правом колене трубки больше, чем абсолютное давление газа в сосуде; давление газа вместе с давлением столба жидкости высотой h уравнивает барометрическое давление. Иначе говоря, высота столба жидкости h измеряет то давление, которого не хватает абсолютному давлению газа в сосуде, чтобы стать равным барометрическому. Это недостающее до барометрического давление называют вакуум или разрежение. Если обозначить вакуум буквой h , то на основании сказанного ранее можно написать:

$$p_{абс} + h = B.$$

Иначе можно то же написать так:

$$p_{абс} = B - h. \quad (39)$$



Фиг. 47. Измерение разрежения газа в сосуде.

Прибор, измеряющий вакуум, называется вакуумметром. В котлах такими приборами измеряют тягу, и поэтому там они называются тягомерами.

Итак, для того чтобы определить абсолютное давление газа в сосуде в том случае, если оно выше атмосферного, нужно к показанию манометра прибавить показание барометра. Если же оно ниже атмосферного, то из показания барометра нужно вычесть показание вакуумметра.

Необходимо при этом помнить, что

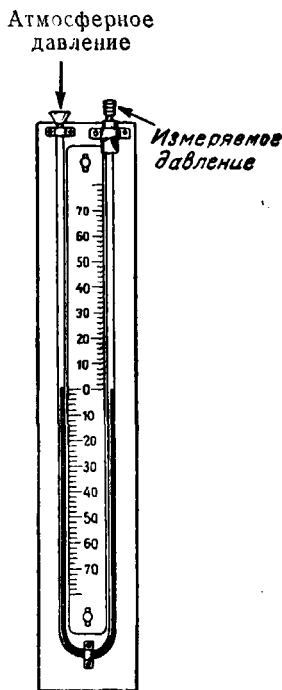
$$1 \text{ ат} = 735,6 \text{ мм рт. ст.},$$

$$1 \text{ ат} = 10\,000 \text{ мм вод. ст.}$$

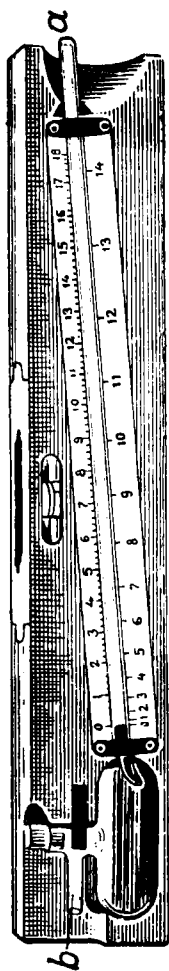
Таким образом если какое-либо давление выражено высотой столба жидкости, то для того чтобы вычислить, скольким атмосферам или какой доле атмосферы оно равно, надо показание в мм рт. ст. разделить на 735,6, а показание в мм вод. ст. — на 10 000.

Как было уже сказано, для измерения небольших избыточных давлений и для измерения вакуума применяют жидкостные манометры (вакуумметры). Такой манометр (фиг. 48) представляет собой U-образную открытую с обеих сторон трубку, наполненную жидкостью (вода, ртуть); размер трубки иногда составляет около 0,8—1 м; ее укрепляют на доске, к которой прикрепляют шкалу для измерений. Жидкость обычно наливают так, чтобы она устанавливалась против деления 0. На фиг. 46 и 47 показано присоединение таких приборов к сосудам, в которых производится измерение давления.

Для измерения малых вакуумов с целью получения большей точности при измерениях одно из колен стеклянной трубки делают наклонным. Так большей частью



Фиг. 48. Жидкостный манометр.



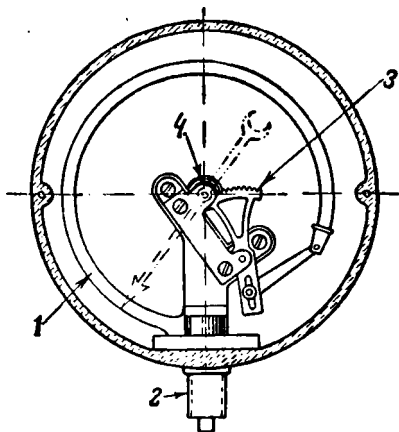
фиг. 49. Тягомер с наклонной трубкой.

делают при изготовлении тягомеров служащих для измерения разрежения в топках и дымоходах паровых котлов. Такие тягомеры (фиг. 49) заполняют спиртом, который подкрашивают для лучшей видимости. Штуцер *a* присоединяют к измеряемому агрегату; штуцер *b* открыт. Шкала, помещенная рядом с наклонной трубкой, большей частью построена так, что деления дают показания разрежения в мм вод. ст.

Если штуцер *a* присоединить к месту, где давление газа меньше (разрежение в этом месте больше), а штуцер *b* — к месту с большим давлением (разрежение в этом месте меньше), то прибор покажет разность давлений (или, что то же, разность разрежений). В этом случае прибор называют дифференциальным тягомером (дифференциальный значит разностный). Для правильной установки прибор снабжен уровнем, который вмонтирован в колодку, к которой прикреплен тягомер.

Для измерения больших избыточных давлений служат пружинные манометры. Наибольшее распространение имеет манометр Бурдона (фиг. 50). Он состоит из полый изогнутой трубки *1*, играющей роль пружины. Эта трубка с одной стороны открыта и через ниппель *2* корпуса манометра сообщается своей полостью с пространством, давление в котором измеряют. Другой конец трубки-пружины запаян. Открытый конец зажат, а закрытый свободен и связан шарнирами с зубчатой передачей, состоящей из сектора *3* и невидимой на рисунке шестеренки; последняя плотно сидит на оси *4* стрелки. При присоединении манометра к котлу или трубопроводу, давление в котором измеряют, на полую трубку будет действовать разность между давлением в котле и атмосферным, т. е. она будет

находиться под действием избыточного давления; это давление будет стремиться выпрямить пружину, и свободный конец ее переместится: при этом придет в движение сектор 3, а вместе с ним шестеренка и стрелка манометра (перемещение будет тем больше, чем выше измеряемое давление). По нанесенной на манометре шкале судят о величине измеряемого давления.



Фиг. 50. Манометр Бурдона.

Пример 13. Разрежение пара в конденсаторе паровой машины равно 700 мм рт. ст. Вычислить абсолютное давление пара в конденсаторе и выразить его в ат, если показание барометра равно 780 мм рт. ст.

По формуле (39) находим, что абсолютное давление в конденсаторе составляет

$$p_{абс} = B - h = 780 - 700 = 80 \text{ мм рт. ст.}$$

В атмосферах это составит

$$\frac{80}{735,6} = 0,109 \text{ ат.}$$

Пример 14. Тягомер у дымососа парового котла показывает разрежение $h = 100$ мм вод. ст. Барометрическое давление составляет 720 мм рт. ст. Определить абсолютное давление газов перед дымососом в атмосферах.

Выразим барометрическое давление и разрежение газов в ат

$$B = \frac{720}{735,6} = 0,98 \text{ ат,}$$

$$h = \frac{100}{10\,000} = 0,01 \text{ ат.}$$

Отсюда абсолютное давление газов по формуле (39) составит

$$p_{абс} = B - h = 0,98 - 0,01 = 0,97 \text{ ат.}$$

Абсолютное давление, измеренное в *ат*, иногда обозначают *ата*; таким образом, если, например, написано

$$p = 10 \text{ ата},$$

это значит, что абсолютное давление равно 10 *ат*. Избыточное давление иногда обозначают *ати*; поэтому если написано

$$p = 4 \text{ ати},$$

то это значит, что избыточное давление равно 4 *ат*.

20. ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗА

Уже было указано ранее, что газообразное тело очень удобно использовать как рабочее тело для того, чтобы тепловую энергию превращать в механическую. Наиболее простой способ такого преобразования заключается в следующем. Пусть в цилиндре с подвижным поршнем находится газ; движение поршня сдерживается положенным на него грузом. Начнем нагревать газ; от нагревания он расширится и поднимет груз. Таким образом при своем расширении газ совершит работу подъема груза. Энергия перемещения груза — это механическая энергия: она получила за счет тепловой энергии, которую мы потратили, чтобы нагреть газ.

При нагревании газообразные тела дают наибольшее увеличение объема, поэтому они и являются самыми удобными рабочими телами в процессах преобразования энергии.

В предыдущем параграфе было сказано, что давление — это параметр состояния газа. К числу параметров состояния относятся также температура газа и удельный объем.

Если газ последовательно меняет какие-либо свои параметры, то говорят, что происходит процесс изменения состояния газа.

Для изучения процессов изменения состояния бывает очень важно знать, как влияет изменение одного какого-либо параметра на изменение другого параметра,

например, как изменяется давление газа при изменении его удельного объема или наоборот.

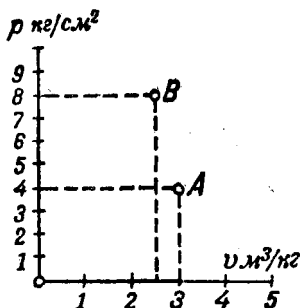
Для этого часто прибегают к графическому приему, смысл которого описан нами в § 4. Для данного случая, т. е. для изображения зависимости между изменением давления и удельного объема, используют так называемую $p\nu$ -диаграмму. Так ее называют потому, что в ней по оси абсцисс откладывают значение удельного объема ν , а по оси ординат — значение давления газа p . Покажем, как при помощи такой диаграммы изображается состояние газа и процесс изменения состояния газа.

На фиг. 51 изображена $p\nu$ -диаграмма, что видно по буквам, стоящим около осей координат. Условимся относительно масштаба: пусть для удельных объемов отрезок в 6 мм соответствует удельному объему в $1 \text{ м}^3/\text{кг}$, а для давлений отрезок в 3 мм — давлению в $1 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Предположим, что состояние газа, которое мы желаем изобразить графически, характеризуется параметрами: $\nu = 3 \text{ м}^3/\text{кг}$ и $p = 4 \text{ ата}$. На оси абсцисс находим точку, соответствующую $\nu = 3 \text{ м}^3/\text{кг}$ и восстанавливаем в ней перпендикуляр; такой же перпендикуляр восстанавливаем и к оси ординат в точке, соответствующей $p = 4 \text{ ата}$, т. е. $4 \text{ кг}/\text{см}^2$. Пересечение этих двух перпендикуляров дает точку A , которая характеризует принадлежащими ей значениями $p = 4 \text{ ата}$ и $\nu = 3 \text{ м}^3/\text{кг}$ состояние газа.

Решим обратную задачу. Пусть в той же диаграмме нам задана точка B . Нужно установить, какое состояние газа ей соответствует. Для этого опустим из этой точки два перпендикуляра: один на ось абсцисс, другой — на ось ординат. В пересечениях этих перпендикуляров с осью абсцисс и осью ординат по масштабу читаем, что этой точке соответствует состояние газа:

$$\begin{aligned} p &= 8 \text{ ата}, \\ \nu &= 2,5 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

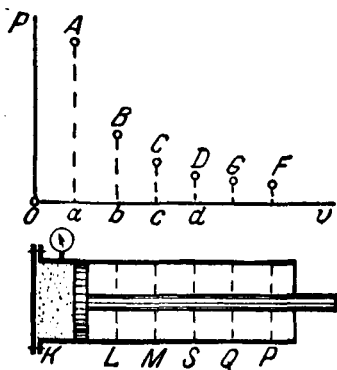


Фиг. 51. Графическое изображение состояния газообразного тела.

Итак, в pV -диаграмме точка характеризует состояние газа.

Покажем теперь, как можно графическим же путем изобразить не отдельное состояние газа, а процесс изменения состояния и в частности, как можно графически изобразить зависимость давления газа, от его удельного объема.

Пусть в цилиндре с поршнем находится 1 кг газа (фиг. 52). Расположим над цилиндром pV -диаграмму.



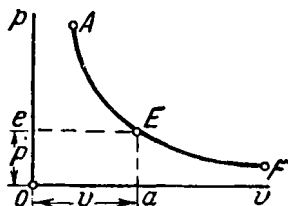
Фиг. 52. Изображение последовательных изменений состояния газа в цилиндре.

Для удобства масштаб для удельных объемов устанавливаем такой, чтобы получаемые отрезки по оси абсцисс соответствовали высоте части цилиндра, в котором помещается рассматриваемый 1 кг газа (цилиндр на фиг. 52, расположен горизонтально, так что высоту его мы считаем слева направо).

Таким образом, когда высота части цилиндра, в которой находится газ, равна, например, KL , то на диаграмме pV объем цилиндра, а значит и удельный объем, изобразится отрезком Ob ; объему с высотой KM соответствует отрезок Oc и т. д.

Пусть в начальном состоянии давление газа в выбранном для него масштабе измеряется отрезком Aa , и таким образом точка A характеризует состояние газа в цилиндре. Если теперь дать возможность газу расширяться, то состояние газа будет изменяться. Для того чтобы изобразить происходящий процесс изменения состояния газа графически, будем понемногу отодвигать поршень и определим по манометру, какое давление окажется в цилиндре при различных достаточно близких друг от друга положениях поршня. Пусть эти положения будут L, M, S, Q, P (на чертеже они изображены пунктиром). Тогда для этих положений поршня мы сможем построить точки, характеризующие состояние газа. Пусть на нашем чертеже это будут точки $A, B, C, D,$

G, F . Таким образом мы видим, что при расширении газа давление его падало. Так как падение давления происходило плавно, мы можем соединить точки A, B, C, D, G, F плавной кривой (это сделано на другом чертеже — фиг. 53), и тогда линия AF будет показывать нам изменение давления при изменении удельного объема или иначе — она будет характеризовать процесс изменения состояния газа. Теперь по кривой AF мы можем для любого значения удельного объема (т. е. для любого положения поршня) найти значение давления. Пусть, например, нужно узнать, какое давление соответствует значению удельного объема, измеряемому отрезком Oa . Для этого в точке a составляем перпендикуляр aE до пересечения с кривой AF . Из точки пересечения E опускаем перпендикуляр на ось ординат, получим точку e . Теперь по цифрам, если они поставлены на оси ординат, мы можем определить искомое значение давления газа.



Фиг. 53. Графическое изображение изменения состояния газа.

В тех случаях, когда кривая AF должна только пояснить характер изменения параметров, а численные значения величин не нужны, масштаб на осях координат не изображают; например, на фиг. 53 показана кривая, характеризующая процесс, без указания значения p и v на осях.

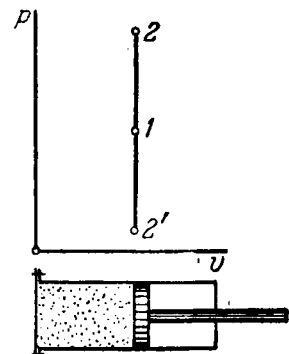
Графическим путем удобно изображать самые разнообразные зависимости. В дальнейшем мы широко будем пользоваться этим способом.

21. ПРОЦЕСС ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗА ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

Рассмотрим теперь наиболее важные процессы изменения состояния газов. В первую очередь посмотрим, что происходит с газом в том случае, когда к нему подводят или отводят тепло, не меняя его объема. Предположим, что в цилиндре с поршнем находится газ (фиг. 54), и каким-либо образом поршень удерживается все время в одном и том же положении. Таким образом газ как бы находится в закрытом баллоне.

Процесс нагревания или охлаждения газа в этом случае называется процессом изменения состояния при постоянном объеме; иначе он называется и з о х о р и ч е с к и м процессом; обозначается он: $v = \text{const}$; здесь буква v означает удельный объем; слово const — сокращение латинского слова *constantus* (константус), что значит по-русски — постоянный.

Подвод тепла к газу увеличит в этом случае скорость движения молекул, вследствие чего давление газа и его температура увеличатся; наоборот, отвод тепла от газа вызовет уменьшение как давления, так и температуры. Покажем характер изменения состояния газа в диаграмме pv (фиг. 54).



Фиг. 54. Процесс изменения состояния газа при постоянном объеме ($v = \text{const}$),

Для этого, как и раньше, будем наносить точки, которые показывают состояние газа через небольшие промежутки времени. Но по условию объем газа в процессе не меняется. Поэтому для построения каждой точки придется брать все новые ординаты, соответствующие повышающемуся давлению при одной и той же абсциссе. Значит все точки будут расположены друг над другом, и если их соединить линией, как это делалось в § 4, то получится прямая линия, параллельная оси ординат; эта линия и будет характеризовать процесс изменения состояния газа при постоянном объеме. Она называется и з о х о р о й. В этом процессе в случае подвода тепла (нагревание) линия будет направлена вверх (в сторону увеличивающихся давлений), а в случае отвода тепла (охлаждение) линия будет направлена вниз. Таким образом линия $1-2$ изобразит процесс нагревания, линия же $1-2'$ изображает процесс охлаждения газа при $v = \text{const}$.

Установлено, что увеличение давления при подводе тепла и уменьшение давления при отводе тепла от газа в процессе $v = \text{const}$ прямо пропорциональны изменению абсолютной температуры, так что если начальная абсолютная температура газа T_1 , а конечная T_2 и если

начальное давление p_1 , а конечное p_2 , то между этими величинами должна существовать зависимость

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (40)$$

Эта зависимость означает: *во сколько раз конечное давление больше или меньше начального, во столько же раз и конечная абсолютная температура больше или меньше начальной абсолютной температуры.* Пользуясь этой зависимостью, можно найти любое из давлений или температур по остальным трем величинам (см. ниже пример). Необходимо только иметь в виду, что p_1 и p_2 — абсолютные давления, и при расчетах оба значения должны быть выражены в одних и тех же единицах измерения (мм рт. ст. или атмосферы).

Особенность рассматриваемого процесса заключается в том, что газ при изменении своего состояния не совершает работы. Происходит это потому, что объем газа постоянный, а, как было ранее сказано, работа может быть совершена газом только в том случае, если происходит перемещение точки приложения силы, чего здесь нет, так как поршень остается без движения.

Процесс изменения состояния газа при постоянном объеме имеет большое практическое значение. При работе некоторых двигателей внутреннего сгорания в цилиндр подается смесь горючего газа и воздуха; когда такую смесь зажигают при помощи искры, то топливо мгновенно сгорает, и выделившееся тепло идет на нагревание образовавшихся продуктов сгорания. При этом процесс нагревания продуктов сгорания происходит так быстро, что поршень цилиндра, в котором все это происходит, не успевает заметно переместиться; поэтому можно считать, что нагревание продуктов сгорания происходит при $v = \text{const.}$

Количество тепла, которое тратится для нагревания или охлаждения газа в процессе с постоянным объемом, определяется по формулам, изложенным в § 15. Здесь нужно только дополнительно указать, что для каждого процесса существует свое значение теплоемкости. В частности для процесса с постоянным объемом пользуются теплоемкостью при постоянном объеме. Она обозначается c_v (читается це ве). Некоторые ее значения приведены в табл. 4 в конце книги.

Пример 15. В цилиндре при неизменном положении поршня нагреванием увеличили давление газа таким образом, что показание манометра от $p_1 = 4 \text{ ат}$ увеличилось до $p_2 = 8 \text{ ат}$. Какая установилась температура газа, если вначале была $t_1 = 350^\circ\text{C}$?

Прежде всего находим абсолютное давление в начале и в конце процесса. Так как барометрическое давление точно не указано, считаем его равным $B = 1 \text{ ат}$. Таким образом

$$p_1 = 4 + 1 = 5 \text{ ата}; \quad p_2 = 8 + 1 = 9 \text{ ата}.$$

Находим начальную абсолютную температуру

$$T_1 = t_1 + 273 = 350 + 273 = 623^\circ\text{K}.$$

По известным значениям p_2 и p_1 находим, во сколько раз возросло давление:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{9}{5} = 1,8.$$

Согласно формуле (40) во столько же раз должна вырасти и абсолютная температура, т. е. частное $\frac{T_2}{T_1}$ должно быть равно

$$\frac{T_2}{T_1} = 1,8.$$

Вместо T_1 подставим его значение: получаем

$$\frac{T_2}{623} = 1,8.$$

Отсюда находим T_2 , как делимое по известному делителю и частному,

$$T_2 = 623 \cdot 1,8 = 1121^\circ\text{K}.$$

Для того чтобы вычислить конечную температуру по стоградусной шкале, воспользуемся формулой (31'); по ней находим

$$t_2 = T_2 - 273 = 1121 - 273 = 848^\circ\text{C}.$$

Таким образом конечная температура газа $t_2 = 848^\circ\text{C}$.

22. ПРОЦЕСС ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

Пусть в цилиндре с поршнем находится газ, состояние которого характеризуется в диаграмме pV точкой 1 (фиг. 55). Начнем нагревать газ; при этом он будет расширяться, преодолевая давление p , под которым он находится; если к штоку поршня присоединить какую-либо машину, например, поршень насоса, то при расширении газ совершит работу, в данном случае работу

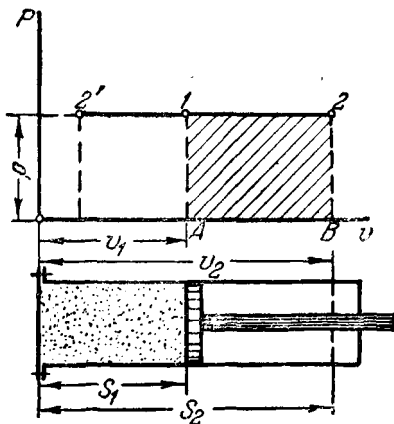
поднятия жидкости. Регулируя подвод тепла к газу, можно добиться того, что давление его будет оставаться все время одинаковым, т. е. показание манометра в течение процесса не будет изменяться.

Такой процесс нагревания газа называется процессом изменения состояния при постоянном давлении или **изобарическим процессом**; обозначается он так: $p = \text{const}$. Так как давление газа в течение процесса не меняется, то в pV -диаграмме этот процесс изобразится прямой, параллельной оси абсцисс; когда поршень дойдет до положения, указанного пунктиром, то конечное состояние изобразится в диаграмме точкой 2, и таким образом весь процесс изобразится линией 1—2. Эта линия называется **изобарой**.

Если производить не нагревание газа, а охлаждение при постоянном давлении, то поршень пойдет влево; в этом случае не газ будет совершать работу, а извне будет совершаться (тратиться) работа на то, чтобы сжать газ. В этом случае процесс охлаждения изобразится также прямой, параллельной оси абсцисс, но прямая будет направлена влево, так как объем газа во время процесса охлаждения будет уменьшаться. Таким образом процесс охлаждения изобразится прямой 1—2'.

Установлено, что удельный объем газа в рассмотренном процессе при нагревании увеличивается во столько раз, во сколько увеличивается абсолютная температура, а при охлаждении удельный объем газа уменьшается во столько раз, во сколько уменьшается абсолютная температура. Математически это записывается так:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (41)$$



Фиг. 55. Процесс изменения состояния газа при постоянном давлении ($p = \text{const}$).

Зависимость (41) носит название закона Гей-Люссака.

Наоборот, удельный вес газа в этом процессе при нагревании (иначе говоря, при расширении газа) уменьшается во столько раз, во сколько увеличивается абсолютная температура, а при охлаждении (т. е. при сжатии) удельный вес газа увеличивается во столько раз, во сколько уменьшается абсолютная температура. Математически это записывается так:

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (42)$$

Нетрудно подсчитать и работу, которую совершает газ при расширении в случае, если давление газа остается постоянным. Она равна произведению давления газа на увеличение объема:

$$\omega = p(v_2 - v_1). \quad (43)$$

Здесь буквой ω (дубль ω) обозначена работа газа, буквой p — абсолютное давление газа во время процесса, а v_2 и v_1 — конечное и начальное значения удельного объема газа. Необходимо только иметь в виду, что обычно объемы измеряют в кубических метрах, а давления — в атмосферах. В этом случае, чтобы соблюсти правильное соотношение единиц измерения, нужно значение давления газа выразить в $\text{кг}/\text{м}^2$, т. е. умножить число атмосфер на 10 000. Полученное после произведения вычислений значение будет измерять работу в килограммометрах на килограмм газа.

Разберем подробнее p - v -диаграмму процесса при $p = \text{const}$. На фиг. 55 он изображен линией 1—2. Площадь под этой линией заштрихована; это прямоугольник 1—2—B—A—1 со сторонами: линией процесса 1—2, осью абсцисс и ординатами 1—A и 2—B, проходящими через начало процесса (точка 1) и конец процесса (точка 2). Площадь прямоугольника, как было сказано в § 3, равна произведению основания на высоту. Здесь основанием прямоугольника является линия AB; по чертежу видно, что она измеряет увеличение удельного объема газа при расширении, т. е.

$$AB = v_2 - v_1.$$

Высотой прямоугольника является давление p ; таким образом, если площадь прямоугольника $1-2-B-A-1$ обозначить буквой S , то

$$S = p(v_2 - v_1).$$

Сравнивая это выражение с формулой работы (43), можно установить, что в правой части в обоих случаях стоит одно и то же выражение. Отсюда можно сделать следующий очень важный вывод: *площадь фигуры, находящейся под линией процесса, в p -диаграмме измеряет работу, совершенную газом.* Этим положением мы будем все время пользоваться в дальнейшем; в подробных курсах доказывается, что оно остается верным не только для процесса с постоянным давлением, но и для всякого другого процесса изменения состояния газа.

Количество тепла, которое тратится на нагревание и охлаждение газа, вычисляется по формулам, указанным в § 15; при этом нужно пользоваться теплоемкостью при постоянном давлении; ее обозначают c_p (читается це пе), некоторые значения ее приведены в табл. 4. Укажем здесь, что всегда c_p больше, чем c_v . Объясняется это следующим. Как уже известно, значение теплоемкости показывает, какое количество тепла нужно подвести к газу, чтобы поднять температуру 1 кг на 1° С. Сравнивая оба рассматриваемых процесса, мы отмечаем, что в процессе $p = \text{const}$ совершается работа, в то время как в процессе $v = \text{const}$ газ никакой работы не совершает. Очевидно, что если в обоих случаях удалось нагреть газ на 1° С, то в том случае, когда такое повышение произошло с производством работы, и тепла было затрачено больше. Значит c_p больше, чем c_v .

Процесс изменения состояния газа при постоянном давлении имеет очень широкое распространение в теплоэнергетике. Укажем на важнейшие случаи его применения.

Имеются двигатели, в которых подвод тепла к рабочему телу совершается при постоянном давлении. Это так называемые двигатели Дизеля. Они нами будут изучены позднее.

В котлах горячие газы нагревают воду и превращают ее в пар. Как процесс охлаждения газов, так и процесс нагрева воды происходит при почти постоянном давлении.

В теплообменных аппаратах (испарители, подогреватели, конденсаторы) процессы охлаждения и процессы нагревания происходят также при постоянном давлении.

Пример 16. Удельный вес газа в начальном состоянии $\gamma_1 = 0,5 \text{ кг/м}^3$, а температура $t_1 = 27^\circ\text{C}$. Вычислить, какой получится удельный вес γ_2 газа, если в процессе с постоянным давлением повысить его температуру до $t_2 = 190^\circ\text{C}$.

Вычислим абсолютную температуру газа в начальном и конечном состояниях:

$$T_1 = 273 + 27 = 300^\circ\text{K},$$

$$T_2 = 273 + 190 = 463^\circ\text{K}.$$

Определим частное от деления T_2 на T_1 :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{463}{300} = 1,54.$$

По формуле (42) это частное должно равняться частному от деления удельного веса γ_1 газа в начале на удельный вес γ_2 в конце процесса

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = 1,54.$$

Подставим в полученное выражение известное нам значение удельного веса вначале, т. е. $\gamma_1 = 0,5 \text{ кг/м}^3$; получим:

$$\frac{0,5}{\gamma_2} = 1,54.$$

Здесь нам неизвестен делитель γ_2 ; но делитель можно найти разделив делимое на частное; таким образом

$$\gamma_2 = \frac{0,5}{1,54} = 0,325 \text{ кг/м}^3.$$

Пример 17. Вычислить количество тепла, которое нужно подвести к 10 кг воздуха, чтобы повысить его температуру от $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до $t_2 = 80^\circ\text{C}$ при постоянном давлении.

Искомое количество тепла найдется по формуле (33):

$$Q = Gc_p(t_2 - t_1)$$

(в формуле значок p при букве c указывает, что процесс нагревания происходит при постоянном давлении).

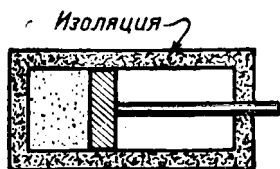
Из табл. 4 находим для воздуха $c_p = 0,24 \text{ ккал/кг град}$. Подставляя в формулу значения, найдем

$$Q = 10 \cdot 0,24(80 - 20),$$

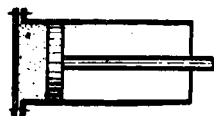
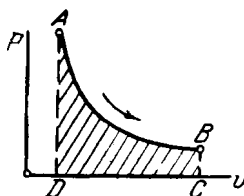
$$Q = 144 \text{ ккал}.$$

23. АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗА

В технике имеет большое значение изменение состояния газа, при котором расширение или сжатие его происходит таким образом, что между газом и внешней окружающей средой нет никакого теплообмена; иначе говоря, при таком изменении состояния к газу не подводится и не отводится тепло. Этого можно было бы добиться, если тщательно изолировать стенки цилиндра и поршень материалами, не проводящими тепла (фиг. 56).



Фиг. 56. Расширение газа в цилиндре со стенками, покрытыми изоляцией.



Фиг. 57. Адиабатическое расширение газа.

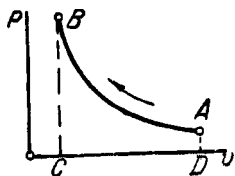
Процесс изменения состояния газа, при котором нет теплообмена между газом и внешней средой, называется **адиабатическим**.

На фиг. 57 в p - v -диаграмме кривая AB показывает, как изменяется давление газа при увеличении объема (расширение газа), если к газу при расширении не подводится и не отводится тепло. Иначе говоря, кривая AB характеризует адиабатический процесс изменения состояния газа в p - v -диаграмме; она называется **адиабатой**. На фиг. 58 представлен обратный случай — адиабатический процесс сжатия газа.

При адиабатическом расширении газ совершает работу, которая состоит в том, что газ преодолевает давление, приложенное к поршню. За счет чего же совершается эта работа? Согласно закону сохранения и превращения энергии она не могла возникнуть «из ничего», а должна

была появиться за счет исчезновения какого-то другого вида энергии. При более внимательном рассмотрении здесь можно обнаружить такое превращение. Рассмотрим его.

Молекулы газа, заключенного в цилиндре, находятся в непрерывном движении. При расширении поршень цилиндра движется слева направо (фиг. 56). Движущиеся в том же направлении молекулы настигают поршень и при столкновении с ним отдают ему часть своей энергии и поэтому отлетают от него



Фиг. 58. Адиабатическое сжатие газа.

после удара уже с меньшей скоростью. Энергия движения молекул составляет так называемую внутреннюю тепловую энергию газа. При понижении скорости молекул, происходящем вследствие отдачи молекулами своей энергии поршню, понижается и внутренняя тепловая энергия газа. Таким образом механическая энергия движения поршня, за счет которой совершается работа, возникла вследствие исчезновения части внутренней тепловой энергии газа.

Ранее мы говорили, что температура газа характеризует интенсивность движения молекул. Чем больше у данного газа скорость движения молекул, тем выше его температура. Отсюда можно заключить, что если в адиабатическом процессе во время расширения газа понижается скорость молекул, то это значит, что температура его падает.

Обратно, если производится адиабатическое сжатие газа, то внутренняя тепловая энергия его повышается, а следовательно, повышается и температура газа. Происходит это потому, что движущийся навстречу молекулам поршень передает им при столкновении часть своей энергии, и вследствие этого они отлетают от поршня с большой скоростью, а это и вызывает повышение внутренней тепловой энергии газа.

Итак, при адиабатическом расширении газ совершает работу за счет своей внутренней тепловой энергии, и потому температура его уменьшается: при адиабатическом сжатии затраченная на сжатие работа идет на повышение его внутренней энергии, а вследствие этого температура газа увеличивается. Что касается давления, то в адиабатическом процессе оно также увеличивается.

Итак, при адиабатическом расширении газ совершает работу за счет своей внутренней тепловой энергии, и потому температура его уменьшается: при адиабатическом сжатии затраченная на сжатие работа идет на повышение его внутренней энергии, а вследствие этого температура газа увеличивается. Что касается давления, то в адиабатическом процессе оно также увеличивается.

тическом процессе расширения она падает, а при сжатии увеличивается.

Работа газа здесь, как и в изобарическом процессе, измеряется площадью под кривой, изображающей рассматриваемый процесс изменения состояния газа. На фиг. 57 эта работа измеряется заштрихованной площадью $ABCD$.

В каждом из предыдущих двух процессов изменения состояния газа какой-либо из параметров состояния газа в процессе оставался постоянным; в изохорическом — удельный объем, в изобарическом — давление. Это давало возможность каждый из этих процессов легко (в виде прямой линии) изобразить графически. В этом случае мы пользовались pV -диаграммой.

И при адиабатическом процессе изменения состояния газа есть такой параметр состояния газа, который во время процесса остается постоянным. Этот параметр состояния газа называется энтропией и обозначается буквой s . Он существенно отличается от тех параметров, которые нам уже известны. В то время как каждый из прежних параметров состояния можно измерить приборами, этот параметр можно только подсчитать. Кроме того каждый из предыдущих параметров состояния газа имеет легко понятный физический смысл, в то время как энтропия такого простого физического смысла не имеет.

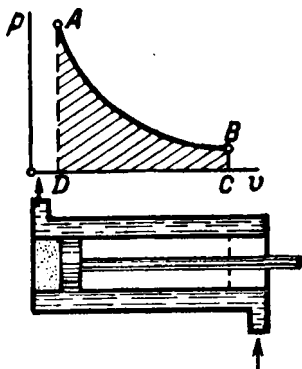
Тем не менее эта величина имеет большое значение в теплотехнике, так как облегчает целый ряд расчетов. Как уже было сказано, значения энтропии подсчитываются математическим путем: по этим данным строят графики (диаграммы), которыми и пользуются при расчетах. В дальнейшем мы познакомимся с такими расчетами.

Адиабатический процесс изменения состояния газа имеет очень важное значение в технике. Хотя стенки цилиндров в двигателях не всегда изолируют, однако расширение и сжатие в них происходят так быстро, что теплообмен между газом и стенками цилиндра, через которые проходит тепло к внешней среде, невелик, и с ним в расчетах часто можно не считаться. Поэтому процессы расширения и сжатия рабочих тел (газ, пар) в двигателях в этих случаях можно считать адиабатическими.

24. ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗА

Представим себе, что газ расширяется в цилиндре, устроенном так, что стенки его усиленно омываются водой (фиг. 59).

Если дать возможность газу расширяться, то он будет совершать работу; при этом, если не подводить к газу извне тепла, то эта работа будет совершаться за счет энергии молекул, скорость их будет уменьшаться и, следовательно, температура газа будет падать. Однако, омывая энергично стенки водой, имеющей постоянную температуру, можно не дать газу охладиться и добиться, чтобы температура газа все время оставалась одинаковой, равной температуре воды. При этом от воды к газу будет передаваться тепло. При обратном движении поршня, т. е. при сжатии газа внешней силой, температура газа будет стремиться повыситься, но при омывании цилиндра холодной водой можно добиться путем отнятия тепла от газа, чтобы температура газа оставалась равной температуре воды t . Таким



Фиг. 59. Изотермический процесс изменения состояния газа.

образом во время расширения тепло от воды будет идти к газу, а во время сжатия наоборот, тепло будет идти от газа к воде, и следовательно, как во время расширения газа, так и во время сжатия температура газа будет оставаться одинаковой. Такой процесс изменения состояния газа называется **изотермическим**.

Если начальное состояние газа изобразить в p - v -диаграмме точкой A и проследить, что будет происходить с давлением газа, то можно обнаружить, что при расширении оно все время будет понижаться (фиг. 59), и изотермический процесс изобразится кривой AB , называемой **изотермой**.

Опытным путем можно обнаружить следующее: при изотермическом расширении абсолютное давление газа уменьшается во столько раз, во сколько увеличивается

его объем. И наоборот, при изотермическом сжатии абсолютное давление газа увеличивается во столько раз, во сколько раз уменьшается его объем; математически обе зависимости можно написать так:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (44)$$

В этом соотношении буквами p_1 и v_1 обозначены значения давления и объема в начальном состоянии, а p_2 и v_2 — значения давления и объема в конце процесса. Из написанного соотношения видно, что частное от деления конечного объема на начальный равно частному от деления начального давления на конечное давление. Указанная здесь зависимость между изменением давления и объема носит название закона Бойля-Мариотта.

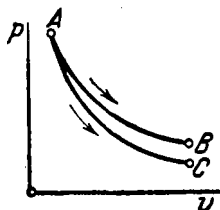
Если сравнить изменения давления в изотермическом и адиабатическом процессах, то можно убедиться в том, что при адиабатическом процессе давление падает более быстро, так как здесь тепло не подводится.

Если из точки A (фиг. 60) провести две линии в p - v -диаграмме, из которых одна AB характеризует падение давления в изотермическом процессе, а другая AC в адиабатическом, то адиабата AC пойдет ниже.

Это видно из следующей таблицы:

p_2/p_1	v_2/v_1						
	1	1,5	2	4	6	8	10
Изотермический процесс	1	0,67	0,5	0,25	0,167	0,125	0,1
Адиабатический процесс (для двухатомного газа)	1	0,55	0,38	0,145	0,082	0,055	0,04

По данным этой таблицы можно вычислить значение p_2 для обоих процессов, если заданы $\frac{v_2}{v_1}$ и p_1 .

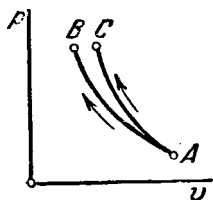


Фиг. 63. Относительное расположение изотермы и адибаты (расширение).

Наоборот, при сжатии давление газа в адиабатическом процессе растет быстрее, чем в изотермическом процессе. Это видно на фиг 61, где AC — адиабата, AB — изотерма.

И здесь, как в предыдущих процессах, площадь под кривой, изображающей процесс изменения состояния, измеряет работу газа. Таким образом, если в p - v -диаграмме процесс изотермического расширения изображается кривой AB (фиг. 59), то заштрихованная площадь $ABCD$ измеряет работу, совершенную газом. Эту площадь можно или вычислить при помощи особых формул или измерить прибором, носящим название планиметра.

Фиг. 61. Относительное расположение изотермы и адибаты (сжатие).



Если, наоборот, происходит процесс изотермического сжатия газа по кривой, то на это извне затрачивается работа.

Изотермический процесс применяется в машинах, служащих для сжатия воздуха. Такие машины называются компрессорами. В тех случаях, когда требуется иметь в конце сжатия воздух такой же температуры, как в начале сжатия, применяют охлаждение цилиндра; такое сжатие выгодно тем, что требует меньшего расхода работы.

Как увидим дальше, изотермический процесс имеет и большое теоретическое значение в деле изучения тепловых двигателей.

Пример 18. В компрессоре воздух изотермически сжимают таким образом, что объем его в конце становится равным одной трети первоначального объема; начальное абсолютное давление газа $p_1 = 0,98 \text{ ат}$. Найти конечное давление газа p_2 .

Уменьшение объема в три раза означает, что частное от деления конечного объема на начальный равно одной трети; поэтому можно написать так:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}.$$

Согласно формуле (44) частное от деления начального давления на конечное в рассматриваемом изотермическом процессе будет равно также одной трети. Это можно записать так:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{1}{3}.$$

Подставим сюда заданное значение $p_1 = 0,98 \text{ ат}$; получим

$$\frac{0,98}{p_2} = \frac{1}{3}.$$

По известному правилу (для того чтобы найти делитель, надо делимое разделить на частное) находим значение делителя:

$$p_2 = 0,98 : \frac{1}{3} = 0,98 \cdot 3 = 2,94 \text{ ат}.$$

25. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

При горении топлива получаются *продукты горения* — газовая смесь, в основном состоящая из *углекислого газа* CO_2 , *азота* N_2 , *кислорода* O_2 , *водяного пара* H_2O .

Состав продуктов сгорания зависит от состава сжигаемого топлива и количества воздуха, подводимого для сгорания.

Состав газовой смеси определяется весом каждого газа, приходящимся на 1 кг смеси. Так, если говорят, что весовой состав продуктов сгорания:

$$\text{CO}_2 — 0,12, \quad \text{H}_2\text{O} — 0,33, \quad \text{O}_2 — 0,05, \quad \text{N}_2 — 0,80,$$

то это значит, что на 1 кг продуктов сгорания приходится 0,12 кг углекислого газа, 0,03 кг водяного пара, 0,05 кг кислорода и 0,80 кг азота. Если сложить составные части газа, то получится единица:

$$0,12 + 0,03 + 0,05 + 0,80 = 1.$$

Заданный так состав газа называется *относительным весовым составом*.

Если состав задан на 100 весовых единиц, то он называется *процентным весовым составом*. Рассмотренная нами смесь имеет следующий весовой *процентный состав*:

$$\text{CO}_2 — 12\%, \quad \text{H}_2\text{O} — 3\%, \quad \text{O}_2 — 5\%, \quad \text{N}_2 — 80\%.$$

Иногда состав газовой смеси задают на 1 м³, тогда значения каждого газа показывают его *объемную долю* в 1 м³. Состав смеси, заданный таким образом, называется *относительным объемным составом*. Этот состав следует понимать так. Возьмем несколько разных

газов, имеющих одно и то же давление и температуру. Если теперь эти газы смешать в их суммарном объеме, т. е. в объеме, равном сумме объемов, ранее занимаемых каждым газом в отдельности, то получится смесь того же давления и той же температуры, что имел каждый из газов до смешения. Частное от деления объема каждого газа до смешения на суммарный объем после смешения представляет собой *относительный объем* этого газа в смеси.

Если, например, задан относительный объемный состав смеси:

$$\text{CO}_2 — 0,14, \text{H}_2\text{O} — 0,08, \text{O}_2 — 0,06, \text{N}_2 — 0,72,$$

то это значит, что на 1 м^3 газа приходится

$$\text{CO}_2 — 0,14 \text{ м}^3, \text{H}_2\text{O} — 0,08 \text{ м}^3, \text{O}_2 — 0,06 \text{ м}^3, \text{N}_2 — 0,72 \text{ м}^3.$$

Такой объем занимали бы эти газы, если бы удалось отделить их друг от друга перегородками, не меняя давления и температуры смеси.

В сумме объемные доли этих газов составляют единицу:

$$0,14 + 0,08 + 0,06 + 0,72 = 1.$$

Если объемный состав задан на сто объемных единиц, он называется *процентным объемным составом*. Так, если задана газовая смесь по объему:

$$\text{CO}_2 — 14\%, \text{H}_2\text{O} — 8\%, \text{O}_2 — 6\%, \text{N}_2 — 72\%,$$

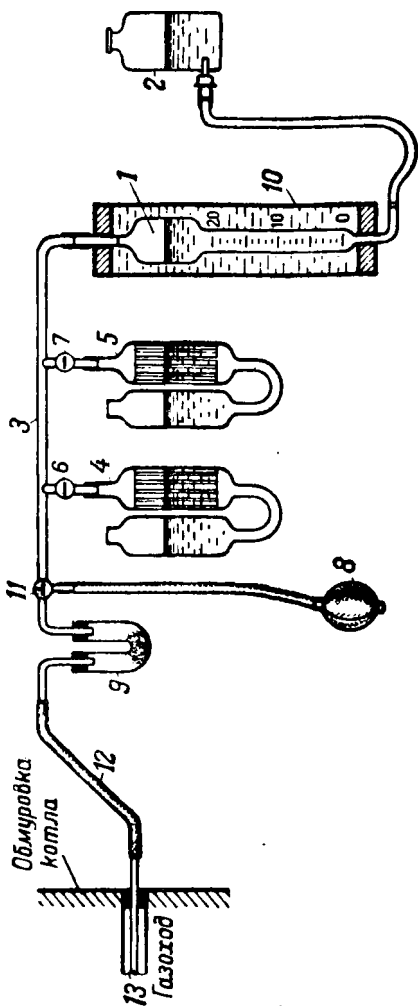
то это значит, что на 100 м^3 приходится $14 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$, $8 \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}$, $6 \text{ м}^3 \text{ O}_2$ и $72 \text{ м}^3 \text{ N}_2$.

В смеси каждый из газов распространяется по всему объему, но уже имеет меньшее давление, чем он имел до смешения. То давление, которое имеет каждый из газов в смеси, называется *парциальным давлением*.

По закону Дальтона *давление газовой смеси равно сумме парциальных давлений газов*, из которых составлена смесь.

Подсчет количества тепла на нагревание и охлаждение газовой смеси производят по тем же формулам, какие указаны ранее в § 15. Нужно только вместо *c* подставить значение теплоемкости для смеси.

По составу газов можно судить о том, насколько правильно идет процесс горения топлива в топке парового котла, и следовательно, установить, не производится ли пережог топлива. Для определения состава газа существуют приборы — газоанализаторы; среди них большое распространение имеет ручной (неавтоматический) газоанализатор Орса-Фишера (фиг. 62). Он состоит из измерительной бюретки 1, соединенной с одной стороны со склянкой 2, а с другой — с гребенкой 3; двух поглотительных сосудов 4 и 5, присоединяемых к гребенке через краны 6 и 7, резиновой груши, 8, фильтра 9, водяного цилиндра 10 и трехходового крана 11. Склянка 2 соединена с измерительной бюреткой 1 при помощи гибкой резиновой трубки. В



Фиг. 62. Газоанализатор Орса-Фишера.

склянке находится вода; поднимая склянку, из нее перегоняют воду в измерительную бюретку, опуская, — вновь направляют в склянку. Поглотительные сосуды заполнены химическими реактивами: в сосуде 4 — раствор едкого кали, поглощающий углекислый газ CO_2 , в сосуде 5 — раствор

пирогалловой кислоты, поглощающей кислород. Трехходовый кран позволяет делать одно из следующих соединений: газоход — прибор, газоход—атмосфера (через грушу) и прибор — атмосфера (через грушу). Резиновая груша играет роль насоса — она позволяет засасывать газ из газохода. Измерительная бюретка окружена водяным цилиндром 10, служащим для поддержания постоянной температуры газа в измерительной бюретке. Последняя устроена так, что в узкой ее части помещаются 20 объемных частей газа, в широкой — 80. Прибор при помощи резиновой трубки 12 присоединен к металлической трубке 13, введенной в газоход, из которого забирают исследуемую порцию газа.

Работа с прибором в основном заключается в следующем. Предварительно грушей подсасывают к прибору испытуемый газ и затем, опуская склянку 2, засасывают 100 объемных частей испытуемого газа в измерительную бюретку. После этого, соединяя измерительную бюретку с поглотительным сосудом 4, несколько раз перегоняют, поднимая и опуская склянку 2, засосанную порцию газа через сосуд 4. Раствор едкого кали поглощает находящийся в засосанной порции углекислый газ. О количестве поглощенного углекислого газа судят по объему оставшейся порции газа, который измеряют в измерительной бюретке при том же (атмосферном) давлении, при котором была засосана вся подвергающаяся опыту порция газа. После того как объем углекислого газа установлен, измерительную бюретку через гребенку соединяют с поглотительным сосудом 5 и прогоняют оставшуюся порцию газа через раствор пирогалловой кислоты, которая поглощает кислород; когда появляется полная уверенность, что весь кислород поглощен, вновь измеряют оставшуюся порцию газа и по остатку судят о содержании кислорода в засосанной порции газа. Так измеряют содержание CO_2 и O_2 в продуктах горения топлива. При полном горении этого достаточно, чтобы судить о правильности режима горения топлива.

На электрических станциях обычно котлы оборудуют автоматическими газсанализаторами, которые непрерывно производят анализ газов и записывают его на ленту. Ленту ежедневно снимают и по записям на ней судят о правильности режима горения топлива.

26. ВОДЯНОЙ ПАР

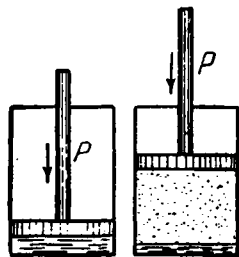
Ранее мы уже говорили, что водяной пар имеет большое применение в технике. В тех состояниях, в которых его применяют в паровых двигателях, он легко превращается в жидкость, в отличие от многих других газообразных тел, которые в нормальных условиях трудно переходят в жидкое состояние.

В природе вода встречается в виде жидкости, и для того чтобы получить ее в газообразном виде, т. е. превратить в пар, нужно затратить тепло. Как было уже сказано, этот процесс называется *парообразованием*. В теплотехнике он имеет чрезвычайно важное значение, и поэтому мы рассмотрим его подробнее.

Каждому приходилось наблюдать переход воды в пар при кипячении ее в чайнике, самоваре. Здесь процесс парообразования происходит при атмосферном давлении. В технике получение водяного пара происходит при значительно больших давлениях, чем атмосферное.

Пусть в цилиндре под поршнем находится 1 кг воды; поршень оказывает на воду давление p ат (фиг. 63). Начнем подводить к воде тепло. При этом будем давать поршню возможность передвигаться с тем, чтобы давление все время оставалось равным начальному давлению p . При нагревании воды объем ее будет немного увеличиваться; увеличиваться будет и температура. Когда температура достигнет некоторого зависящего от давления значения, вода закипит и при дальнейшем подводе тепла начнет превращаться в пар. Во время процесса превращения воды в пар объем будет увеличиваться сильно, а температура воды и получающегося пара, несмотря на сильный подвод тепла, будет оставаться постоянной. Так будет продолжаться до тех пор, пока последняя капля воды не превратится в пар; температура пара в это время будет та же, что и во время кипения.

Состояние пара, полученного под поршнем, характерно следующим: в занимаемом им объеме большего количества пара вместить нельзя; с другой стороны, если,



Фиг. 63. Процесс парообразования.

не изменяя температуры пара, попытаться уменьшить объем, двигая поршень вниз, то повысить давление не удастся, так как часть пара перейдет в жидкое состояние. Такой пар называется **насыщенным паром**. Если насыщенный пар смешан с кипящей водой, эту смесь называют **влажным насыщенным паром**; если же вся вода при кипячении превратилась в пар, — **сухим насыщенным**.

Весовое количество сухого пара в 1 кг влажного пара называют **степенью сухости пара** и обозначают буквой x (икс). Таким образом, если говорят, что степень сухости влажного пара $x = 0,95$, это значит, что 1 кг этого пара содержит 0,05 кг кипящей воды и 0,95 кг сухого насыщенного пара.

Температура, при которой вода начинает кипеть и которая сохраняется одинаковой до того момента, пока не испарится последняя капля воды, называется **температурой кипения** или **температурой насыщения**. Она обозначается буквой t со знаком s , т. е. t_s .

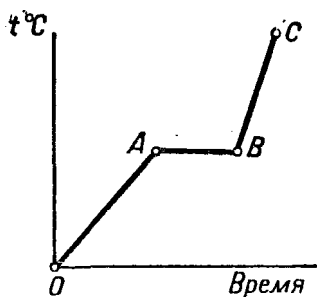
Температура кипения (насыщения) зависит от давления, под которым находится жидкость: чем выше давление, тем выше и температура насыщения. В табл. 7 приведены значения температуры насыщения для различных давлений.

Если продолжить нагревание пара при постоянном давлении после того, как испарилась последняя капля воды, температура пара будет увеличиваться; будет также увеличиваться и объем пара. Получающийся при этом пар называется **перегретым паром**; таким образом можно сказать, что *перегретым паром называется такой пар, температура которого выше температуры насыщения при данном давлении.*

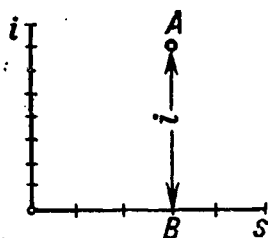
Если изобразить изменение температуры по времени при кипячении, то получится график, изображенный на фиг. 64. Линия OA показывает рост температуры при нагревании воды до температуры кипения, линия AB показывает постоянную температуру во время перехода воды в пар, линия BC характеризует рост температуры перегретого пара.

На электрических станциях перегретый пар получают в паровых котлах (описание паровых котлов см. далее в § 34). В котел поступает подогретая до некоторой

температуры вода; здесь она за счет тепла топлива нагревается до температуры насыщения, а затем превращается в пар. После этого насыщенный пар направляется в специальную часть котла, называемую перегревателем, и здесь за счет дополнительно получаемого тепла пар перегревается. В таком виде он и поступает в паровую машину или паровую турбину. Если же в про-



Фиг. 64. Ход изменения температуры по времени в процессе парообразования.



Фиг. 64а. Изображение состояния пара в *is*-диаграмме.

изводстве (например, на фабрике) нужен пар насыщенный, а не перегретый, то перегревателя в котле не ставят.

Покажем, как можно подсчитать количество тепла, требующееся для того, чтобы получить пар того или иного состояния. Пусть в цилиндре находится вода при 0°C . Так как теплоемкость воды равна 1 ккал/кг град , то для нагревания 1 кг воды на 1°C требуется одна килокалория тепла, а для того чтобы нагреть воду от 0°C до какой-либо температуры, нужно затратить столько килокалорий тепла, на сколько градусов нужно нагреть воду.

То количество тепла, которое затрачивается для нагревания воды от 0°C до какого-либо состояния пара или воды при постоянном давлении, называют теплосодержанием; измеряется оно в ккал/кг . На основании сказанного можно установить, что теплосодержание воды при какой-либо температуре численно равно этой температуре, т. е.

$$i = t. \quad (45)$$

Если, например, вода находится при температуре 90°C , то ее теплосодержание, т. е. количество тепла, которое затрачено для нагревания ее от 0 до 90°C , равно 90 ккал/кг, т. е.

$$i = 90 \text{ ккал/кг.}$$

Теплосодержание воды, нагретой до температуры насыщения t_s , обозначают буквой i со штрихом (i'), т. е. i' . Следовательно,

$$i' = t_s.$$

Надо, однако, иметь в виду, что это правило дает не вполне точное значение теплосодержания воды, в особенности если его вычисляют для высоких температур, потому что для высоких температур теплоемкость воды заметно выше 1 ккал/кг град. Более точное значение можно получить по табл. 7, где в четвертой вертикальной графе можно найти значения теплосодержаний жидкости, нагретой до температур кипения, указанных во второй вертикальной графе этой же таблицы (см. в конце книги).

Если для нагревания была взята вода не при 0°C , а допустим при 30°C , то в начальном состоянии ее теплосодержание уже было равно 30 ккал/кг, и для того чтобы ее нагреть до 90°C , нужно затратить не 90 ккал/кг, а всего 60 ккал/кг; таким образом мы видим, что количество тепла, которое нужно подвести к воде, равно разности теплосодержаний; если конечное теплосодержание обозначить буквой i_2 , начальное i_1 , а количество тепла, затраченное на нагревание при постоянном давлении, q_p , то

$$q_p = i_2 - i_1. \quad (46)$$

Это правило будет верно и в том случае, если после нагревания при постоянном давлении мы получим не воду, а пар, насыщенный или перегретый. Таким образом для того, чтобы уметь находить количества тепла, затраченные на получение пара при $p = \text{const}$, нужно научиться вычислять теплосодержание пара.

Теплосодержание сухого насыщенного пара, можно вычислить из следующих соображений. Мы уже говорили, что для получения сухого насыщенного пара нужно воду нагреть до температуры кипения; после этого дальнейший подвод тепла не вызывает повышения тем-

пературы, а идет на превращение воды в пар той же температуры, что и получившаяся кипящая вода; при этом приходится подвести, как это было показано в § 16, некоторое количество тепла, зависящее от того, при каком давлении происходит парообразование; это количество тепла называют скрытой теплотой парообразования и обозначают буквой r .

Таким образом, для получения 1 кг насыщенного пара из воды при 0°C нужно сначала подвести к ней количество тепла i' , чтобы ее довести до температуры кипения, и затем подвести еще r ккал/кг, чтобы перевести кипящую воду в сухой насыщенный пар. Всего, таким образом, для получения 1 кг сухого насыщенного пара из воды при 0°C нужно затратить $(i' + r)$ ккал/кг. Мы уже сказали, что то количество тепла, которое тратится для получения при постоянном давлении 1 кг пара из воды при 0°C , называют теплосодержанием; следовательно, теплосодержание сухого насыщенного пара, его обычно обозначают i'' , может быть выражено формулой

$$i'' = i' + r. \quad (47)$$

Значения r для получения пара различных давлений приведены в табл. 7, в этой же таблице приведены и значения i'' .

Нетрудно теперь подсчитать и теплосодержание влажного пара какой-либо степени сухости x . Для того чтобы получить такой пар, нужно 1 кг воды нагреть сначала до температуры кипения; для этого нужно подвести i' ккал/кг тепла. Далее, чтобы получить влажный пар со степенью сухости x , нужно из 1 кг кипящей воды превратить в пар x кг воды; если для превращения 1 кг кипящей воды в пар требовалось r ккал тепла, то для превращения в пар x кг кипящей воды потребуется rx ккал тепла; всего затрачено будет $(i' + rx)$ ккал/кг тепла; отсюда теплосодержание влажного пара может быть выражено формулой

$$i = i' + rx \text{ ккал/кг.} \quad (48)$$

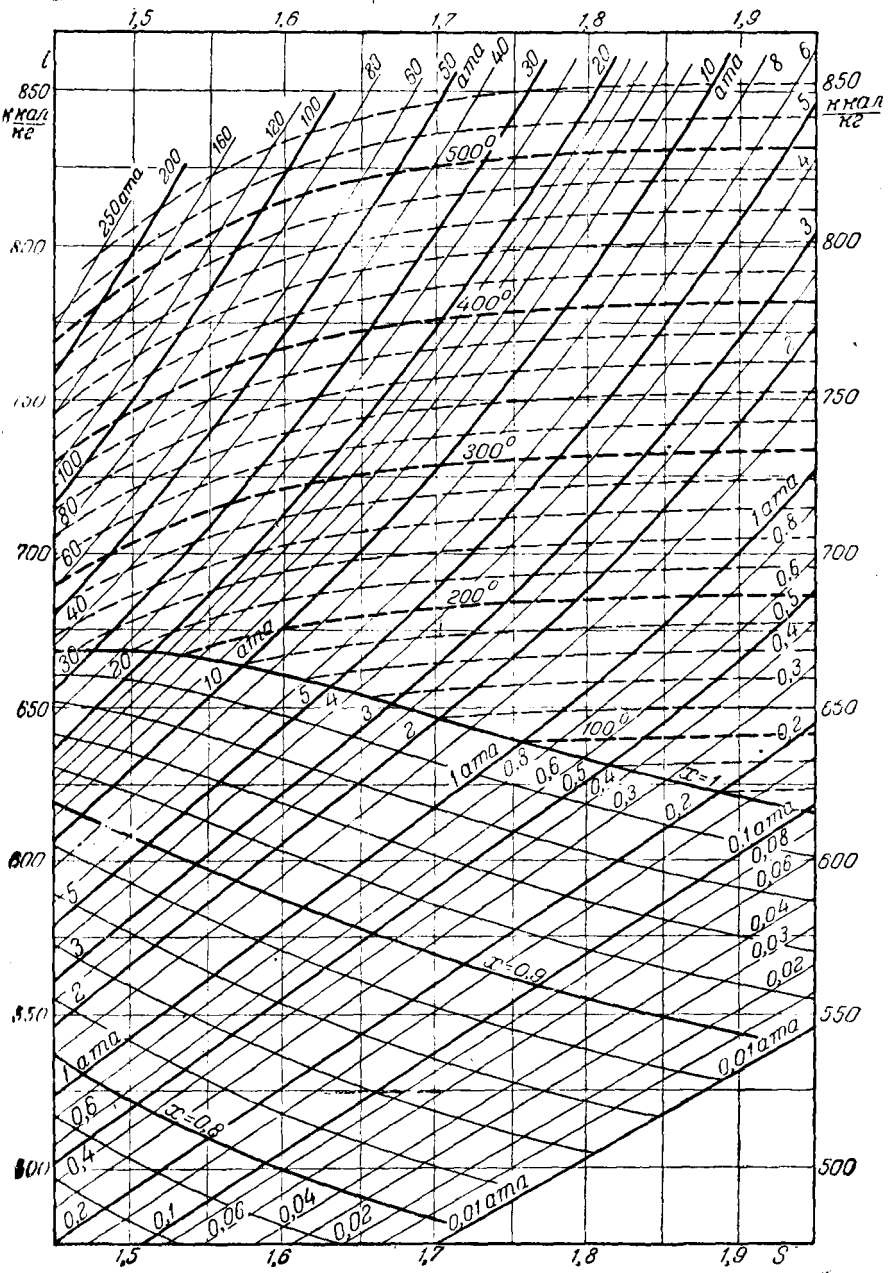
Чтобы получить перегретый пар, необходимо, как это было ранее показано, подвести к сухому насыщенному пару дополнительное количество тепла; нетрудно подсчи-

тать это количество, если известны теплоемкость пара и количество градусов, на которое этот пар перегрет. Проще, однако, определить теплосодержание перегретого пара графическим путем. Об этом будет сказано в следующем параграфе.

27. ДИАГРАММА is ДЛЯ ВОДЯНОГО ПАРА

В § 23 было указано, что среди параметров состояния газа имеется параметр энтропия, значение которой в адиабатическом процессе, т. е. при отсутствии теплообмена газа с внешней средой, остается постоянным. Если, с другой стороны, к газу подводят тепло, то энтропия его растет, а если тепло отнимают, энтропия газа уменьшается.

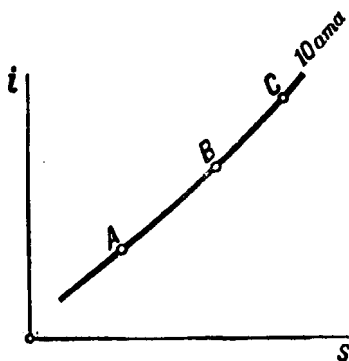
Использование этой величины в теплотехнических расчетах производится при помощи так называемой is -диаграммы, которая очень облегчает производство расчетов, особенно с водяным паром. Построение ее сводится к следующему. Берут две прямоугольных оси, как это делалось при построении pv -диаграммы. По оси абсцисс, т. е. по горизонтальной прямой, откладывают в определенном масштабе значения энтропии s (фиг. 65), а по оси ординат, т. е. по вертикальной прямой, откладывают значения теплосодержаний пара i . В pv -диаграмме каждая точка характеризует состояние газа, так как, опустив перпендикуляры на ось абсцисс и ось ординат, можно найти значения удельного объема и давления газа. Также и здесь: для всякой точки, взятой в этой диаграмме, можно найти значения теплосодержания и энтропии. Нас будут интересовать, главным образом, значения теплосодержаний. Так как эти значения отложены на оси ординат, то для того чтобы найти теплосодержание пара, характеризуемого в is -диаграмме точкой A (фиг. 64а), нужно знать величину вертикального отрезка AB ; соответствующие значения обычно наносят с левой и правой стороны диаграммы. Диаграмма is для водяного пара представлена на фиг. 65 (при расчетах применяют is -диаграммы, выполненные и в большем масштабе). В приводимой диаграмме имеются не всевозможные состояния, а только те, которые наиболее часто применяют в теплотехнике, поэтому значения теплосодержаний в точке пересечения оси абсцисс и оси ординат начинаются не от 0, а от 475 ккал/кг.



Фиг. 65. *is*-диаграмма.

Рассматриваемая ts -диаграмма представляет собой густую сетку пересекающихся линий; каждая из них представляет собой какой-либо процесс изменения состояния. Рассмотрим каждую из линий на диаграмме ts

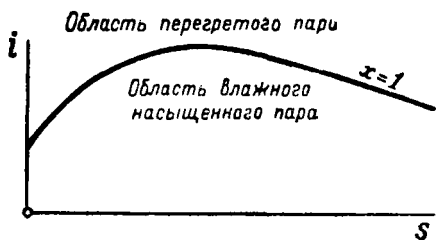
Обратим прежде всего внимание на ряд сплошных линий, идущих по диаграмме из левого нижнего угла по направлению вправо вверх. Это — изобары т. е. линии,



Фиг. 66. Изобара 10 атм.

каждая из которых изображает процесс изменения состояния при постоянном давлении. Каждая изобара имеет свое значение давления, которое на диаграмме написано в нескольких местах вдоль изобары. На фиг. 66 отдельно изображена изобара в 10 атм. Это значит, что точки А, В, С, как и другие точки той же линии, характеризуют пар, абсолютное давление которого составляет $p = 10 \text{ ат}$, но для каждой из этих точек значение теплосодержания разное.

Далее обратим внимание на жирную кривую линию,

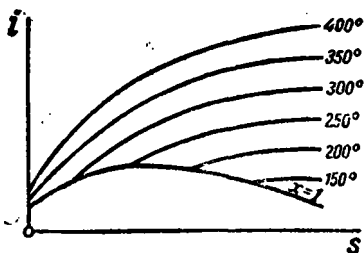


Фиг. 67. Верхняя пограничная кривая.

идущую приблизительно посередине диаграммы слева направо; около этой линии справа написано: $x = 1$. Отдельно на эскизе ts -диаграммы эта линия приведена на фиг. 67. Каждая точка на этой кривой изображает состояние сухого насыщенного пара. Эта кривая называется верхней пограничной кривой. Уже ранее было сказано, что если нагревать сухой насыщенный пар, то он становится перегретым паром, отсюда всякая точка, лежащая в ts -диаграмме выше верхней пограничной кривой, изображает перегретый пар; всякая точка, лежа-

щая *ниже* верхней пограничной кривой, изображает состояние пара, в котором еще не вся вода превратилась в пар, т. е. состояние влажного насыщенного пара.

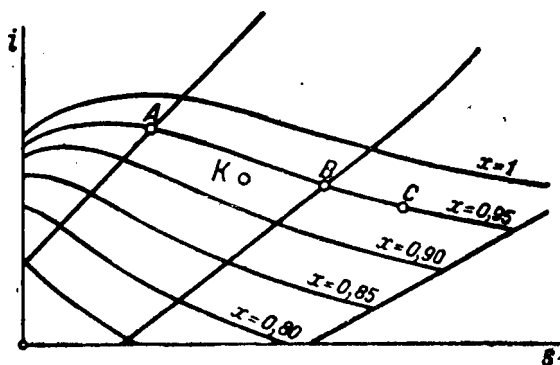
В верхней половине is -диаграммы имеются линии одинаковой температуры — *изотермы*. Они идут слева направо. Значения температур, соответствующих каждой изотерме, помечены около них. На эскизе is -диаграммы (фиг. 68) приведено несколько таких изотерм с принадлежащими им значениями температур.



Фиг. 68. Изотермы в is -диаграмме.

В области влажного насыщенного пара имеется ряд изгибающихся кривых, проходящих слева направо. Некоторые из них показаны на эскизе (фиг. 69).

Это — линии, характеризующие пар одной и той же степени сухости; значения степени сухости на некоторых



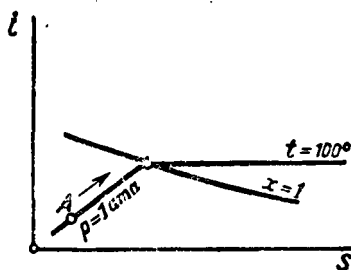
Фиг. 69. Линии одинаковой степени сухости.

из этих кривых написаны справа. Таким образом, если взять, например, точки A , B , C , то каждая из этих точек характеризует пар одной и той же степени сухости $x = 0,95$.

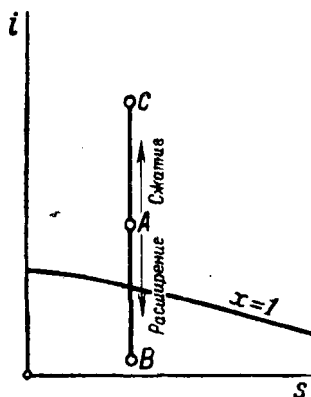
Для тех линий, при которых не указана величина x , ее нетрудно определить при помощи соседних линий.

Например, точка K лежит на линии приблизительно $x = 0,93$.

В нижней половине диаграммы, относящейся к насыщенному пару, нет отдельных линий — изотерм; они совпадают с изобарами. Это происходит потому, что как уже было ранее сказано, в насыщенном паре каждому давлению соответствует вполне определенная температура; поэтому если в процессе изменения состояния на-



Фиг. 70. Определение температуры влажного пара по is -диаграмме.



Фиг. 71. Адиабатический процесс в is -диаграмме.

сыщенного пара не меняется давление, то не будет меняться и температура. Отсюда, если в области насыщенного пара в is -диаграмме задана какая-либо точка, например A (фиг. 70), и нужно найти значение температуры пара, характеризуемого этой точкой, нужно по изобаре подняться до кривой насыщения и здесь прочесть значение изотермы. Это и будет температура, соответствующая всей изобаре, на которой лежит заданная нам точка. Например, взяв изобару $p = 1 \text{ атм}$, найдем значение температуры $t \approx 100^\circ \text{ C}$.

Наконец, в is -диаграмме имеются адиабаты, т. е. линии, характеризующие процесс изменения состояния пара без подвода и отвода тепла. Ранее было сказано, что в адиабатическом процессе энтропия остается постоянной, поэтому для того чтобы в is -диаграмме изобразить адиабатический процесс из какой-либо точки A (фиг. 71), надо через эту точку провести вертикальную

прямую, параллельную оси ординат. Очевидно, что все точки этой прямой имеют одно и то же значение энтропии. При этом процесс, идущий из точки A до точки C вверх, представляет собой адиабатическое сжатие, а от точки A до точки B вниз — адиабатическое расширение, так как в первом случае давление все время возрастает, а во втором снижается.

Адиабатический процесс имеет очень большое распространение в теплотехнических расчетах. Легкость изображения этого процесса в is -диаграмме (в виде прямой линии) показывает удобство применения энтропии в этих расчетах.

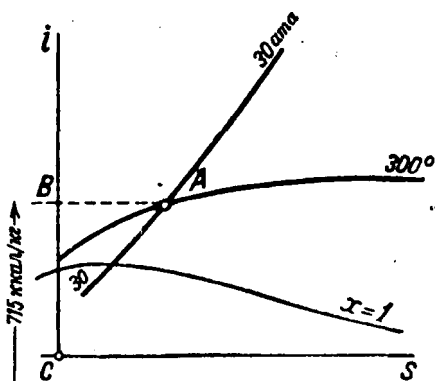
Если в is -диаграмме нет изохор, то удельный объем влажного пара вычисляют по формуле

$$v = v''x \quad (49)$$

(значения v'' берут из табл. 7).

В этой формуле v — искомый удельный объем влажного пара; v'' — удельный объем сухого насыщенного пара того же давления, что и искомый, а x — заданная степень сухости пара. Значения удельных объемов перегретого пара берут из специальных таблиц.

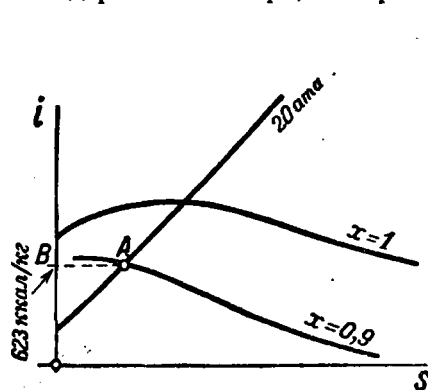
Определим теперь при помощи is -диаграммы теплосодержание пара, характеризуемого следующими данными: давление $p = 30 \text{ ата}$ и температура $t = 300^\circ \text{С}$. Найдем точку, которая характеризует заданное состояние в is -диаграмме. Она, очевидно, должна лежать на пересечении изобары 30 ата и изотермы 300°С (фиг. 72). Обозначим эту точку буквой A . Точка A лежит выше кривой сухого насыщенного пара, и это говорит о том, что пар в заданном нам состоянии перегретый. Для того чтобы определить его теплосодержание, надо опустить перпендикуляр на ось ординат, на которой отложены



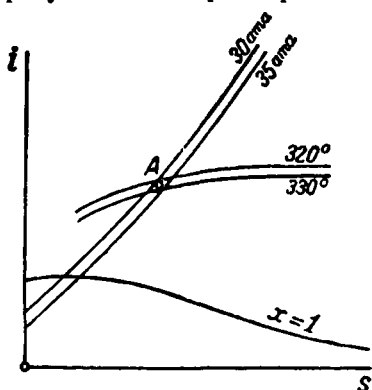
Фиг. 72. Определение параметров перегретого пара по is -диаграмме.

теплосодержания, т. е. провести пунктирную линию AB и узнать, какому значению теплосодержания соответствует точка B . По is -диаграмме определяем, что точке B соответствует теплосодержание в 715 ккал/кг.

Рассмотрим далее вычисление параметров влажного насыщенного пара. Пусть требуется найти теплосодержание пара, характеризуемого параметрами:



Фиг. 73. Вычисление параметров состояния влажного пара по is -диаграмме.



Фиг. 74. Нахождение состояния пара при отсутствии в is -диаграмме кривых заданных параметров.

$p = 20$ атм и $x = 0,9$. Ищем на диаграмме точку, характеризующую этот пар; для этого находим точку пересечения изобары 20 атм и линии $x = 0,9$. На диаграмме это будет точка A (фиг. 73). Очевидно, она и характеризует состояние заданного пара, так как одновременно лежит и на изобаре 20 атм и кривой степени сухости $x = 0,9$. Для того чтобы найти теплосодержание пара в этой точке, опускаем перпендикуляр AB на ось ординат и по точке B находим, что теплосодержание пара составляет 623 ккал/кг.

Для вычисления удельного объема пользуемся формулой (49).

$$v = v''x.$$

Из табл. 7 находим для заданного случая $v'' = 0,198$ м³/кг. Подставляем в формулу и находим

$$v = 0,198 \cdot 0,9 = 0,178 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Иногда может быть задано значение какого-либо параметра, не обозначенное на is -диаграмме. Так, может быть задано давление 23 ат ; такой изобары на is -диаграмме нет: в этом случае нужно соответствующую линию мысленно провести приблизительно посередине между изобарами 20 и 25 ата . Далее, например, может быть задана температура пара 345°С . Такой изотермы на is -диаграмме тоже нет; ее мысленно нужно провести посередине между изотермой 340° и 350°С . Если, например, задано состояние пара $p = 32 \text{ ата}$ и $t = 325^\circ \text{С}$, то точка на is -диаграмме будет лежать между изобарами 30 и 35 ата и изотермами 320 и 330°С . Очевидно, это будет точка A на фиг. 74.

Пример 19. В подогреватель питательной воды поступает насыщенный пар при $p = 3 \text{ ата}$ и $x = 0,98$; отдавая свое тепло питательной воде, он из подогревателя выходит в виде воды при том же давлении и температуре $t = 80^\circ \text{С}$. Зная, что через подогреватель проходит 2000 кг/час пара, вычислить, какое количество тепла отдал питательной воде пар.

Отдача тепла паром в подогревателе происходит при постоянном давлении. В § 26 было сказано, что количество тепла, отдаваемое паром в процессе с постоянным давлением, равно разности теплосодержаний. Следовательно, 1 кг пара отдает питательной воде количество тепла, равное разности теплосодержаний пара при $p = 3 \text{ ата}$ и $x = 0,98$ и воды при $t = 80^\circ \text{С}$.

По is -диаграмме находим теплосодержание пара при $p = 3 \text{ ата}$ и $x = 0,98$. Оно равно $i_1 = 640 \text{ ккал/кг}$. Теплосодержание воды при 80°С равно $i_2 = 80 \text{ ккал/кг}$.

Отсюда количество тепла, которое отдает 1 кг пара питательной воде, составляет

$$q_p = i_1 - i_2 = 640 - 80 = 560 \text{ ккал/час}$$

Все количество пара в 2000 кг/час отдает питательной воде

$$Q = 2000 \cdot 560 = 1\,120\,000 \text{ ккал/час}$$

Пример 20. Из барабана котла поступает в перегреватель пар при $p = 40 \text{ ата}$ и $x = 0,97$, а выходит из перегревателя пар при $p = 40 \text{ ата}$ и $t = 400^\circ \text{С}$. Определить, какое количество тепла получает 1 кг пара в перегревателе.

Процесс нагревания пара в перегревателе происходит при $p = \text{const}$; поэтому, как было указано в § 26, количество тепла, которое получает пар в перегревателе, равно разности теплосодержаний. Найдем по is -диаграмме i_1 — теплосодержание пара при выходе из перегревателя. Оно составит

$$i_1 = 769 \text{ ккал/кг}$$

Далее находим в is -диаграмме, что теплосодержание пара при поступлении в перегреватель, т. е. при $p = 40 \text{ атм}$ и $x = 0,97$, составляет

$$i_2 = 656 \text{ ккал/кг.}$$

Отсюда количество тепла, которое получает 1 кг пара в перегревателе найдется по разности

$$q_p = i_1 - i_2 = 769 - 656 = 113 \text{ ккал/кг.}$$

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

20. Как в p -диаграмме изображается состояние газа и как изображается процесс изменения состояния газа?

21. Укажите отличительные признаки процесса при постоянном объеме. Как изменятся в этом случае параметры состояния газа?

22. То же сделайте для процессов $p = \text{const}$ и $t = \text{const}$.

23. Что такое адиабатический процесс и за счет чего в нем совершается работа?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПРОРАБОТКИ

24. Избыточное давление в котле составляет 920 мм рт. ст. Выразить его в ат.

Отв.: 1,25 атм.

25. Разрежение в конденсаторе $h = 72 \text{ см}$. Определить абсолютное давление в ат, если показание барометра $B = 780 \text{ мм рт. ст.}$

Отв.: 0,0815 атм.

26. Показание манометра на паровой котле $p = 13 \text{ ат}$. Определить абсолютное давление пара в котле.

Отв.: 14 атм.

27. В закрытом баллоне нагревают газ: начальная его температура $t_1 = 20^\circ\text{C}$; конечная температура $t_2 = 150^\circ\text{C}$. Какое установится показание на манометре после нагревания, если начальное показание $p_1 = 0,5 \text{ ат}$.

Отв.: $p_2 = 1,16 \text{ ат}$.

28. Воздух нагревают в закрытом баллоне от $t_1 = 15^\circ\text{C}$ до $t_2 = 250^\circ\text{C}$. Подсчитать количество подведенного тепла, если количество воздуха в баллоне составляет $G = 2,7 \text{ кг}$.

Отв.: 109 ккал.

29. В воздушный подогреватель поступает в секунду $V = 20 \text{ м}^3$ воздуха при температуре $t_1 = 17^\circ\text{C}$; по выходе из подогревателя температура воздуха составляет $t_2 = 300^\circ\text{C}$. Подсчитать объем воздуха на выходе, считая, что нагревание воздуха происходит при $p = \text{const}$.

Отв.: $39,5 \text{ м}^3$.

30. Температура газов в топке котла $t_1 = 1200^\circ\text{C}$; температура этих же газов по выходе из котла $t_2 = 220^\circ\text{C}$. Определить, как изменился объем газов.

31. Через воздушный подогреватель проходит за час $G = 3000 \text{ кг}$ воздуха; начальная температура его $t_1 = 17^\circ\text{C}$, конечная $t_2 = 300^\circ\text{C}$. Подсчитать количество тепла, подведенное к воздуху. Считать $p = \text{const}$.

32. На паропроводе насыщенного пара манометр показывает 9 ат. Какова температура пара?

33. На паропроводе насыщенного пара термометр показывает $t = 180^\circ\text{C}$. Сколько должен показывать в этом случае манометр?

34. Найти теплосодержание пара с параметрами:

$$\text{а) } p_1 = 4 \text{ ата, } x = 0,96;$$

$$\text{б) } p_1 = 20 \text{ ата, } t = 220^\circ\text{C}.$$

35. Котельная отдает на производство $D = 10\,000$ кг пара. Из производства поступает вода при $t = 100^\circ\text{C}$. Подсчитать количество тепла, отпускаемое из котельной, если параметры состояния пара следующие:

$$p = 10 \text{ ата, } t = 240^\circ\text{C}.$$

36. Из перегревателя котла выходит пар при $p = 120$ ата, $t = 450^\circ\text{C}$. Подсчитать количество тепла, которое получает 1 кг пара в перегревателе, если из барабана котла в перегреватель поступает пар при $x = 0,99$.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

28. ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

В начале этой книги было сказано, что в природе имеются громадные запасы энергии в различных видах — в виде энергии топлива, воды рек, ветра. Из всех запасов энергии в настоящее время больше всего используется химическая энергия топлива, которая в результате процесса горения превращается в тепловую энергию. Этот вид энергии используется для целей нагревания как в быту, так и в производстве. Однако, человек нуждается в больших количествах и других видов энергии: механической и электрической. Механическая и электрическая энергия необходимы каждой фабрике, каждому заводу для приведения в движение машин и станков. Эти виды энергии необходимы также и для транспортных целей: для железнодорожного транспорта, водного, воздушного. В последние годы широко развилось применение механической и электрической энергии и в сельском хозяйстве (тракторы, привод сельскохозяйственных машин). Наконец, электрическая энергия вошла в быт как энергия, служащая для освещения не только в городе, но и в деревне.

Механическая энергия получается в теплосиловых установках за счет тепловой энергии топлива. Электрическая энергия в этих установках получается путем дальнейшего преобразования механической.

Первые тепловые двигатели, при помощи которых удалось сравнительно экономично получить механическую энергию за счет сжигания топлива, появились во второй половине XVIII века. В России И. И. Ползунов в 1763 г., а в Англии Джеймс Уатт в 1780 г. каждый в своей стране впервые сконструировал паровую машину для непосредственного привода заводских агрегатов.

В то время еще совсем не умели технически рассчитывать работу этих двигателей, но по мере того как их применение увеличивалось, стало очень важно получать механическую энергию, затрачивая как можно меньше топлива. Этим вопросом стали заниматься исследователи — физики и инженеры. В результате длительного изучения и наблюдения над явлениями преобразования тепловой энергии в механическую и механической в тепловую были установлены два закона, которым подчиняются эти явления. Наука о тепловой энергии и преобразовании ее в механическую носит название *термодинамики*, а законы, о которых идет речь, — *законов термодинамики*.

Первый закон термодинамики устанавливает количественные соотношения механической и тепловой энергии при взаимных преобразованиях. Таким образом он является частью общего закона сохранения и превращения энергии, касающегося вообще всех видов энергии.

Если в результате какого-либо процесса или при работе какой-нибудь машины исчезает 1 ккал тепла, то при этом за счет появляющейся механической энергии совершается 427 кгм работы. Напомним, что это соотношение называется *механическим эквивалентом тепла*; оно обозначается буквой *E*. Таким образом

$$E = 427 \text{ кгм/ккал.}$$

Обратно, если совершают 1 кгм механической энергии, то появляется $\frac{1}{427}$ ккал тепла; это соотношение называют *термическим эквивалентом работы* и обозначают буквой *A*. Таким образом

$$A = \frac{1}{427} \text{ ккал/кгм.}$$

На основании сказанного первый закон термодинамики можно выразить так: *при взаимных превращениях опре-*

деленному количеству исчезающей тепловой энергии соответствует вполне определенное количество механической энергии и наоборот.

Таково содержание первого закона. При помощи приведенных соотношений можно подсчитать эквивалентные количества энергии при взаимных превращениях.

Пример 21. Станок, потребляющий мощность в 3 л. с., работает 3 часа. Подсчитать количество работы в кгм и выделившееся тепло в ккал.

Известно что 1 л. с. = 75 кгм/сек; таким образом мощность станка может быть выражена так:

$$3 \text{ л. с.} = 3 \cdot 75 = 225 \text{ кгм/сек.}$$

Станок работал 3 часа, т. е. $3 \cdot 60 \cdot 60 = 10\,800$ сек., поэтому работа, совершенная им, составит

$$225 \cdot 10\,800 = 2\,430\,000 \text{ кгм.}$$

Так как за счет 1 кгм получается $\frac{1}{427}$ ккал тепла, то выделившееся количество тепла составит

$$2\,430\,000 \cdot \frac{1}{427} = 5\,690 \text{ ккал.}$$

Пример 22. В цилиндре с подвижным поршнем находится газ. На поршень положен груз. Нагреванием увеличили объем газа, причем к газу подведено было 100 ккал тепла. Вычислить, какую работу совершил газ если известно, что при этом 0,7 всего тепла пошло на нагревание самого газа.

По условию на нагревание газа пошло

$$100 \cdot 0,7 = 70 \text{ ккал.}$$

Остальное количество тепла исчезло. По первому закону термодинамики оно превратилось в механическую энергию, за счет которой и совершена работа поднятия груза. На это затрачено

$$100 - 70 = 30 \text{ ккал.}$$

Так как одной исчезающей килокалории тепла соответствует 427 кгм, то всего получено работы.

$$427 \cdot 30 = 12\,810 \text{ кгм.}$$

Как видно из приведенного примера 22, в тех случаях, когда к газу подводят тепло, оно частично идет на нагревание самого газа и частично на совершение работы. Не обязательно, чтобы распределение было такое, как указано в приведенном примере. В зависимости от поставленных условий это распределение может быть самое разнообразное. Количество тепловой энергии, которое идет на нагревание газа, передается молекулам, составляющим газ, иначе говоря, идет на увеличение его

внутренней энергии. Обозначим значение внутренней энергии в начале процесса буквой U_1 , а в конце процесса U_2 . Тогда количество тепла, пошедшее на изменение внутренней энергии, будет $U_2 - U_1$; эту разность обозначают ΔU (здесь Δ — греческая буква «дельта»; все обозначение читается — «дельта у»); таким образом

$$U_2 - U_1 = \Delta U.$$

Обозначим количество работы, совершенной газом, буквой W ; для того чтобы сложить количество тепла, пошедшее на изменение внутренней энергии и на совершенные работы, надо обе величины выразить в одних и тех же единицах измерения; изменение внутренней энергии обычно измеряют в *килокалориях*, а работу — в *кдж*; для того чтобы сложить эти величины, нужно W умножить на термический эквивалент работы $A = \frac{1}{427}$; в этом случае работа в *ккал* будет составлять AW ; таким образом общее количество тепла, пошедшее на изменение внутренней энергии и работу, составит

$$\Delta U + AW,$$

а вместе с тем согласно первому закону термодинамики эта сумма и составляет то количество тепла, которое подведено к газу. Если это количество тепла обозначить буквой Q , измеряя его в *ккал*, то можно написать

$$Q = \Delta U + AW. \quad (50)$$

Это равенство называют математическим выражением первого закона термодинамики. Его читают так: *подведенное к газу тепло расходуется на изменение внутренней энергии газа и на работу*.

В случае, когда происходит нагревание идеального газа, значение ΔU можно подсчитать по формуле (33), т. е.

$$\Delta U = Gc_v(t_2 - t_1). \quad (51)$$

Из этой формулы видно, что изменение внутренней энергии идеального газа определяется разностью температур газа.

Как видно из изложенного, первый закон термодинамики устанавливает только соотношения между количествами тепловой и механической энергии при их превращениях одной в другую; он ничего не говорит о том,

каким путем можно добиться такого превращения и всегда ли это возможно. Эти вопросы решаются вторым законом термодинамики.

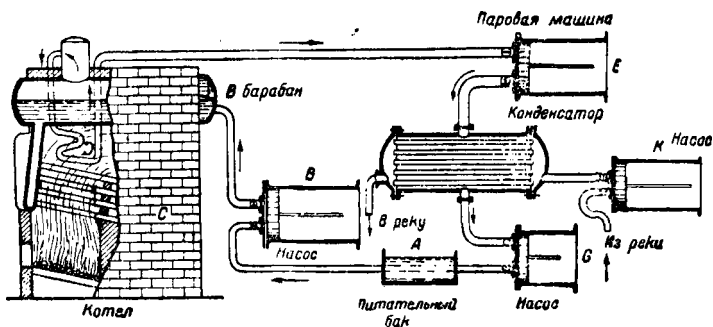
Наблюдения показывают, что между превращением тепловой энергии в механическую и механической в тепловую есть существенная разница. Проследим сначала превращение механической энергии в тепловую. Для этого рассмотрим, например, работу токарного станка. Станок потребляет определенное количество механической энергии, которая передается ему от электромотора или от трансмиссии. За счет большей части этой энергии он и производит работу снятия стружки резцом; при этом вследствие трения резца о металл происходит превращение этой части механической энергии в тепловую. Кроме того, некоторое количество механической энергии тратится на трение в шестернях и подшипниках, которые от этого нагреваются. В результате все количество полученной станком механической энергии превращается в тепловую.

Рассмотрим теперь превращение тепловой энергии в механическую, которое происходит в особых машинах, называемых машинами-двигателями. В дальнейшем мы подробно рассмотрим многие из таких двигателей, а здесь только обратим внимание на основную сторону их работы, а именно, установим условия, которые необходимо соблюсти, чтобы превратить тепловую энергию в механическую. Для этого рассмотрим схему установки, предназначенной для такого превращения. Она изображена на фиг. 75. Здесь C — котел, в котором за счет сжигания топлива получается водяной пар; по трубопроводу водяной пар направляется в цилиндр двигателя E (паровая машина — см. § 34).

Когда порция пара поступает в цилиндр двигателя, в нем происходит расширение пара; при этом поршень переходит от крайнего левого положения в крайнее правое; при расширении пар теряет часть подведенной к нему в котле тепловой энергии; взамен исчезнувшей тепловой энергии возникает механическая энергия движения поршня. После этого поршень начинает двигаться из крайнего правого положения в левое и выталкивает пар в особое устройство, называемое конденсатором; здесь, охлаждая пар холодной водой, отнимают от него значительную долю тепла, и он превра-

щается в воду (конденсат), которую при помощи насоса направляют сначала в питательный бак, а из него тоже насосом в котел. Одновременно новая порция пара поступает в цилиндр.

Такова в основном схема превращения тепловой энергии в механическую. Здесь описан, как говорят, один *цикл* машины-двигателя, под которым понимают совокупность изменений состояния рабочего тела, происшедших в период времени, в течение которого поршень, выйдя из начального положения, снова возвра-



Фиг. 75. Схема паросиловой установки.

щается в это же самое положение. Вся работа машины состоит из повторения таких циклов, вследствие чего она и называется *периодически действующей машиной*. В работе периодически действующего двигателя мы можем отметить следующую основную особенность. Рабочее тело, при помощи которого совершается процесс превращения тепловой энергии в механическую, должно получать тепло. Для этого имеется источник тепла (в нашем случае котел); его называют *верхним или горячим источником тепла*. Пусть за некоторый промежуток времени рабочее тело получило Q_1 ккал. В цилиндре двигателя в механическую энергию превратилась некоторая часть этого тепла. Остальная часть тепла, пусть это будет Q_2 ккал, была отнята от рабочего тела в конденсаторе и в механическую энергию не смогла быть превращена. Устройство, которому передано тепло Q_2 , в нашем случае — это кон-

денсатор, называется низшим или холодным источником тепла.

Таким образом только разность $Q_1 - Q_2$ (а не все тепло Q_1) в периодически действующем двигателе удастся превратить в механическую энергию.

За счет этой разности на основании первого закона термодинамики получается 427 ($Q_1 - Q_2$) кгм механической энергии.

Пусть, например, за один цикл рабочее тело получает из верхнего источника 100 ккал тепла, а 80 ккал отдает нижнему источнику. Таким образом исчезает в виде тепла 20 ккал. Согласно первому закону если 1 ккал тепла преобразуется в механическую энергию, то за ее счет совершается 427 кгм работы. Общее количество полученной механической энергии составит

$$20 \cdot 427 = 8540 \text{ кгм.}$$

Итак, в периодически действующей машине нельзя превратить в механическую энергию все тепло, полученное из какого-либо одного источника. Это положение и составляет содержание второго закона термодинамики.

Существуют и другие схемы, по которым работают двигатели. Например, в некоторых из них пар из двигателя выбрасывается в атмосферу, а вместо него в котел поступает новая порция воды. Существуют двигатели, рабочим телом в которых служит не водяной пар, а газы. Однако для всех схем является необходимым как сообщение, так и отнятие тепла от рабочего тела, иначе говоря, все они подтверждают невозможность превращения в механическую энергию всего тепла, полученного из верхнего источника.

Так как от одного из источников рабочее тело получает тепло, а другому рабочее тело отдает тепло, оба источника должны быть различной температуры; таким образом второй закон термодинамики устанавливает необходимость иметь перепад температур для преобразования тепловы энергии в механическую.

Зная количество тепла, подведенное к рабочему телу из верхнего источника (Q_1), и количество тепла, превращенное в механическую энергию ($Q_1 - Q_2$), можно оценить степень совершенства процесса превращения

тепла в работу. Для этого нужно узнать, какую долю составляет $(Q_1 - Q_2)$ от Q_1 , т. е. узнать частное

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

Это частное называют термическим коэффициентом полезного действия (сокращенно пишут «термический к. п. д.»). Его обозначают греческой буквой η (эта) со значком t , т. е. η_t . Итак

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (52)$$

29. ЦИКЛ КАРНО

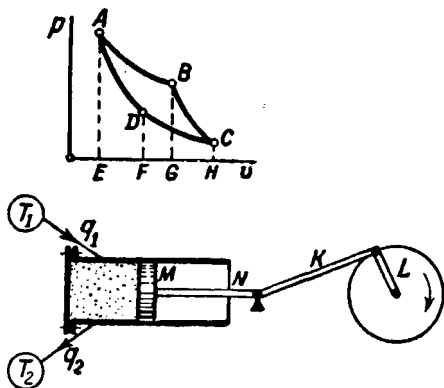
Когда не был еще широко известен закон сохранения и превращения энергии, в частности первый закон термодинамики, делалось много попыток построить такой двигатель, который производил бы энергию «из ничего», т. е. такой двигатель, который вырабатывал бы механическую энергию, не потребляя при этом сам топлива или какой-либо другой энергии. Этот двигатель получил название «перпетуум мобиле» (вечный двигатель). Когда закон сохранения и превращения энергии был окончательно утвержден, то стало ясно, что «перпетуум мобиле» построен быть не может.

Были попытки и другого рода — создать такой двигатель, который превращал бы в механическую энергию все тепло, которое получено им из какого-либо источника, не отдавая при этом тепла какому-либо другому источнику более низкой температуры. Такой двигатель позволил бы использовать огромные запасы тепла, например, тепла воды в морях и океанах. Долголетний практический опыт построения двигателей, приведший к установлению второго закона термодинамики, показал, что построение такого периодически действующего двигателя также невозможно.

Двигатель, противоречащий второму закону термодинамики, получил название перпетуум мобиле второго рода, в то время как двигатель, противоречащий первому закону термодинамики — перпетуум мобиле первого рода.

При проектировании и построении двигателей стремятся к тому, чтобы они расходовали возможно меньше топлива на каждую единицу вырабатываемой механической энергии. Поэтому большой интерес представляет вопрос о том, какую максимальную долю тепла, подводимого к рабочему телу из верхнего источника, можно превратить в механическую энергию. Этот вопрос разрешил французский инженер и ученый Сади Карно в 1824 г. Он показал, какой цикл должно совершать рабочее тело, иначе говоря, как должно изменяться его состояние в двигателе для того, чтобы превращение тепла в механическую энергию было максимальное, и вместе с тем он показал, как определить термический к. п. д. такого цикла.

Цикл Карно состоит в следующем (фиг. 76). Пусть в цилиндре с поршнем находится 1 кг рабочего тела. Верхний источник обозначим кружком и назовем его T_1 , температура его пусть будет также T_1 ; нижний источник назовем T_2 и пусть его температура будет T_2 . Рабочее тело получает из верхнего источника тепло так, что температура газа все время остается равной температуре источника тепла T_1 (абсолютная температура); иначе говоря, рабочее тело расширяется изотермически. Для наглядности представим изменение состояния рабочего тела в p - v -диаграмме, которую расположим над нашим цилиндром. Линия AB представляет собой расширение рабочего тела в изотермическом процессе. В точке B заканчивается изотермический процесс подвода тепла, и далее рабочее тело расширяется адиабатически; для этого нужно предположить, что цилиндр в это время хорошо изолирован от обоих источников тепла и от внешней среды и не обменивается с ними теплом. Линия BC



Фиг. 76. Цикл Карно.

в p - v -диаграмме изображает адиабатическое расширение рабочего тела: она идет вниз круче, чем AB . На этом расширение рабочего тела заканчивается. Во время всего расширения — изотермического и адиабатического — рабочее тело совершило работу, измеряемую площадкой $ABCHEA$. Эта работа при помощи поршня M , штока N , шатуна K и кривошипа L передается на вал машины и приводит его во вращение. Для того чтобы можно было повторить снова расширение рабочего тела, поршень нужно вернуть в обратное положение. Теперь уже вал, вращаясь за счет работы, совершенной перед этим рабочим телом, будет через передачу L, K, N двигать поршень M влево. При этом будем производить сначала изотермическое сжатие рабочего тела по линии CD . Оно сопровождается отнятием от рабочего тела тепла; это тепло передается низшему источнику тепла T_2 . После изотермического сжатия рабочее тело сжимается адиабатически (линия DA), для чего вал совершит опять некоторое количество работы; общее количество работы, совершенное для сжатия рабочего тела, измеряется площадью $ADCHEA$; на этом один период или, как говорят, один цикл заканчивается, и рабочее тело может повторить его снова. За один цикл при расширении рабочее тело передало на вал количество работы, измеряемое площадью $ABCHEA$, а на сжатие затрачено валом количество работы, измеряемое меньшей площадью $ADCHEA$. Разность этих площадей равна площади $ABCD$, которая и представляет ту работу, которую в результате всего цикла произвел двигатель. Эта работа может быть при помощи трансмиссии снята с вала и использована для вращения станков и машин или для производства электрической энергии.

Карно подсчитал термический к. п. д., который получается для описанного здесь цикла. Для этого нужно рассчитать значения Q_1 и Q_2 , чтобы воспользоваться формулой (52). Однако это не обязательно. Как показал Карно, значение термического к. п. д. для предложенного им цикла можно подсчитать, зная значения абсолютных температур источников, участвующих в цикле. А именно: значение термического к. п. д. цикла Карно можно получить по формуле:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (53)$$

Здесь T_1 — абсолютная температура горячего источника, а T_2 — абсолютная температура холодного источника.

Из приведенной формулы видно, что термический к. п. д. тем больше, чем меньше дробь $\frac{T_2}{T_1}$; чтобы эта дробь имела малое значение, нужно, чтобы значение T_2 было как можно меньше, а T_1 как можно больше.

Пользуясь этой формулой, можно установить, чему равнялось бы значение термического к. п. д. для паросиловых установок, если бы они работали по циклу Карно. В паросиловых установках в качестве холодного источника, которому рабочее тело отдает тепло, используют воду рек и озер; в среднем можно считать, что температура воды в реках и озерах за год составляет 10°C . При этом температура рабочего тела, выходящего из двигателя, несколько выше; будем считать ее равной 30°C . Таким образом $T_1 = 30 + 273 = 303^\circ\text{K}$.

Наибольшая температура рабочего тела — водяного пара, которая в настоящее время применяется, составляет около 500°C , т. е. для современных паросиловых установок можно считать $T_2 = 500 + 273 = 773^\circ\text{K}$. Если теперь подставить найденные значения в формулу (53), получим для цикла Карно в паросиловых установках

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{303}{773} = 0,61.$$

Из приведенного расчета видно, что максимальная доля тепла, которая может быть превращена в работу в цикле Карно, для заданных температур составляет всего 61%.

Подробное теоретическое изучение циклов показывает, что нельзя найти цикл, работая по которому, можно было бы при данных температурах источников тепла получить термический к. п. д. больше, чем это удастся получить в цикле Карно для тех же температур источников. При этом же доказывається, что термический к. п. д. цикла Карно не зависит от того, какое выбрать рабочее тело — тот или иной газ, пар и т. п.

Однако в действительности построить машину, которая могла бы работать точно по циклу Карно, невозможно, так как трудно, а иногда и невозможно осуществить в точности изотермические и адиабатические про-

цессы. Кроме того, при работе двигатель имеет ряд неизбежных тепловых потерь — на излучение, пропуск пара, трение, которые также уменьшают долю тепла, могущую быть превращенной в работу. Поэтому к. п. д. в паросиловых установках, в которых вырабатывается электрическая энергия, в действительности значительно ниже, чем подсчитанный нами.

В дальнейшем будет показано, какие мероприятия проводят в теплоэнергетике для того, чтобы повысить использование тепла топлива.

30. ЦИКЛЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

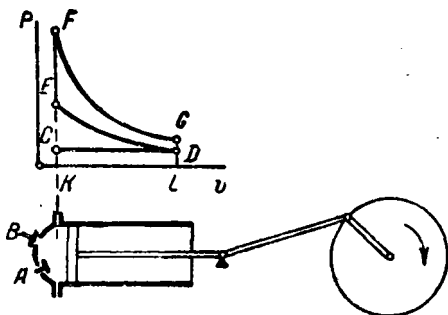
Все машины-двигатели, которыми в настоящее время пользуются в энергетике, разделяют на два больших класса: один из них — это двигатели внутреннего сгорания, другой класс — паровые двигатели. Двигатели внутреннего сгорания получили такое свое название потому, что в них сгорание топлива происходит внутри самого двигателя; в паровых же двигателях сгорание топлива и приготовление рабочего тела — водяного пара — происходит отдельно, в паровом котле.

Мы сначала рассмотрим работу двигателей внутреннего сгорания. Эти двигатели используют жидкое или газообразное топливо. Жидкое топливо перед сжиганием испаряется или распыляется в воздухе.

Один из типов двигателей внутреннего сгорания, нашедший широкое распространение, главным образом, как двигатель для транспортных установок (автомобиль, трактор, самолет), работает по циклу, отличительным признаком которого является *подвод тепла к рабочему телу при постоянном объеме*. Как всегда поступают при изучении циклов, мы при рассмотрении этого цикла упростим сложные явления, происходящие в двигателе, для того чтобы обратить свое внимание на основной принцип его работы; оставляя в стороне ряд побочных явлений, происходящих в двигателе, мы таким образом рассматриваем его работу теоретически, т. е. рассматриваем так называемый «идеальный двигатель».

На фиг. 77 представлена схема такого двигателя, а над ним упрощенная диаграмма изменения давления при изменении объема газа в цилиндре.

Рассмотрим работу такого двигателя. При первом ходе поршня слева направо через впускной клапан *A*, устроенный в крышке, в цилиндр поступает горячая смесь, представляющая собой смесь горючего газа или паров жидкого топлива с воздухом. Давление в цилиндре при этом почти не меняется, а изменение объема между поршнем и крышкой при этом представится на диаграмме линией *CD*. Когда поршень приходит в крайнее правое положение, клапан *A* закрывается. Затем поршень начинает двигаться справа налево и при этом



Фиг. 77. Цикл двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при постоянном объеме.

сжимает горючую смесь. Сжатие происходит достаточно быстро, и при теоретическом рассмотрении можно не считаться с обменом тепла между газом и стенкой; иначе говоря, можно считать, что происходит адиабатическое сжатие; при этом давление и температура газов повышаются. Процесс сжатия представлен на диаграмме линией *DE*. В момент, когда поршень приходит снова в крайнее левое положение, происходит зажигание горючей смеси (например, при помощи электрической искры). При сгорании смеси выделяется тепло, которое идет на нагревание образовавшихся продуктов сгорания.

Нагревание продуктов сгорания происходит очень быстро, поршень при этом не успевает заметно продвигаться, так что этот процесс можно считать происходящим при постоянном объеме. На диаграмме он изобразится изохорой *FE*. Такой подвод тепла является основной характеристикой цикла.

В дальнейшем газ адиабатически расширяется (линия FG), а поршень передвигается опять слева направо; когда он доходит до крайнего правого положения, открывается выпускной клапан B , и газы уходят из цилиндра; при этом давление падает, что изображается на диаграмме изохорой GD . После этого поршень начинает двигаться справа налево и выталкивает оставшуюся в цилиндре часть газов. Когда поршень приходит в свое крайнее левое положение, цикл заканчивается и может быть повторен вновь.

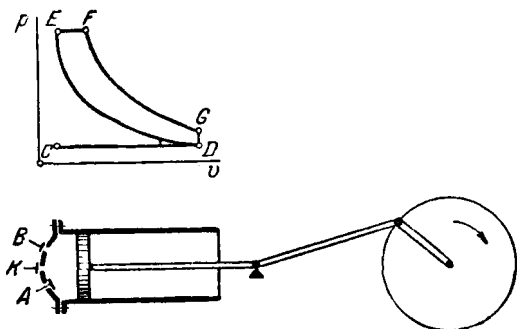
В течение всего цикла поршень совершил два раза путь слева направо и два раза справа налево, всего четыре раза или, как говорят, совершил четыре такта. Такой двигатель называется четырехтактным. Из всех четырех тактов только в одном, третьем, получается работа, заставляющая поршень двигаться и вращать вал. В остальных трех тактах, наоборот, поршень движется благодаря уже вращающемуся валу с маховиком, в котором запасена механическая энергия от предыдущих циклов, или за счет других цилиндров, связанных с тем же валом. Иногда впуск горючего газа и выпуск продуктов сгорания осуществляют при помощи особого насоса, назначение которого состоит в том, чтобы быстро вытолкнуть продукты сгорания и заполнить цилиндр свежей смесью. Тогда отпадают самостоятельные такты засасывания и выталкивания продуктов сгорания; двигатель становится двухтактным. В четырехтактном двигателе за один цикл происходит два оборота вала, а в двухтактном — один.

На диаграмме можно проследить, какое количество работы передано рабочим телом валу машины за один цикл. Площадь $KFGLK$ измеряет работу расширения, совершенную во время третьего такта, а площадь $EDLKE$ — работу, затраченную на сжатие во втором такте. Таким образом в результате всего цикла полезная работа измеряется площадью фигуры $FGDEF$. (Работа, полученная в первом такте, равна работе, затраченной в течение четвертого такта; поэтому в результате этих двух тактов работа равна нулю.)

Из рассмотрения этого цикла мы видим, что и здесь, как и в цикле Карно, площадь внутри диаграммы, описывающей цикл, измеряет работу, совершаемую рабочим телом в двигателе.

Рассмотрим теперь другой двигатель внутреннего сгорания (фиг. 78), характерным признаком которого является подвод тепла к рабочему телу при постоянном давлении.

В этом двигателе при движении поршня слева направо засасывается через впускной клапан *A* не горючая смесь, как в рассмотренном ранее цикле, а воздух (линия *CD*). Когда поршень приходит в крайнее правое



Фиг. 78. Цикл двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при постоянном давлении.

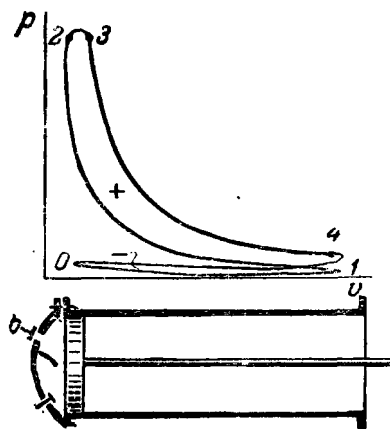
положение, впускной клапан закрывается, и при следующем такте, т. е. когда поршень движется справа налево, воздух сжимается (линия *DE*). При сжатии температура воздуха сильно повышается. В начале третьего такта открывается клапан *K* (форсунка) для впуска топлива. Жидкое топливо впрыскивается в цилиндр и здесь самовозгорается, попадая в горячий ($600\text{--}800^\circ\text{C}$) воздух.

Подвод топлива происходит постепенно и производится таким образом, чтобы при расширении давление оставалось без изменения. Такой подвод тепла является характерным признаком этого цикла. На диаграмме эта часть третьего такта изобразится в виде прямой *EF*, параллельной оси абсцисс. В точке *F* подвод топлива заканчивается, и газы продолжают расширяться без подвода и отвода тепла от рабочего тела, т. е. дальнейшее расширение во время третьего такта теоретически происходит по адиабате: на диаграмме это будет представлено линией *FG*. Когда заканчивается третий такт, открывается выпускной клапан *B*, и давление газа в

цилиндре сразу падает до атмосферного; это изображается на диаграмме линией GD . При следующем движении поршня справа налево, т. е. во время четвертого такта, происходит выталкивание продуктов сгорания из цилиндра (линия DC). Так заканчивается описываемый цикл. И здесь при применении продувочного насоса вместо четырех тактов можно получить всего два такта.

Двигатели, работающие по этому циклу, называются «дизелями» по имени конструктора Дизеля, предложившего такой цикл.

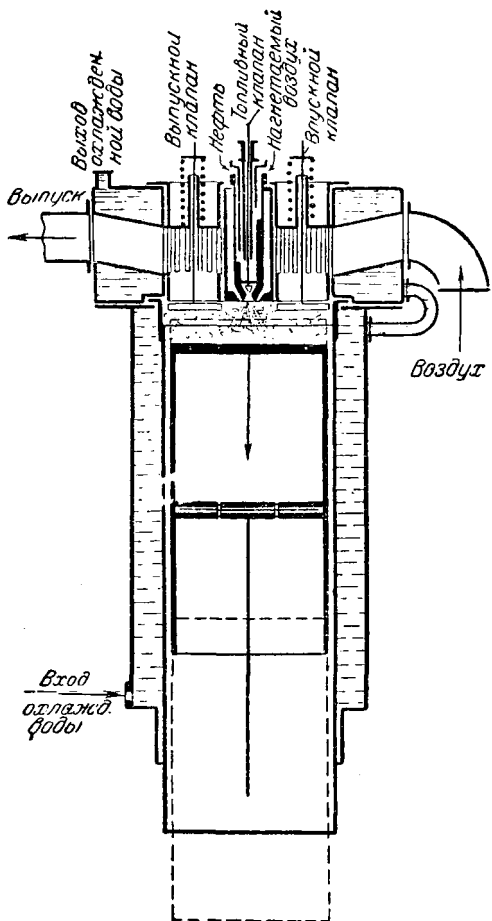
В действительности процесс в двигателях происходит не так просто, как в идеальном двигателе. Поэтому и диаграмма, в которой изображается изменение давления при движении поршня, у действительных двигателей имеет несколько другой вид. Такую диаграмму для действительного двигателя можно получить при помощи особого прибора, называемого индикатором. Этот прибор вычерчивает величину давления газа в цилиндре двигателя по ходу поршня.



Фиг. 79. Индикаторная диаграмма цикла с подводом тепла при постоянном объеме.

В результате получается изображение цикла за четыре такта. Получаемая диаграмма носит название индикаторной диаграммы. Она служит для подсчета работы, производимой двигателем. Кроме того такая диаграмма позволяет выявить имеющиеся у двигателя недостатки.

На фиг. 79 изображена индикаторная диаграмма двигателя, работающего по циклу с подводом тепла при постоянном объеме. Площадь диаграммы, в которой стоит знак плюс (+), измеряет работу газа в цилиндре: она положительная; площадь, в которой стоит знак минус (-), показывает потерю работы в результате засасывания воздуха и выталкивания продуктов сгорания.



Фиг. 80. Разрез цилиндра двигателя Дизеля.

Отрицательной она получилась потому, что на выталкивание продуктов сгорания тратится больше работы, чем получается при засасывании горючей смеси.

На фиг. 80 изображен разрез по цилиндру двигателя Дизеля. На этом чертеже видно, что цилиндр и крышка двигателя охлаждаются водой. В крышке размещены следующие устройства: справа подача воздуха (помечено словом «воздух»), слева — труба для выхлопа отработавших газов («выпуск»); сверху в крышке слева направо расположены следующие устройства: выход охлаждающей воды, выпускной клапан, при поднятии которого газы из цилиндра поступают в выхлопную трубу; впускной клапан, через который смесь топлива и воздуха поступает в цилиндр; слева от этого клапана имеется место для подвода нефти, а справа — для воздуха, служащего для распыливания нефти («нагнетаемый воздух»); далее расположен впускной клапан для воздуха, поступающего в цилиндр при первом такте, и наконец, в нижней части цилиндра расположено отверстие для впуска охлаждающей воды.

31. БАЛАНС ТЕПЛА. МОЩНОСТЬ ДВИГАТЕЛЯ. РАСХОД ТОПЛИВА

Интересно проследить, на что расходуется тепло в двигателе внутреннего сгорания, т. е. ознакомиться, как говорят, с балансом тепла в нем. Рассмотрим в общих чертах, на что расходуется энергия, выделяющаяся при сгорании топлива в цилиндре двигателя.

Часть тепла превращается в механическую энергию вращения вала машины. Частное от деления количества тепла, превращенного в полезную работу вращения вала, на все количество тепла, выделяющееся при сгорании топлива, называют **эффektivным к. п. д.** Механическая энергия, полученная на валу двигателя в единицу времени, называется **эффektivной мощностью двигателя**.

Газы, выходящие из двигателя, хотя и имеют высокую температуру, но для получения механической энергии уже не используются, и в этом смысле их тепловая энергия считается потерянной. Эту потерю называют **потерей с отходящими газами**.

Часть тепловой энергии, выделяющейся при сгорании, уносится водой, охлаждающей двигатель. Эта теп-

лота также не используется для превращения ее в механическую энергию и считается потерянной. Эту потерю называют потерей с охлаждающей водой. И, наконец, некоторая часть тепла теряется в окружающую среду, нагревая воздух машинного зала.

Если принять за единицу тепло топлива, выделившееся при сгорании, то для двигателя Дизеля средней экономичности распределение тепла по указанным статьям расхода будет следующее. В механическую энергию переходит около 0,32 всего тепла; с охлаждающей водой уходит 0,28, с отходящими газами и в окружающую среду 0,32; остальные 0,08 тепла тратятся на трение и на нагнетание воздуха. Часто распределение тепла указывается на 100 единиц тепла топлива; в этом случае получается распределение тепла в процентах:

в механическую энергию переходит	32%
потеря с охлаждающей водой	28%
" " отходящими газами и в окружающую среду	32%
потеря на трение и компрессор	8%

Итого 100%

Следует обратить внимание на тепловую энергию, уходящую вместе с газами из цилиндра двигателя. Это тепло не превращается в механическую энергию и уходит в атмосферу; в данном случае это тепло и является тем теплом Q_2 , которое согласно второму закону термодинамики должно быть передано холодному источнику.

Использование тепла в двигателях внутреннего сгорания можно значительно повысить, если принять меры к тому, чтобы не пропадала бесполезно вода, вышедшая из двигателя после охлаждения цилиндра и его крышки. Эта вода может быть использована для каких-либо хозяйственных целей, в частности для отопления помещений. Также и газы, выходящие из двигателя, имеют достаточно высокую температуру и могут быть использованы для нагревательных целей.

Однако такое использование тепла встречается редко, потому что двигатели внутреннего сгорания употребляются чаще в передвижных, как говорят, нестационарных установках (автомобиль, самолет), где использование тепла отходящих газов и охлаждающей воды

чрезвычайно ограничено (главным образом это тепло может быть использовано для обогрева кабин). В стационарных же установках, где тепло легче использовать, двигатели внутреннего сгорания применяют реже, в основном потому, что они работают на дорогом и дефицитном жидком топливе.

Для стационарных установок применяют, главным образом, паровые двигатели, так как для них может быть использовано любое низкосортное топливо.

Мощность, полученную на валу двигателя (она называется эффективной мощностью), обычно измеряют в лошадиных силах; если речь идет о мощности, снимаемой с вала двигателя, то говорят о мощности в «эффективных лошадиных силах». Так, если мощность двигателя 50 эффективных лошадиных сил (э. л. с.), то это значит, что мощность 50 л. с. может быть получена на валу двигателя.

Если для какого-либо двигателя известен эффективный к. п. д. (его обозначают η_e — греческая буква «эта» со значком e), то расход топлива на эффективный силочас (э. с. ч.) может быть определен по формуле

$$b = \frac{632}{Q\eta_e} \text{ кг/э. с. ч.} \quad (54)$$

Смысл приведенной формулы становится понятным из следующих соображений: Q — это теплотворная способность топлива, т. е. то количество тепла в ккал , которое выделяется при сгорании 1 кг топлива; так как η_e учитывает долю тепла, превращаемого в механическую энергию, то произведение $Q\eta_e$ дает в ккал количество тепла, которое переходит в работу на валу двигателя при сжигании 1 кг топлива. Так как получение одного силочаса на валу (э. с. ч.) равносильно получению 632 ккал , то нужно, очевидно, на 1 силочас затратить столько килограммов топлива, сколько раз произведение $Q\eta_e$ содержится в 632. Это можно узнать, разделив 632 на $Q\eta_e$. Так и поступают по формуле (54).

Наоборот, если испытанием найден расход топлива на эффективный силочас, то эффективный к. п. д. может быть вычислен по формуле

$$\eta_e = \frac{632}{Qb} \quad (55)$$

Смысл этой формулы понятен из следующих соображений: произведение Qb представляет собой количество килокалорий, затраченных на получение 1 э. с. ч.; значит, для того, чтобы узнать долю тепла, перешедшего в работу на валу, т. е. η_e , нужно разделить 632 на произведение Qb . Это и будет значение эффективного к. п. д. двигателя.

Пример 23. Двигатель внутреннего сгорания мощностью в 200 э. л. с. при полной нагрузке расходует 40 кг нефти в час. Теплотворная способность нефти $Q = 10\,000$ ккал/кг. Найти эффективный к. п. д. двигателя.

Вычислим сначала расход топлива на эффективный силочас:

$$b = \frac{40}{200} = 0,2 \text{ кг/э. с. ч.}$$

Далее по формуле (55) находим

$$\eta_e = \frac{632}{10\,000 \cdot 0,2} = 0,316,$$

или в процентах $\eta_e = 31,6\%$.

32. ТОПЛИВО И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Важнейшими видами топлива являются каменный и бурый уголь, нефть и продукты ее переработки (бензин, керосин), торф, дрова. В качестве топлива используют также сланцы, естественный газ, различные отходы производства. Как видно, топливо может быть в трех, как их называют, агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном.

До Великой Октябрьской революции Россия считалась страной с недостаточными топливными ресурсами. Установление такого взгляда было выгодно тем торгово-промышленным кругам, которые были заинтересованы в том, чтобы промышленность России не развивалась. Проведенные при Советской власти работы по разведке топливных месторождений в корне опровергли это утверждение. Советский Союз обладает громадными топливными ресурсами, которые могут обеспечить бурное развитие промышленности. По данным Международного геологического конгресса 1937 г. Советский Союз занимал второе место в мире по запасам ископаемых углей, а по запасам торфа и по количеству лесов — первое место в мире.

В последнее десятилетие разведывательные работы продолжались, и в стране обнаружены новые месторождения всех видов топлива (угля, нефти, газа).

Перед войной добыча топлива в СССР очень быстро росла.

В 1913 г. ископаемых углей было добыто по всем районам СССР 29 млн. т. В 1935 г. добыча возросла до 109 млн. т. В 1941 г. по плану развития народного хозяйства СССР, принятому XVIII Всесоюзной конференцией ВКП(б), добыча каменного угля должна была составить 191 млн. т.

По добыче торфа СССР занимает первое место в мире, по добыче нефти — второе после США.

Во время войны, когда ряд областей, богатых углем (Донецкий каменноугольный бассейн), и некоторые месторождения нефти временно были заняты врагом и не могли быть использованы для добычи топлива, очень сильно стали развиваться восточные угленосные районы (Кузнецкий бассейн, Карагандинский и др.). Быстрыми темпами стала расти добыча нефти в новых районах Урала («Второе Баку»). В начале Отечественной войны 1941 г. в районе Средней Волги (Куйбышев) были разведаны большие запасы естественного высококалорийного газа. В короткий срок была организована добыча его, и газ заменил собой привозное топливо (уголь, мазут), которым до этого времени пользовались. Он нашел применение как в быту, так и в промышленности.

Большие запасы естественного газа имеются и в Западной Украине.

Новые топливные базы Советского Союза быстро развернули добычу и не только стали снабжать топливом местную промышленность, но и явились источником топливоснабжения дальних предприятий и транспорта. Помимо отмеченных, источником дальнего топливоснабжения в последние годы явился получивший быстрое развитие Печорский каменноугольный бассейн.

Закон о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг., принятый первой сессией Верховного Совета СССР в 1946 г., определяет дальнейший бурный рост добычи топлива. Согласно этому закону в последний год планируемого пятилетнего плана (1950 г.) должно быть добыто

Угля	250	млн. т
Нефти	35,4	" "
Торфа	44,3	" "
Газа	10,3	млрд. м ³

Вместе с тем принятый закон ставит в качестве важнейшей задачи угольной промышленности улучшение качества угля путем его обогащения, рассортировки и брикетирования.

Газообразное топливо имеет существенные преимущества перед другими топливами. Его легко транспортировать по трубам; его легче сжигать под котлами и, наконец, оно значительно лучше твердого по гигиеническим соображениям, так как с отходящими газами не улетает в трубу зола, засоряющая окрестности.

Эти преимущества делают выгодным транспортировку газа на далекие расстояния и определяют богатые перспективы использования газообразного топлива. В 1943 г. вступил в эксплуатацию газопровод Бугуруслан—Куйбышев длиной 180 км. В 1945 г. было приступлено к сооружению газопровода Саратов—Москва длиной 850 км и в 1946 г. он вступил в эксплуатацию. В 1948 г. вступили в действие газопроводы Дашава—Киев протяженностью 525 км и Кохляярва—Ленинград; последний базируется на переработке сланцев в газ. Ряд показателей говорит о наличии залежей газа и в других местах Советского Союза.

Высокосортными топливами считают также каменный уголь и нефтяные топлива. Они имеют большую теплотворную способность и удобны для сжигания. Но из соображений общегосударственной выгоды наиболее целесообразно на электростанциях сжигать местное низкосортное топливо, которое имеется почти во всех более или менее значительных районах Союза. Так, в Белоруссии, Литве, Латвии, на Севере РСФСР и в Сибири имеются большие запасы торфа, на Украине, Урале, в Сибири и центральной части РСФСР — залежи бурых углей, в Ленинградской области, на Волге, в Эстонии — залежи сланцев. Ввиду того, что эти виды топлива содержат в себе много влаги и золы, перевозить их на далекие расстояния невыгодно, а в военное время такая перегрузка транспорта вообще недопустима; поэтому такие топлива и должны быть использованы поблизости от места добычи. В последние

годы советская теплотехника добилась значительных успехов в их сжигании.

Всемерное развитие местных топлив является одной из основных черт плановой топливной политики СССР. Это же обстоятельство было отправным в решениях плана ГОЭЛРО. Планомерно проводившееся в течение ряда лет со времени организации советской власти оно оказалось одним из факторов, обеспечивших военную мощь страны во время Отечественной войны.

В последние годы до 30% всей вырабатываемой электроэнергии относится к станциям, работающим на буром угле, 10% — на торфу; при этом надо иметь в виду, что бурый уголь до Октябрьской революции не использовался, а на торфу работала одна небольшая электростанция.

Местное топливо используется путем сжигания его под котлами, в которых готовится водяной пар — рабочее тело для паровых двигателей. Такие установки получили название паросиловых установок.

В последние годы советская теплотехника ведет работу по изысканию рациональных методов газификации топлив, т. е. превращения твердых топлив в газообразные в специальных установках, называемых газогенераторами.

Газификация дает возможность в тех случаях, когда это выгодно, вместо паровых двигателей применять и двигатели внутреннего сгорания. Применение газогенераторов на автомобилях экономит большие количества бензина, остро необходимого для специальных нужд.

Говоря о газификации, необходимо указать, что в Советском Союзе начаты впервые в мире работы по так называемой подземной газификации. Этот способ газификации заключается в том, что топливо превращают в газ под землей в самой залежи, а на поверхности получают уже готовый газ.

Впервые высказал идею подземной газификации великий русский химик Д. И. Менделеев в конце прошлого века. Создатель Советского государства В. И. Ленин придавал этой идее громадное значение, и в 1931 г. решением Партии и Правительства было приступлено к реализации этой идеи. Великий смысл ее, как указывали В. И. Ленин и Д. И. Менделеев, заключается в том, чтобы освободить человека от тяжелого труда под землей.

Надо, однако, сказать, что газификация местных топлив как в газогенераторах, так и путем подземных методов еще не получила широкого технического применения для электростанций, поэтому электростанции, потребляющие местное топливо, в основном выполняются как паросиловые установки, т. е. такие, в которых рабочим телом, при помощи которого осуществляется процесс превращения тепла в работу, является водяной пар. Разумеется, помимо местных и малоценных видов топлива в паросиловых установках может использоваться и высококачественное твердое и жидкое топливо.

Топлива даже одного и того же агрегатного состояния сильно различаются друг от друга по своим свойствам; от этих свойств во многом зависит как конструкция топki, в которой происходит сжигание топлива, так и конструкция котла, под которым будут сжигать данный вид топлива.

Для того чтобы оценить свойства топлива, нужно знать его элементарный состав, т. е. знать, из каких элементов и в каком их количестве состоит топливо. Элементарный состав топлива определяют в лаборатории.

Топливо, которое поступает в топку котла для сжигания, называют рабочим топливом.

Рабочее топливо состоит из следующих элементов: углерода (С), водорода (Н), азота (N) и кислорода (O). Кроме этих образующих основную или, как говорят, органическую массу топлива, в него входят нежелательные примеси; к их числу относятся сера (S), зола (A) и влага (W). Буквы, стоящие в скобках, обозначают не только составные части, но измеряют в процентах и весовые количества их в топливе; когда эти обозначения относятся к рабочему топливу, около каждого из них вверху ставят русскую букву *р*. Таким образом состав рабочего топлива в процентах принято записывать так:

$$C^p + H^p + N^p + O^p + S^p + A^p + W^p = 100\%.$$

Горючими элементами в топливе являются углерод, водород и отчасти сера. От содержания углерода и водорода главным образом и зависит количество тепла, выделяющееся при сгорании одного килограмма топли-

ва. Это количество тепла называют теплотворной способностью топлива и измеряют его в *ккал/кг*.

Теплотворную способность газообразных топлив чаще измеряют количеством тепла, выделяющимся при сгорании 1 м^3 газа, взятого при нормальных условиях; единицей измерения в этом случае служит *ккал/м³*.

Последние две составные части A^p и W^p нежелательны в топливе; они образуют его балласт, т. е. ненужную вредную часть; к балласту часто относят и серу, так как образующийся из нее при горении сернистый газ SO_2 вреден для металла котла и окружающей местности.

Зола представляет собой негорючие механические примеси в топливе; влага потому балластная примесь, что при горении она переходит в газообразное состояние — водяной пар, на что тратится часть тепла, выделившегося при горении топлива.

В зависимости от того, в каком состоянии, жидком или газообразном, находится вода в продуктах сгорания, различают теплотворную способность высшую и низшую. Если продукты сгорания охлаждены до столь низкой температуры, что водяной пар превращается в жидкость и при этом освобождает скрытую теплоту парообразования, то получившееся в результате горения количество тепла составляет высшую теплотворную способность топлива. Если же продукты горения топлива имеют в своем составе водяной пар — газообразное тело, образовавшееся при горении за счет тепла, отнятого влагой, то получившееся в результате горения тепло составляет низшую теплотворную способность топлива. Очевидно, разница между высшей и низшей теплотворной способностью представляет собой то количество тепла, которое необходимо для превращения в пар всей воды, имеющейся в продуктах сгорания, а именно — влаги рабочего топлива и воды, образовавшейся при химическом соединении водорода топлива с кислородом.

В котельных установках газы покидают котел при таких температурах, при которых, водяной пар, находящийся в них, не конденсируется, а потому с ним уходит тепло, пошедшее на образование пара; таким образом при горении топлива в котельных установках

мы можем использовать лишь его низшую теплотворную способность. Для рабочего топлива ее обозначают Q_n^p . Именно эта теплотворная способность входит в формулы, приведенные в предыдущей главе. В табл. 8 приведены данные по теплотворной способности некоторых топлив. Более подробные данные по составу топлив приводятся в специальном курсе.

Горение топлива под котлом — сложный химический процесс, который требуется правильно организовать. Прежде всего необходимо подвести потребное количество воздуха.

Формула химической реакции позволяет подсчитать количество веществ, вступающих в химическое взаимодействие между собой, и количество получающихся продуктов. На основании формул горения, приведенных в § 7, можно подсчитать количество воздуха, необходимого для того, чтобы произошло горение углерода, водорода и серы, находящихся в топливе. Так, подсчитанное количество воздуха называют теоретически необходимым количеством и обозначают V_0 . Его измеряют в кубических метрах на 1 кг топлива, введенного в топку; таким образом единицей измерения будет служить $м^3/кг$.

Если в топку ввести теоретически необходимое количество воздуха, то трудно будет обеспечить полное соединение его кислорода с горючими частями топлива, так как невозможно совершенно равномерно перемещать топливо и воздух. Поэтому произойдет неполное сгорание углерода; в отходящих из котла газах мы обнаружим продукты неполного горения — окись углерода и вместе с тем часть кислорода, неиспользованного при горении. Чтобы избежать неполного горения, в топку приходится вводить воздух с некоторым избытком — такое количество воздуха называют действительно необходимым количеством воздуха и обозначают его V_d . Единицей его измерения также служит величина $м^3/кг$.

Если теперь разделить действительно необходимое количество воздуха на теоретически необходимое количество, получим так называемый коэффициент избытка воздуха — очень важную величину, характеризующую процесс горения топлива. Обозначают этот коэффициент греческой буквой α (альфа). Итак

$$\frac{V_d}{V_0} = \alpha,$$

откуда имеем

$$V_d = \alpha V_0. \quad (56)$$

Есть простая формула, которая дает возможность приближенно подсчитать теоретически необходимый объем воздуха в $н.м^3/кг$ (буква $н$ ставится для того, чтобы отметить, что объем воздуха считают при нормальных условиях) для горения топлива той или иной низшей теплотворной способности. Эта формула имеет вид:

$$V_0 = \frac{1,12 Q_n^p}{1000} \text{ н.м}^3/кг. \quad (57)$$

Практика работы котлов установила наиболее выгодные избытки воздуха, которые нужно иметь для правильного сжигания того или иного топлива. Если дать малый избыток воздуха, то углерод полностью не сгорит, и будут потери от химической неполноты сгорания. Если же дать слишком большой избыток воздуха, то хотя горение углерода и будет полным, но большое количество воздуха, введенного в топку, будет бесполезно нагреваться, понижать температуру в топке и уносить тепло с отходящими газами. Эта потеря так и называется — потеря с отходящими газами. Итак, надо дать такой избыток воздуха, чтобы при отсутствии потери от химической неполноты были наименьшие потери с уходящими газами. Для каждого топлива и типа топки практикой и расчетом установлены наиболее выгодные значения α . Зная α и подсчитав по формуле (57) V_0 , можно по формуле (53) вычислить и V_d .

Для постоянной проверки режима горения производится анализ продуктов горения. При правильной подводе воздуха в топку получается определенное количество углекислого газа CO_2 , как продукт полного горения, и полное (почти) отсутствие окиси углерода CO . Содержание углекислого газа в продуктах сгорания определяют при помощи ручного газоанализатора или чаще автоматическим газоанализатором; наличие CO тоже может быть определено по приборам или по цвету пламени.

Расчетным путем определяют то максимальное количество углекислого газа (его обозначают $\text{CO}_{2\text{макс}}$) в газах, которое установилось бы при полном горении с теоретически необходимым количеством воздуха. Для различных топлив эти значения приведены в табл. 9. С достаточной степенью точности отношение количества воздуха действительного и теоретического равно отношению CO_2 максимального и действительно имеющегося в продуктах горения, т. е.

$$\frac{V_d}{V_0} = \frac{\text{CO}_{2\text{макс}}}{\text{CO}_2} \quad (58)$$

Но первое отношение дает значение коэффициента избытка воздуха, отсюда и второе отношение также характеризует избыток воздуха в топке; таким образом,

$$\frac{\text{CO}_{2\text{макс}}}{\text{CO}_2} = \alpha \quad (59')$$

или

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_{2\text{макс}}}{\alpha} \quad (59)$$

Если топливо содержит в значительном количестве серу, то формулы (58) и (59) служат для измерения суммы углекислого газа и сернистого газа. Эту сумму обозначают RO_2 ; таким образом, $\text{SO}_2 + \text{CO}_2 = \text{RO}_2$.

Числитель дроби (59') может быть определен для данного топлива из табл. 9, знаменатель — газоанализатором. Таким образом, по формуле (59') можно вычислить для работающего котла α , а вместе с тем V_d , и тем самым сделать оценку правильности режима горения.

Произведя анализ газов, взятых из различных мест котла по ходу газов, и определив для каждого из этих мест величину α , можно судить о состоянии обмуровки котла. Если по ходу газов α увеличивается, это говорит о происходящих присосах воздуха через неплотности в обмуровке. Эти присосы вредны, так как поступающий через неплотности обмуровки воздух понижает температуру газов и увеличивает потери с отходящими газами.

Пример 24. В одной котельной сжигают под котлом дрова с $Q_H^p = 2500$ ккал/кг, в другой антрацит с $Q_H^p = 6800$ ккал/кг. Сравнить для обоих видов топлива количества воздуха для горения и значения CO_2 , если для дров горение идет с $\alpha = 1,35$, а для антрацита $\alpha = 1,4$.

По формуле (57) и (56) находим теоретически необходимый и действительный объем воздуха для горения.

Для дров

$$V_0 = \frac{1,12 \cdot Q_H^p}{1000} = \frac{1,12 \cdot 2500}{1000} = 2,8 \text{ нм}^3/\text{кг},$$

$$V_{\partial} = \alpha V_0 = 1,35 \cdot 2,8 = 3,8 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Для антрацита

$$V_0 = \frac{1,12 \cdot Q_H^p}{1000} = \frac{1,12 \cdot 6800}{1000} = 7,6 \text{ нм}^3/\text{кг},$$

$$V_{\partial} = \alpha V_0 = 1,4 \cdot 7,6 = 10,6 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Процентное содержание CO_2 при полном горении найдем так. Из табл. 9 находим содержание CO_2 при полном горении и теоретически необходимом количестве воздуха, т. е. $\text{CO}_{2\text{макс}}$. Для дров $\text{CO}_{2\text{макс}} = 20,0\%$; для антрацита $\text{CO}_{2\text{макс}} = 20\%$. Отсюда при заданных избытках воздуха и полном горении нужно держать в топке:

для дров:

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_{2\text{макс}}}{\alpha} = \frac{20,0}{1,35} = 14,8\%,$$

для антрацита:

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_{2\text{макс}}}{\alpha} = \frac{20,0}{1,4} = 14,3\%.$$

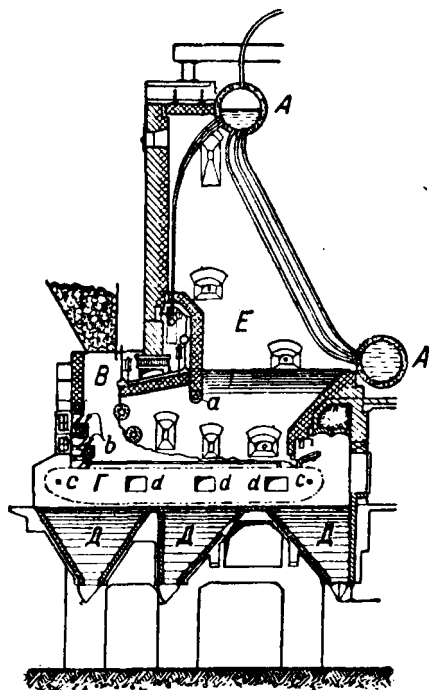
33. ТОПОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА

Одним из ответственных элементов котельной установки является топка — место, где происходит сгорание топлива.

На больших электростанциях сжигают громадные количества угля, поэтому на них применяют механические топки, среди которых большое распространение имеют топки с цепной решеткой. В качестве примера рассмотрим шахтно-цепную топку для сжига-

ния торфа—топлива, имеющего широкое применение на электростанциях СССР.

На фиг. 81 изображена такая топка, носящая имя проф. Т. Ф. Макарьева, разработавшего ее конструкцию. Топка установлена под котлом, два барабана *A* которого и три ряда передних труб видны на чертеже. Топка со-



Фиг. 81. Шахтно-цепная топка проф. Т. Ф. Макарьева для торфа.

стоит из шахты *B*, цепной решетки *Г*, золовых бункеров *Д* и топочного пространства *Е*. Под одним котлом обычно располагают две решетки, каждая шириной 4,4 м.

Шахта *B* (предтопок) предназначена для подготовки торфа к горению. Здесь торф подсушивается. В нижней части шахты проложены чугунные балки, внутри которых для охлаждения протекает вода; балки обложены специальным кирпичом соответственно форме балок; такой кирпич называют фасонным. Эти балки образуют ступени *b*, на которых торф возгорается. Образующиеся горячие газы пронизывают слой топлива; проходя далее мимо балки *a*, газы поступают в топочное пространство. Подсушенное топливо, сползая под действием собственного веса, поступает на цепную решетку. Решетка представляет собой бесконечную цепь, состоящую из отдельных балочек, колосников. Лента перетянута через звездочки *с*, одна из которых является ведущей; вал, на котором она сидит, приводится во вращение электродвигателем.

Попадая на решетку, топливо загорается. Вначале из него выделяются так называемые летучие вещества; они поступают в топочное пространство и здесь их горючая часть сгорает. Твердая часть топлива — кокс — горит на решетке при ее движении. В правой части расположен шлакосниматель. Здесь топливо несколько задерживается, догорает, а остающаяся сплавленная зола, шлак, проваливается в шлаковый бункер, из которого шлак тем или иным способом удаляют.

Воздух для горения подается под решетку в короба (зоны) *d*; на подводящих воздух каналах (они на чертеже не показаны) имеются шиберы — заслонки, позволяющие регулировать подачу воздуха в различные места решетки.

Топка Макарьева хорошо работает даже при очень влажном торфе, порядка 50—55% влажности.

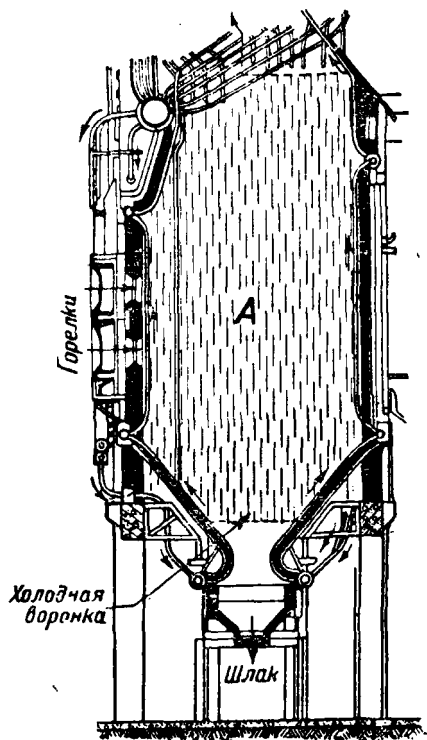
Кроме описанного так называемого слоевого сжигания весьма широкое распространение получил другой, как его называют камерный способ сжигания. Сущность его заключается в том, что топливо предварительно измельчают в специальных мельницах и превращают в угольную пыль той или иной тонины. Угольную пыль при помощи воздуха через особые приспособления — форсунки — вдувают в большую топочную камеру, где пыль загорается и горит на лету в виде факела.

Такая топка представлена на фиг. 82. Как видно, она состоит из камеры *A*, образованной кирпичными стенками; вдоль стенок расположены трубки, по которым движется вода; это сделано для охлаждения кирпичной кладки от разрушающего действия пламени; вверху камеру пересекают трубки котла, не показанного на чертеже, трубки образуют его поверхность нагрева; все охлаждающие трубки, идущие вдоль стен камеры, также составляют поверхность нагрева котла и питаются водой из нижнего барабана котла. Нижняя часть камеры представляет собой шлаковую шахту, образованную четырьмя покатыми стенками, также охлаждаемыми водяными трубками. Это так называемая холодная воронка. Здесь охлаждаются и превращаются в твердые кусочки расплавленные жидкие капли шлака, который собирается в низу шахты, и затем его удаляют.

Слева в стенке расположены одна за другой несколько форсунок.

Кроме топок с описанным гранулированным шлакоудалением, в последние годы получили большое развитие камерные топки с жидким шлако-

удалением. В этом случае вместо шлаковой воронки в нижней части топки специальным расположением форсунок создают зону с высокой температурой, при которой шлак находится в жидком состоянии, благодаря чему он стекает вниз в особую шлаковую ванну, откуда через специальную летку поступает в шлаковый бункер, заполненный водой; отсюда уже в затвердевшем виде шлак удаляется.



Фиг. 82. Пылеугольная топка.

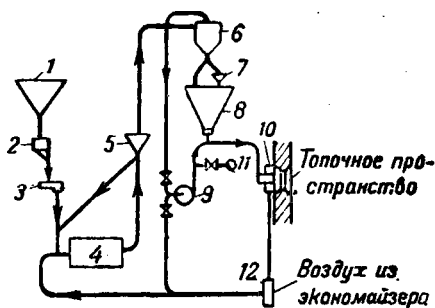
Есть несколько способов приготовления пыли, каждый из которых применяют в зависимости от свойств размалываемого угля и особенностей котельной. При индивидуальном пылеприготовлении каждый котел имеет свою пылеприготовительную установку, как показано на фиг. 83. Здесь уголь определенного размера кусков из бункера 1 самотеком поступает в автоматические весы 2 и дальше в тарельчатый питатель 3. Если уголь не очень влажный, его из питателя направляют в мельницу 4, куда из короба 12 подается горячий воздух. В мельнице происходит некоторая подсушка угля и превращение его в пыль. Размельченный здесь уголь струей воздуха уно-

сится из мельницы и поступает в сепаратор 5, в котором происходит отделение готовой пыли от подхваченных струей воздуха более крупных кусочков угля. Эти более крупные частицы спускаются по стрелке вниз и снова поступают в мельницу. Готовая пыль поступает в циклон 6; здесь происходит отделение воздуха от пыли; пыль самотеком спускается по рукаву или при помощи шнека 7 подается в пылевой бункер 8. Вентилятор 9, забирающий воздух из циклона, нагнетает его в форсунку 10. Сюда же подается пыль из бункера и горячий воздух из экономайзера 12. Образовавшаяся смесь — аэропыль — поступает через форсунки в топочное пространство котла, где и сгорает.

Угольная пыль некоторых сортов угля может взрываться. Чтобы взрыв не причинил больших повреждений, устроен взрывной клапан 11; образующиеся при взрыве газы через тонкую легко разрушающуюся стенку клапана отводятся наружу.

Если применяют для сжигания влажный уголь и в мельнице нельзя получить достаточную его подсушку, перед мельницей устанавливают трубу-сушилку, при движении по которой уголь частично подсушивается. Дальнейшая досушка производится в мельнице.

Для сжигания некоторых видов низкосортных топлив (в первую очередь, подмосковного угля, торфа) широкое развитие получили так называемые шахтно-мельничные топки (фиг. 84), отличающиеся простотой устройства, большой производительностью и малым расходом энергии на производство угольной пыли. В этой топке топливо из бункера 1 по рукаву 2 через питатель 3 и течку 4 подается к мельнице 6. В мельницу же подается и горячий воздух, который подсушивает топливо. Этот же воздух увлекает пыль и по-



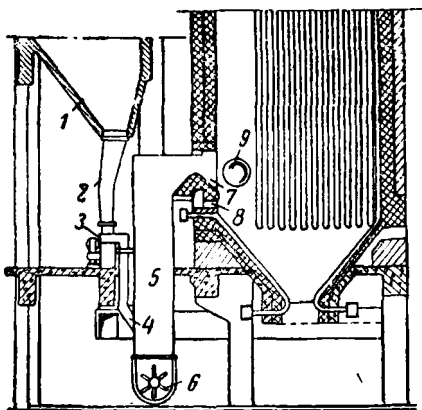
Фиг. 83. Схема пылеприготовления.

дает ее в топку через амбразуру 7. Отвеивание готовой пыли происходит в шахте 5.

В таких топках с большим успехом советские теплотехники научились сжигать фрезерный торф, что обеспечивает широкое развитие этому наиболее механизированному и экономичному способу добычи торфа.

Для решения теплотехнических проблем, связанных, в частности, с топливосжиганием, постройкой паровых котлов и двигателей, в СССР организован ряд научно-исследовательских институтов.

Среди них надо отметить основные: Энергетический институт Академии наук СССР им. Г. М. Кржижановского, Всесоюзный теплотехнический институт им. Ф. Э. Дзержинского и Центральный котлотурбинный институт им. И. И. Ползунова.



Фиг. 84. Шахтно-мельничная топка.

1—бункер сырого угля; 2—рукав для подачи сырого топлива; 3—питатель сырого топлива; 4—течка для подачи топлива к мельнице; 5—шахта; 6—шахтная мельница; 7—амбразура; 8—подача вторичного воздуха; 9—растопочное устройство.

34. ПАРОВЫЕ КОТЛЫ

К основному оборудованию паровых электрических станций относят котлы, в которых происходит приготовление рабочего тела — водяного пара —

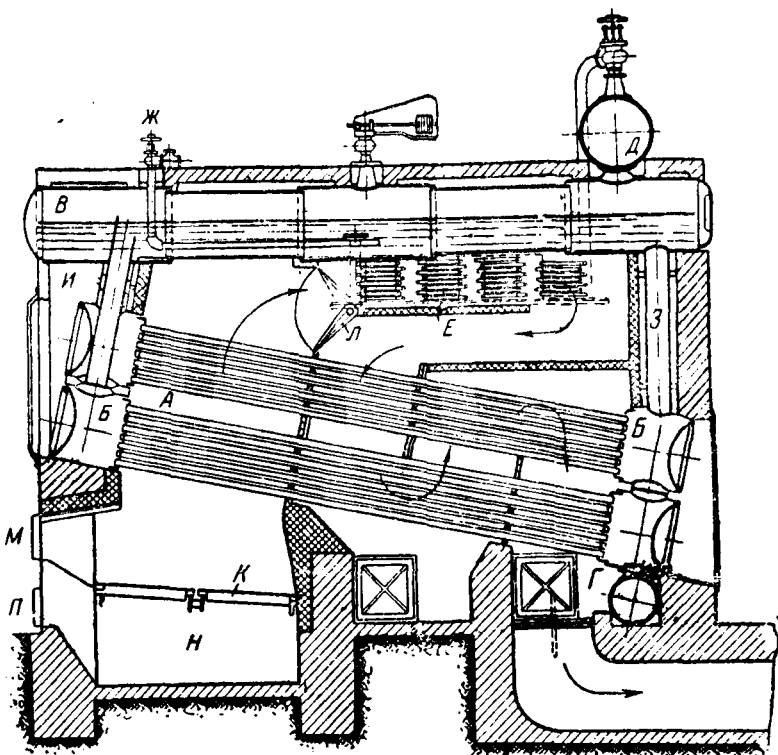
нужных параметров, и двигатели, в которых происходит преобразование тепловой энергии в механическую.

Познакомимся кратко с устройством этих агрегатов, чтобы в дальнейшем рассмотреть работу электрической станции в целом. Подробное рассмотрение паровых котлов и машин-двигателей производится в специальной литературе.

Наиболее распространенным типом паровых котлов на электростанциях является водотрубный котел, названный так потому, что в нем вода движется по трубкам, и в них происходит превращение ее в пар. Рассмотрим в качестве примера одну из старых конструк-

ций такого котла небольшой производительности, а именно котел Шухова (фиг. 85а).

Основными частями его являются кипяtilьные трубы *А*, головки или коробки *Б*, барабан *В*, грязевик *Г*, сухопарник *Д*, пароперегреватель *Е*.



Фиг. 85а. Разрез котла Шухова.

В кипяtilьных трубах происходит процесс парообразования. Трубы расположены пучками. Передние и задние концы труб ввальцованы в головки *Б*, представляющие собой небольшие барабаны. Головки соединены с барабаном *В*: передние при помощи горловины *И*, задние при помощи труб *З*. В самой нижней части котла имеется коллектор-грязевик *Г*, в котором оседает грязь, попадающая с водой; отсюда она удаляется че-

рез продувочный вентиль. В верхней части помещен сухопарник *Д*, в котором происходит отделение от пара увлеченных им капелек воды. Питательная вода поступает в котел через вентиль *Ж* в переднюю часть барабана и через трубы *З* — в задние головки. Образующийся в трубах пар поступает в передние головки и отсюда в барабан, где и собирается в верхней части над водой. Из барабана пар через сухопарник проходит по соединительной трубе в перегреватель. Здесь он получает дополнительное количество тепла, при этом давление его не изменяется, а температура повышается; таким образом здесь он становится перегретым паром.

Так как это котел небольшой производительности, он оборудован ручной топкой с колосниковой решеткой. Топливо здесь вручную забрасывают через дверцу *М*, и горит оно на колосниковой решетке, состоящей из колосников, опирающихся на балки.

Воздух для горения подается через дверцу *П* и поддувало *Н*; через слой топлива он поступает в топку.

Горячие газы поднимаются вверх и, огибая специально установленные перегородки, проходят путь, указанный стрелками. Для регулирования количества газов, проходящих через перегреватель, имеется заслонка *Л*. В положении, показанном на чертеже, все газы проходят через перегреватель. При другом крайнем положении, указанном на чертеже пунктиром, через перегреватель газы вовсе не пойдут. Располагая же заслонку в каком-либо промежуточном положении, можно через перегреватель пропустить желаемую долю газов и тем самым регулировать температуру перегретого пара.

Из котла газы выходят наружу через дымовую трубу, на чертеже не показанную.

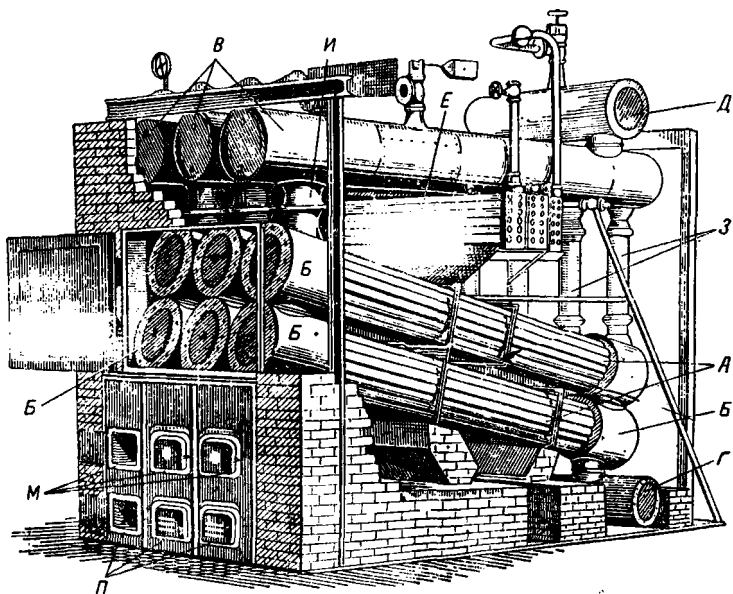
На фиг. 85b показан внешний вид котла Шухова, состоящего из трех секций, в обмуровке.

Конструкция котла Шухова в последние годы была несколько изменена. В новой конструкции котла (она называется котлом Шухова-Берлина) имеется общий для всех секций барабан, который поставлен не вдоль трубок, а поперек; таким образом барабан — наиболее дорогая часть котла — стал значительно легче и короче, а следовательно, и дешевле.

Котлы Шухова устанавливались на электрических станциях малой мощности порядка 3 000—5 000 *квт*,

преимущественно на фабрично-заводских станциях, а также в тех случаях, когда производство для своего технологического процесса нуждается в паре.

В настоящее время котлы Шухова не строятся, однако на предприятиях Советского Союза имеются действующие



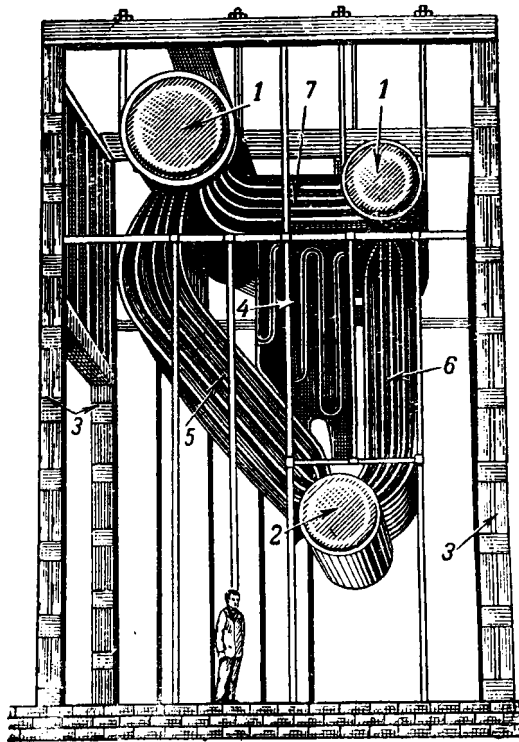
Фиг. 85б. Котел Шухова в обмуровке.

щими громадное количество таких котлов. Советские котлостроители в последние годы разработали ряд новых конструкций котлов небольшой производительности.

На больших электрических станциях устанавливают мощные котлы. На электростанциях постройки 1925—1935 гг. ставили многобаранные котлы с тремя или четырьмя барабанами.

На фиг. 86 представлен трехбаранный котел типа Стерлинга, без обмуровки и без топки, но в каркасе. Водой заполнены нижний и задний верхний барабаны, а также частично верхний передний барабан. (Иногда барабаны располагают так, что оба верхних барабана заполнены водой частично. В этом случае остальная часть

объема верхних барабанов занята паром). Образующаяся в переднем пучке пароводяная смесь, как более легкая, чем вода в заднем пучке, поднимается вверх, а вместо нее поступает вода из заднего пучка труб.



1—два верхних барабана; 2—нижний барабан; 3—каркас; 4—перегреватель; 5—передний пучок труб; 6—задний пучок труб; 7—трубы для соединения верхних барабанов.

Фиг. 86. Трехбарабанный котел типа Стерлинга.

Так осуществляется циркуляция. Пар собирается в верхней части переднего барабана и отсюда направляется в сухопарник, не показанный на чертеже. Из сухопарника пар поступает по трубам в перегреватель, расположенный между пучками труб. Парообразование происходит, главным образом, в переднем пучке труб.

В отличие от котла Шухова, в котором трубки вальцованы в секции, здесь они присоединены непосредственно к верхнему барабану, что увеличивает их наклон к горизонту; поэтому принято котлы с таким на-

клоном, как у котлов Шухова, называть горизонтально-водотрубными котлами, а котлы типа Стерлинга—вертикально-водотрубными.

Только что описанный котел, хотя и показал себя хорошо в работе, еще в довоенные годы был снят с производства, так как он имеет много барабанов, а барабаны—это наиболее дорогая и тяжелая часть котла. В дальнейшем перешли на строительство двух- и однобарабанных котлов.

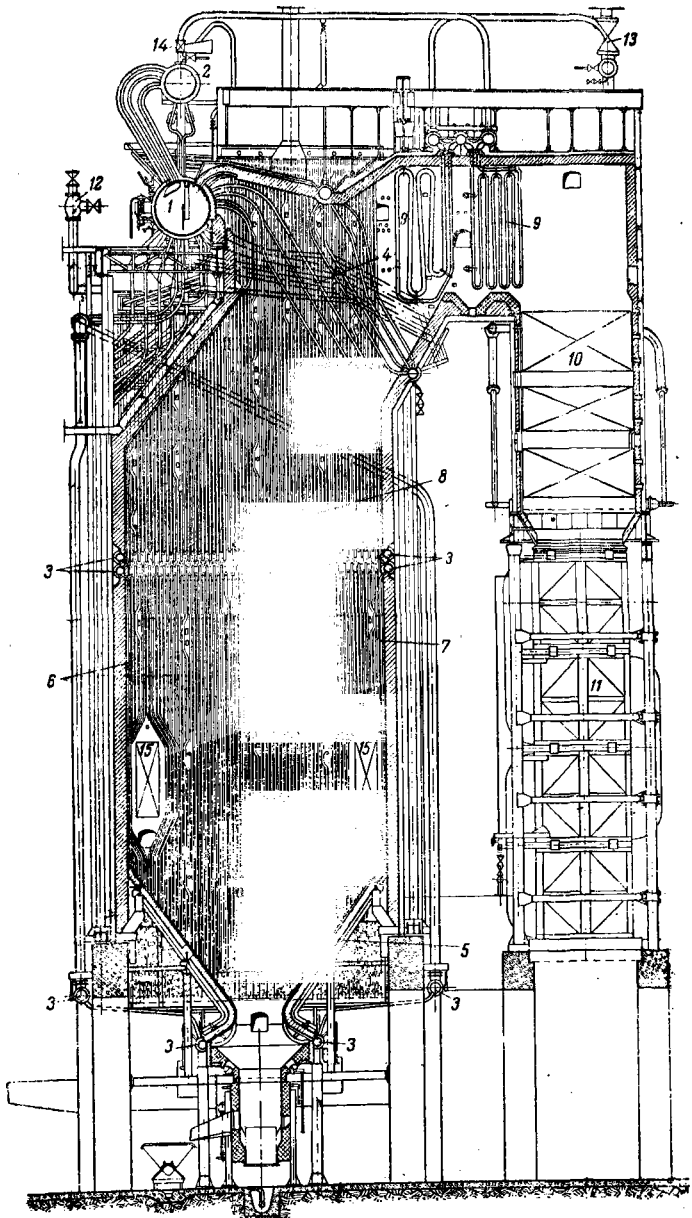
Однобарабанный котел КО-VI представлен на фиг. 87а. В основном его поверхность нагрева образована трубками, которые расположены вдоль стен топки; они образуют так называемые экраны (6, 7, 8); в них происходит парообразование и вместе с тем эти трубы защищают кирпичную кладку стенок от разрушающего действия пламени. Вода поступает из водяного экономайзера в барабан 1 котла и из него по спускным трубкам в коллекторы (коллекторы—это толстостенные трубы, к которым по всей длине присоединены трубки котла); образующийся в трубках экранов пар поступает в барабан, собирается в его паровом пространстве и далее направляется в сухопарник 2, а из него в перегреватель 9.

Обычно газы, покидающие котел, имеют еще достаточно высокую температуру. Чтобы ее понизить, этими газами нагревают воду перед поступлением в котел и воздух, перед его поступлением в топку. Служащие для этого устройства называются—первое водяным экономайзером, второе—воздушным подогревателем. Рассматриваемый котел имеет эти устройства: на чертеже 10—водяной экономайзер и 11—воздушный подогреватель.

Котел оборудован пылеугольной топкой. Форсунки 15 расположены в боковой стенке. Горячие газы поднимаются вверх, здесь они поворачивают в перегреватель и затем опускаются вниз, омывая водяной экономайзер и воздушный подогреватель.

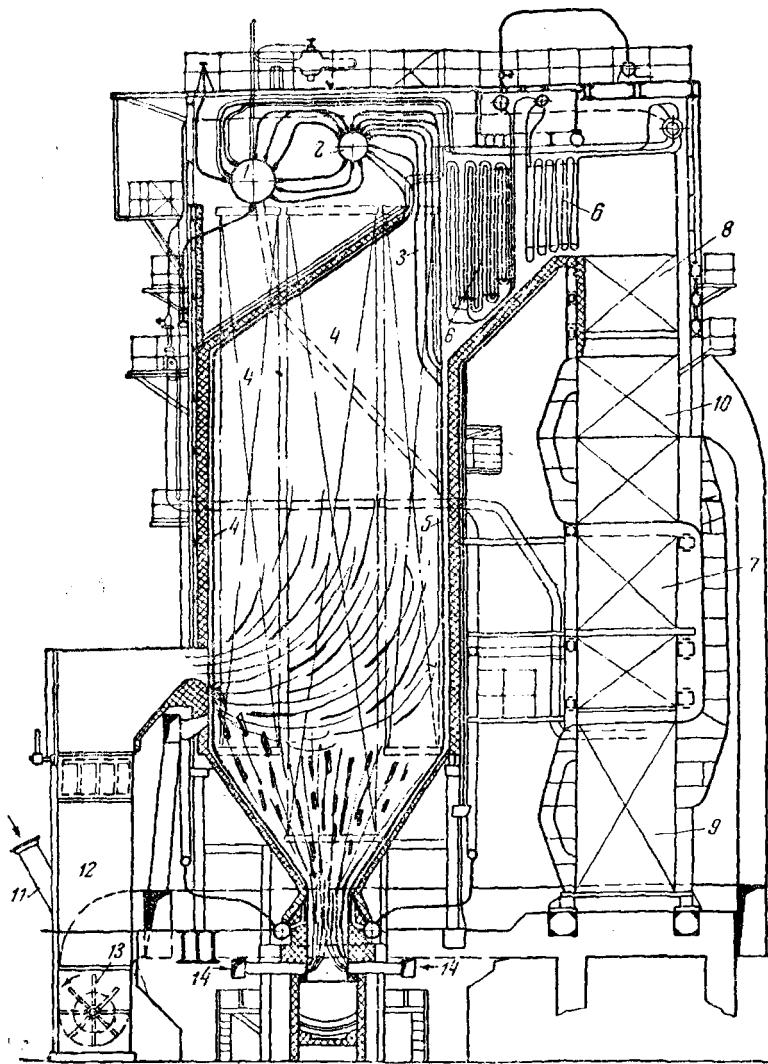
Производительность котла 160—200 *т/час*.

Это—котел среднего давления 32—35 *атм*. В связи с переходом при постройке крупных электрических станций на высокое давление Таганрогский котельный завод разработал конструкцию котла на давление 110 *атм* и температуру 510° С, производительностью 230 *т/час*



Фиг. 87а. Однobarабанный котел типа КО-VI.

1—барaban котла; 2—сухопарник; 3—коллекторы; 4—котельный пучок; 5—холодная воронка; 6, 7, 8—экраны; 9—перегреватель; 10—водяной экономайзер; 11—воздушный перегреватель; 12—питательный вентиль; 13—завдвижка перегретого пара; 14—предохранительный клапан; 15—форсунок.



Фиг. 87б. Однobarанный котел высокого давления ТП-2:0-1 с шахтно-мельничной топкой для сжигания фрезерного торфа и бурого угля.

1—основной барабан; 2—предвключенный барабан; 3—отводящие трубы заднего экрана; 4, 5—экраны; 6—перегреватель; 7 и 8—первая и вторая ступени экономайзера; 9 и 10—первая и вторая ступени воздушного перегревателя; 11—сырой уголь; 12—шахта; 13—мельница; 14—подача воздуха.

(ТП-230-1) (фиг. 87b). Котел освоен в эксплуатации, и завод изготавливает их в серийном порядке. Коллективу конструкторов завода («Красный котельщик») во главе с главным конструктором И. М. Шамраевским присуждена Сталинская премия.

В отличие от котла, представленного на фиг. 87а, в этом котле имеется небольшой предвключенный барабан 2, куда поступает пароводяная смесь из кипятильных трубок; здесь происходит в основном отделение пара от воды; после этого пар по верхним трубам отводится в паровое пространство, а вода по нижним трубам в водяное пространство основного барабана 1. Вследствие этого вода в основном барабане находится в относительно спокойном состоянии.

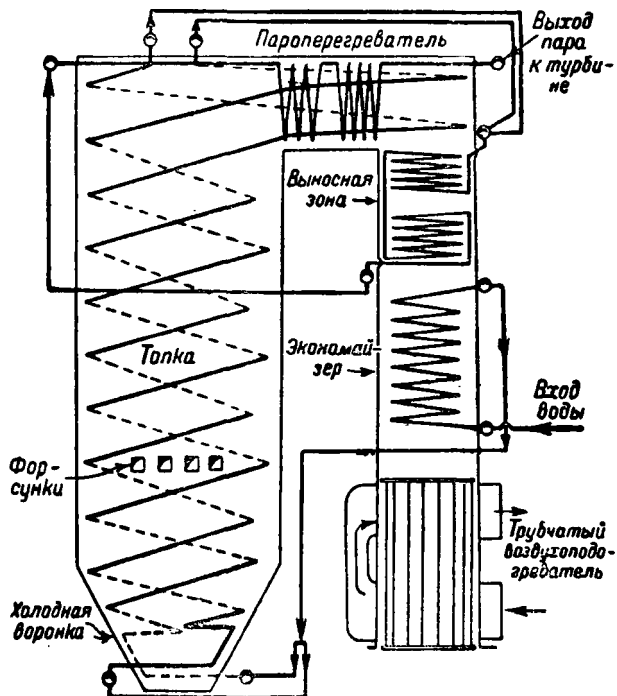
Общим для всех барабанных котлов является способ образования движения рабочего тела в котле, создающегося вследствие разности удельных весов в переднем и заднем пучках труб, как это было отмечено при описании котла Стерлинга. Это так называемая естественная циркуляция воды и пара. При таком движении в барабане происходит отделение пара от воды. Пар направляется в перегреватель, а вода вновь поступает в задние пучки. Так, 1 кг воды должен несколько раз обойти весь путь, чтобы осуществилось превращение ее в пар.

Стремление освободиться от дорогой и тяжелой части котла, барабана, привело к созданию так называемых прямоточных котлов. В этих котлах поверхность нагрева состоит из длинных трубок, выполненных в виде змеевиков.

Вода подается в змеевики котла насосом. Проходя через поверхность нагрева котла, она полностью испаряется, пар перегревается до требуемой температуры и таким образом в готовом виде выходит из змеевиков. Здесь уже естественной циркуляции нет, и движение рабочего тела осуществляется принудительно при помощи насоса. Изготавливаются они как для среднего, так и для высокого давления пара.

На фиг. 88 показано, как устроен советский прямоточный котел конструкции проф. Л. К. Рамзина производительностью 200 т/час пара давлением 35 ат. Котел выполнен в виде буквы П. Топка расположена в левой половине котла, где газы имеют наиболее высокую тем-

пературу. Здесь расположены трубки собственно котла, в которых происходит нагревание и испарение воды. Место перехода последних долей воды в пар является наиболее опасным для трубок, так как здесь происходит выделение из воды солей, которые откладываются на



Фиг. 88. Схема прямооточного котла Рамзина производительностью 200 т/час.

трубках котла. Так как при высоких температурах отложившиеся соли могут стать причиной повреждения трубок, то те части трубок, в которых происходит процесс превращения в пар последних долей воды, вынесены в правую половину котла, где температура газов снижена. Эту часть поверхности нагрева называют выносной зоной.

Движение рабочего тела — воды — происходит так. Вода поступает в экономайзер и, нагревшись, подходит к двум коллекторам левой половины котла; затем, разделившись на две ветви, вода поднимается по труб-

кам вверх и поступает в выходные коллекторы, из которых направляется в выносную зону. Из выносной зоны уже в виде несколько перегретого пара рабочее тело направляется в перегреватель; здесь происходит дальнейший перегрев пара, далее он поступает в коллектор перегретого пара для следования к турбине. Газы идут сначала по левой половине буквы П, а затем, пройдя мимо перегревателя, поступают в правую половину, где омывают выносную зону, водяной экономайзер, воздушный подогреватель и в дальнейшем поступают через дымосос в дымовую трубу.

Прямоточные котлы в годы войны были использованы на ряде станций Урала. Будучи просты в изготовлении, они позволили в короткий срок включить в работу ряд крупных турбогенераторов для снабжения электроэнергией оборонных заводов.

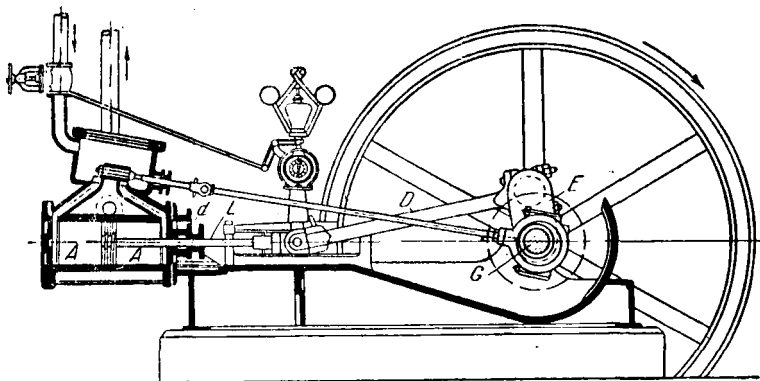
Строительство котлов различными заводами СССР стандартизировано. По разработанному в последние годы ГОСТ 3619-47 все заводы строят котлы четырех типов, отличающихся между собой рабочим давлением, величина которого для каждого из них соответственно составляет 8, 13, 39 и 100 *ати*. Котлы первого типа вырабатывают насыщенный пар и строятся на производительность от 0,2 до 2 *т/час*, котлы второго типа дают насыщенный или перегретый пар и имеют производительность от 4 до 10 *т/час*; третий и четвертый типы котлов предназначаются для выработки перегретого пара и строятся на производительности от 12 до 110 *т/час* (третий тип) и 75—230 *т/час* (четвертый тип).

35. ПАРОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Водяной пар, вышедший из котла, обладает потенциальной энергией, следовательно, он может совершать работу. Для получения механической энергии используют двигатели двух типов: паровые машины и паровые турбины. В паровых машинах потенциальная энергия пара непосредственно преобразуется в энергию движения поршня. Пар поступает слева в цилиндр *A* паровой машины (фиг. 89); здесь он расширяется и при этом совершает работу расширения, передвигая поршень вправо. При помощи шатуна *D* и кривошипа *E* поступательное движение поршня превращается во вращательное движение вала *G*. Когда поршень приходит в край-

нее правое положение, пар покидает цилиндр. В то же время в цилиндр поступает с другой стороны новая порция пара, которая перемещает поршень справа налево.

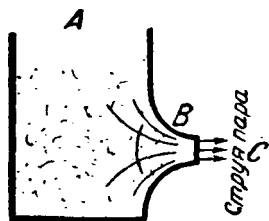
Паровые машины сохранились в настоящее время на старых станциях малой мощности. На новых электро-



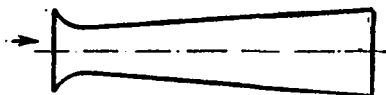
Фиг. 89. Разрез по паровой машине.

станциях их устанавливают редко, преимущественно на небольших фабрично-заводских предприятиях, в сельском хозяйстве (локомобили).

Наибольшее распространение паровая машина имеет в нестационарных (передвижных) установках (паровоз, пароход, локомобиль).



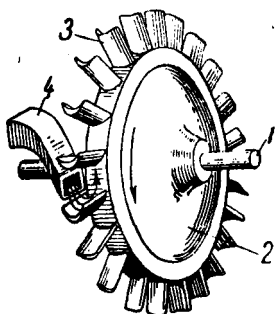
Фиг. 90. Истечение пара.



Фиг. 91. Сопло Лавалья.

Преобладающим двигателем на электростанциях является паровая турбина, принцип работы которой заключается в преобразовании потенциальной энергии пара сначала в кинетическую энергию пара, а затем уже в механическую энергию вращения вала.

Пусть водяной пар вытекает из резервуара *A* (фиг. 90), в котором поддерживают давление более высокое, чем в пространстве *C*, в которое пар вытекает. Каналы, через которые происходит истечение, называются *насадками* или *соплами* (*B*). Вследствие разности давлений пар будет расширяться и вытекать из сопла с большой скоростью. Следовательно, этот пар обладает большой кинетической энергией. Таким образом в сопле *B* потенциальная энергия пара превращается в кинетическую. Для получения очень больших ско-



Фиг. 92. Схема ротора простейшей паровой турбины.



Фиг. 93. Центростремительная и центробежная силы при движении пара между лопатками.

ростей (до 1 000 м/сек) применяются особой формы сопла. Они имеют сначала небольшую суживающуюся часть, а затем расширяющуюся (фиг. 91). Эти сопла называются *соплами Лавала*.

Вытекающий из сопла пар можно использовать для совершения работы. Для этого пар направляют на особые изогнутые лопатки, насаженные на диски. Такое устройство изображено на фиг. 92. Здесь *4* — сопло, из которого вытекает пар; *3* — лопатки, насаженные на диск *2*. Этот диск сидит на валу *1*. В канале между лопатками пар совершает криволинейное движение, во время которого, как об этом было сказано в § 10, возникает центростремительная сила, приложенная к движущемуся телу (фиг. 93), в данном случае к пару. Согласно третьему закону Ньютона вследствие этого воз-

никает противодействующая сила — центробежная, приложенная к «связям», образующим криволинейное движение. Связями в данном случае являются лопатки. Возникающая центробежная сила, приложенная к лопаткам, приводит их, а следовательно, и диск вместе с валом в движение.

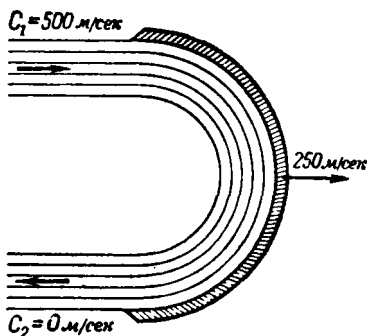
Таким образом и получается механическая энергия вращения вала; в нее превращается большая часть кинетической энергии пара, так что пар выходит из турбины со значительно меньшей скоростью, чем он имел при поступлении на лопатки.

Для того чтобы уяснить себе влияние передачи струей пара своей кинетической энергии лопаткам, рассмотрим упрощенный случай движения струи пара по лопатке (фиг. 94) и проследим, как изменяется скорость пара при движении. При этом речь может идти об абсолютной скорости пара (по отношению к неподвижным телам на земле) и об относительной скорости (по отношению к движущейся лопатке).

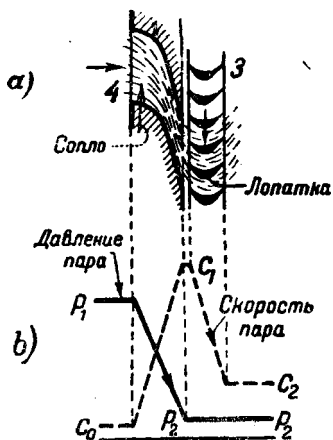
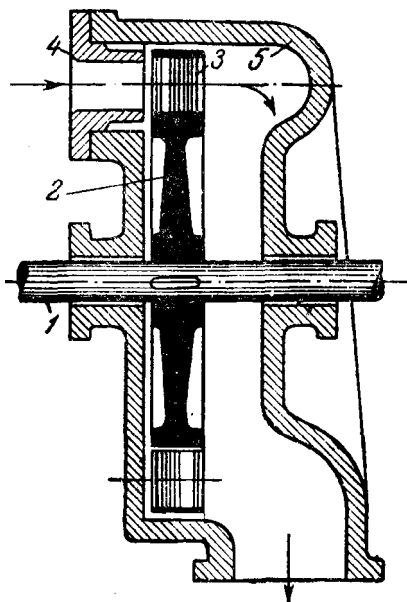
Пусть струя пара поступает на лопатку с абсолютной скоростью 500 м/сек и при этом скорость движения лопатки в том же направлении составляет 250 м/сек . Очевидно, относительная скорость движения пара составит 250 м/сек (сравнить с примером движения человека по палубе парохода в § 8). Так обстоит дело, когда струя пара и лопатка движутся в одном и том же направлении. В дальнейшем пар движется по криволинейному пути по лопатке и сходит с лопатки в направлении прямо противоположном ее движению. Если его относительная скорость та же, т. е. 250 м/сек , а лопатки движутся в прежнем направлении с той же скоростью, то, очевидно, абсолютная скорость пара равна нулю (как это было и в примере из § 8, когда человек изменил направление своего движения).

Таким образом при изменении направления движения струя пара потеряла свою абсолютную скорость, т. е. свою кинетическую энергию, которая при помощи лопаток оказалась переданной валу турбины.

В действительности пар выходит с некоторой абсолютной скоростью, но значительно меньшей, чем та, с которой пар поступает на лопатку.



Фиг. 94. Изменение абсолютной скорости при движении пара между движущимися лопатками.



Фиг. 95. Разрез по турбине.

1 — вал; 2 — диск; 3 — лопатки; 4 — сопло;
5 — корпус.

На фиг. 95 дан разрез простейшей турбины в собранном виде. Диск с рабочими лопатками заключен в неподвижный кожух 5, стенки которого создают путь для выхода пара из турбины, указанный стрелками (здесь цифры относятся к тем же частям турбины, что и на фиг. 92).

По способу работы пара различают турбины *активные* и *реактивные*.

Активным принципом называют такой, при котором расширение пара происходит перед поступлением пара на рабочие лопатки. Если сделать разрез по соплу и рабочей лопатке и развернуть его в плоскости чертежа, получим представленное на фиг. 95, а. На ней 4 — разрез по соплу, а 3 — ряд развернутых лопаток (обозначения те же, что и на фиг. 95 и 92). Под чертежом разреза расположен график изменения давления и абсолютной скорости пара (95, б). Из графика видно, что давление (сплошная линия), равное вначале p_1 , падает в сопле до p_2 и в дальнейшем на лопатках остается постоянным (такие турбины по-

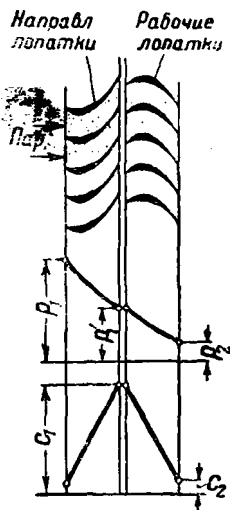
равное вначале p_1 , падает в сопле до p_2 и в дальнейшем на лопатках остается постоянным (такие турбины по-

этому называют еще турбинами равного давления). Этого достигают устройством неизменного (почти) сечения между рабочими лопатками. При падении давления в сопле абсолютная скорость пара увеличивается от C_0 до C_1 (пунктирная линия) и затем, пройдя рабочие лопатки, снижается до C_2 (95,b).

В реактивных турбинах расширение пара происходит как перед поступлением пара на рабочие лопатки, так и на самих рабочих лопатках, что достигается устройством сужающегося сечения каналов между рабочими лопатками. Изменения давления и скорости показаны на фиг. 96. Из нее видно, что падение давления от p_1 до p_1' происходит перед рабочим колесом, а от p_1' до p_2 на рабочем колесе. Падение давления пара на рабочем колесе вызывает появление реактивной силы, приложенной, как и центробежная сила, к рабочим лопаткам.

Появление реактивной силы можно пояснить таким простым и широко известным примером. Предположим, что цилиндр, наполненный сжатым газом, установлен на катках на рельсах. Давление газа одинаково на все стенки, и цилиндр будет находиться в покое; но если на боковой поверхности цилиндра сделать отверстие так, чтобы газ начал выходить из цилиндра в направлении рельсов, то цилиндр под действием возникшей реактивной силы начнет поступательно двигаться в сторону, противоположную вытекающему газу.

Рассмотрим возникновение реактивной силы с точки зрения законов механики. Если пар между лопатками движется без изменения давления, то его скорость относительно лопаток, т. е. относительная скорость, остается постоянной и в этом случае, как было объяснено ранее, лопатки находятся только под действием центробежной силы. Если же при движении между лопатками происходит изменение давления, то это вызывает увеличение скорости пара относительно лопаток, т. е. увеличение относительной скорости движения пара. Наличие увеличения скорости, т. е. на-



Фиг. 96. График изменения скорости и давления для реактивной турбины.

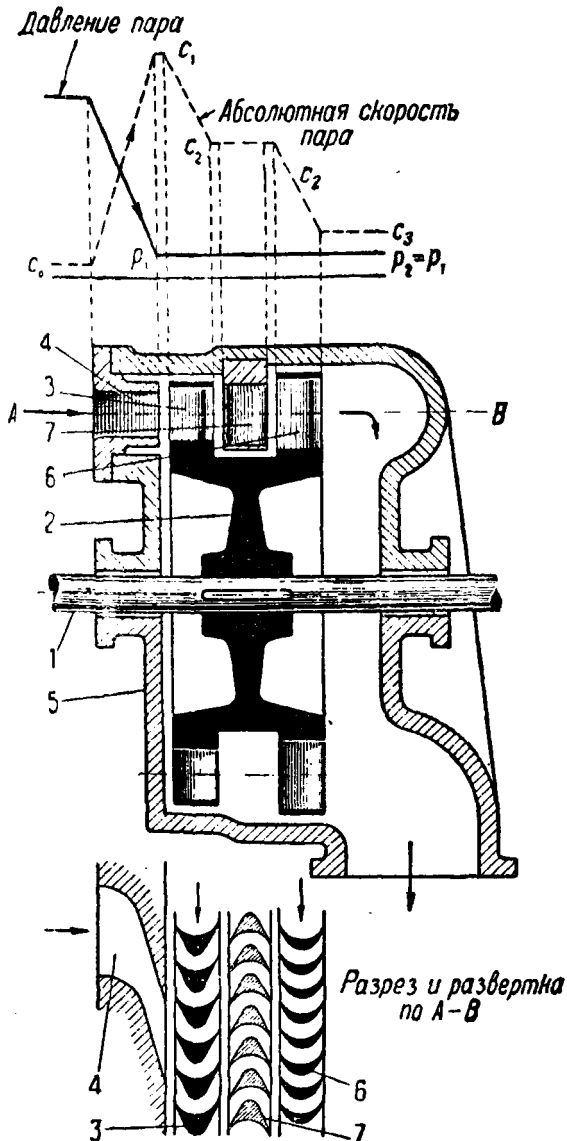
личие ускорения, говорит о том, что на движущуюся струю пара действует (согласно второму закону Ньютона) сила, направленная в сторону движения. Согласно же третьему закону Ньютона этой силе «противодействует» равная ей и противоположно направленная сила, действующая на лопатки. Эта последняя сила и называется реактивной силой. Таким образом в этом случае на лопатки действуют две силы: центробежная и реактивная.

Расчеты показывают, что для наиболее выгодного использования кинетической энергии пара, получающейся при его расширении в соплах, лопатки должны вращаться с очень большой скоростью, так что требуется очень большое число оборотов вала турбины (до 30 000 об/мин), а это очень неудобно. Для уменьшения числа оборотов турбины применяют два способа — устройство ступеней скорости и ступеней давления.

При первом способе поступают так. Использование получившейся в сопле при расширении скорости пара производят на двух (иногда трех) ступенях. Для этого устанавливают колесо специального устройства (колесо Кертиса) с двумя или тремя рядами лопаток (фиг. 97). Пар после расширения в сопле 4 поступает в первый ряд лопаток 3, на котором скорость его сбавляется от значения C_1 до значения C_2 (см. вверху диаграмму скорости).

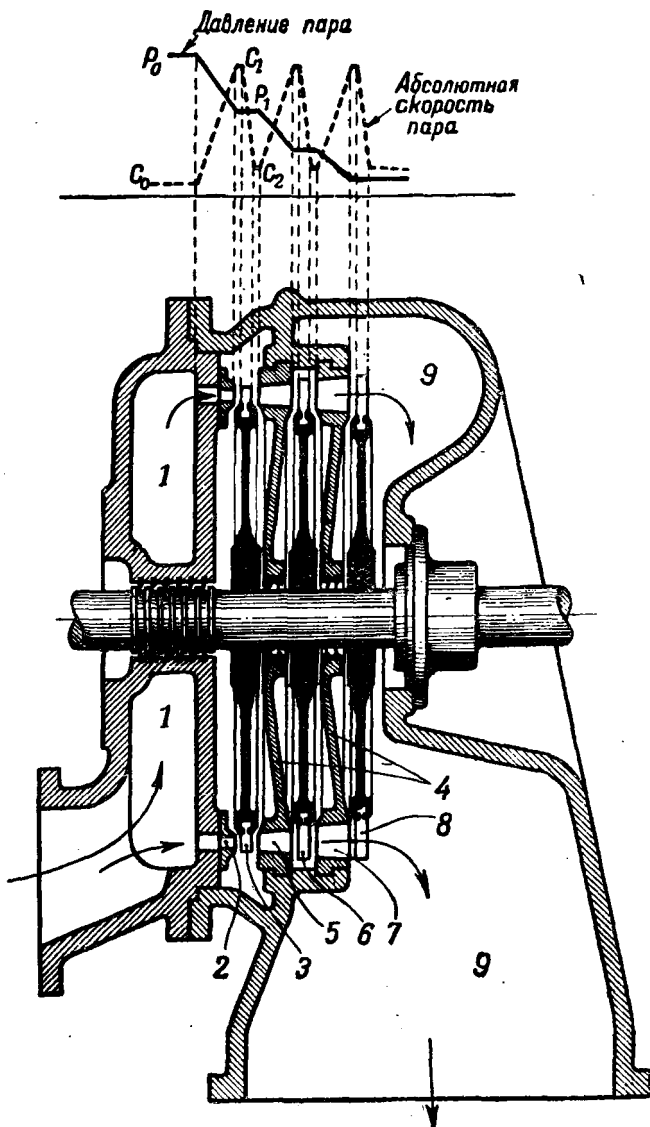
После этого пар должен поступить во второй ряд лопаток. Однако для этого ему надо дать то же направление движения, которое он имел при поступлении в первый ряд рабочих лопаток. Для этого устанавливают так называемые направляющие лопатки 7; они связаны с корпусом турбины и неподвижны; в них восстанавливается направление движения, измененное в первом ряде лопаток; после этого пар поступает во второй ряд рабочих лопаток 6. При этом сбавляется скорость от C_2 до C_3 . При таком способе использования скорости вал будет вращаться вдвое медленнее, развивая ту же мощность.

Другой способ уменьшения скорости вала заключается в разделении турбины на ступени давления. При этом скорость пара при выходе из каждой ступени меньше, чем если бы падение давления произошло сразу. Изменение давления и сбавление скорости показано на фиг. 98 (вверху), где осуществлены три ступени давления. Получающаяся в первой ступени скорость сбавляется, после чего вновь происходит падение давления в



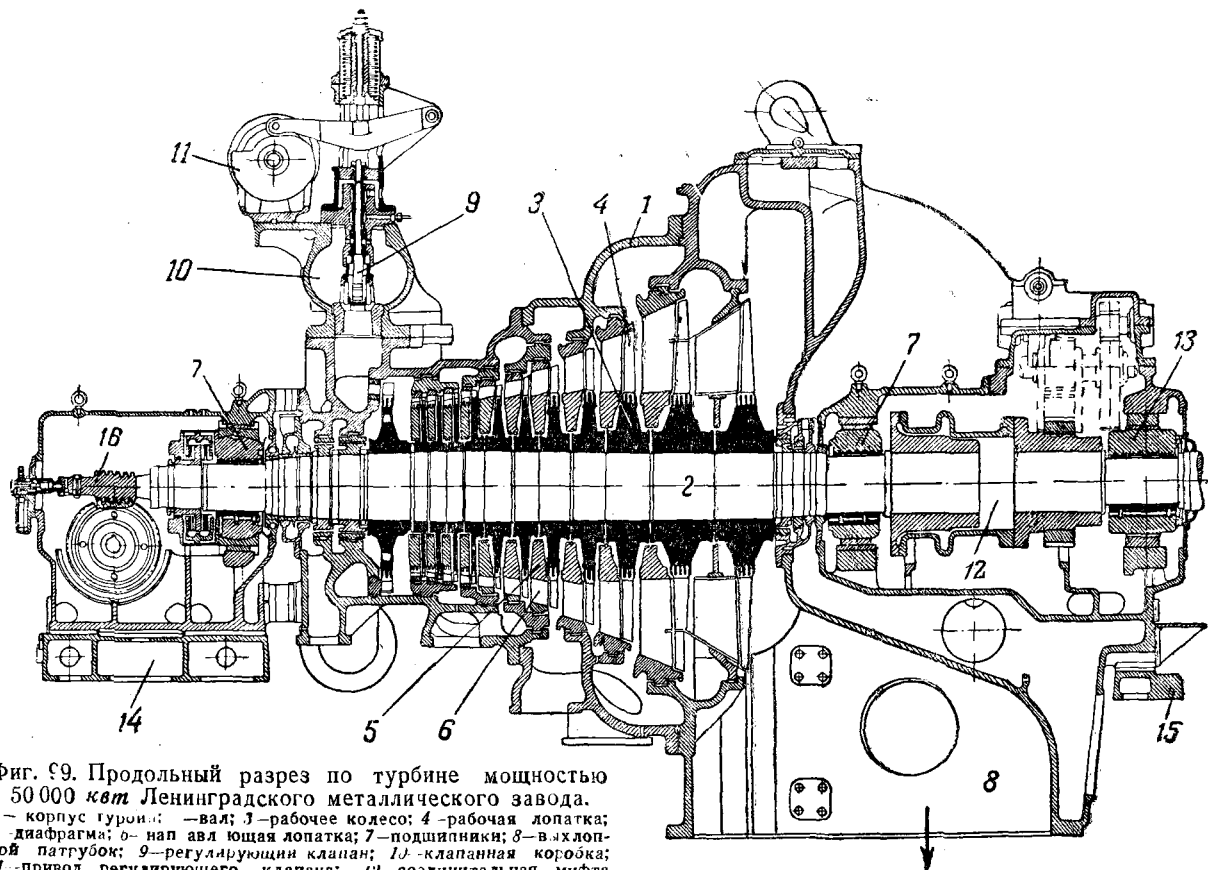
Фиг. 97. Разрез по активной турбине с двумя ступенями скорости.

1—вал; 2—диск; 3—первый ряд рабочих лопаток; 4—сопло;
5—корпус; 6—второй ряд рабочих лопаток; 7—направляющие лопатки.



Фиг. 98. Разрез по турбине с тремя ступенями давления.

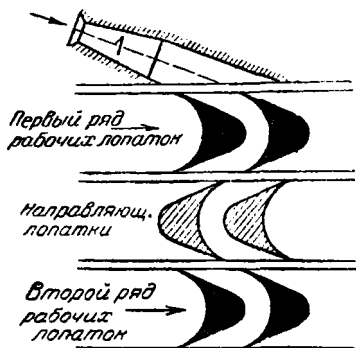
1—камера свежего пара; 2—сопло первой ступени; 3—рабочие лопатки первой ступени; 4—диафрагма; 5—сопла второй ступени; 6—рабочие лопатки второй ступени; 7—сопла третьей ступени; 8—рабочие лопатки третьей ступени; 9—выхлопной патрубок.



Фиг. 99. Продольный разрез по турбине мощностью 50 000 квт Ленинградского металлического завода.

1 — корпус турбины; 2 — вал; 3 — рабочее колесо; 4 — рабочая лопатка; 5 — диафрагма; 6 — наплавляющая лопатка; 7 — подшипники; 8 — выпускной патрубок; 9 — регулирующий клапан; 10 — клапанная коробка; 11 — привод регулирующего клапана; 12 — соединительная муфта валов турбины и генератора; 13 — подшипник генератора; 14 — передняя фундаментная плита; 15 — задняя фундаментная плита.

следующей ступени и срабатывание ее скорости, и так столько раз, на сколько ступеней разбито падение давления. Соответственно этому принципу работы конструкция турбины такова (фиг. 98): неподвижными перегородками 4 (их называют *д и а ф р а г м а м и*) турбину делят на столько частей, сколько устроено ступеней давления. В каждой части установлено отдельное рабочее колесо с рабочими лопатками 3, 6, 8. Неподвижные диафрагмы снабжены соплами, в которых происходит очередное падение давления.



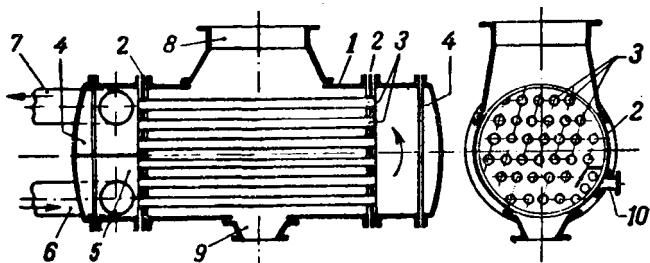
Фиг. 99а. Расположение рабочих и направляющих лопаток

Современные мощные турбины (фиг. 99) имеют несколько вращающихся дисков с рабочими лопатками, иногда несколько десятков. Между каждой парой дисков пар поступает в направляющие неподвижные лопатки, или сопла, расположенные в кожухе; в них происходит изменение направления его движения, при этом пар принимает такое же направление движения, какое имел при поступлении в первый ряд рабочих лопаток. Проходя через все эти диски (ступени), пар постепенно расширяется в соплах, а иногда и в рабочих лопатках, пока не выйдет из турбины через так называемый *в ы х л о п н о й п а т р у б о к*. На фиг. 99а, показано отдельно сопло 1, два ряда рабочих и один ряд направляющих лопаток.

Чем больше расширяется пар, тем больше его скорость и кинетическая энергия, а следовательно, и тем больше работы он может совершить. Если начальное давление пара 30 *ата* и из турбины пар выходит в атмосферу, т. е. в пространство с давлением в 1 *ата*, то расширение его происходит от 30 до 1 *ата*. Чтобы этот пар мог совершить большую работу, он должен расширяться до более низкого давления, а для этого его нужно из турбины выпускать не в атмосферу, а в особое устройство, называемое *к о н д е н с а т о р о м*. Конденсатор (фиг. 100) состоит из цилиндрического барабана — корпуса 1 с двумя крышками 4 по бокам; в оба

конца барабана вделаны две металлических доски 2, в которые вставлено большое количество трубок 3.

Пар из турбины поступает в конденсатор через патрубок 8, здесь он окружает трубки, по которым движется вода. Через патрубок 6 в пространство 5 поступает так называемая циркуляционная вода, забираемая из реки или озера; по нижним трубам она поступает в конденсатор и по ним движется в сторону правой крышки. Здесь вода поворачивает и по трубкам верхней половины конденсатора движется влево. Проходя по трубкам, вода отнимает тепло от пара, и послед-



Фиг. 100. Разрез по конденсатору паровой турбины.

ний конденсируется, т. е. превращается в воду, которая называется конденсатом. Конденсат стекает в нижнюю часть конденсатора и отсюда через патрубок 9 его откачивают насосом. Подогретая за счет тепла, отнятого от пара, вода выходит из патрубка 7 и выбрасывается обратно в реку.

Иногда, если близко нет проточной воды, из конденсатора воду направляют в специальные охлаждающие устройства (градирни, пруды, брызгальные бассейны) и потом снова возвращают в конденсатор через патрубок 6.

В конденсаторе поддерживают давление пара, значительно меньшее, чем атмосферное. Достигается это сильным понижением температуры пара при помощи охлаждающей воды; известно, что давление насыщенного пара зависит от его температуры; таким образом, если снизить температуру пара ниже 100°C , то и давление его будет ниже 1 *ата*.

В конденсаторах паровых турбин поддерживают давление 0,04—0,08 *ата* и ниже. Из таблиц насыщенного пара

видно, что при давлении $0,04 \text{ ата}$ пар имеет температуру около 29°C .

Вода, служащая для конденсации этого пара, поступает в конденсатор приблизительно при 10°C , а выходит приблизительно при 20°C . На основании этих данных можно подсчитать количество воды, необходимое для конденсации 1 кг пара, поступающего в конденсатор. Будем исходить из того, что в конденсатор поступает из турбины влажный насыщенный пар при $p_2 = 0,04 \text{ ата}$ и $x = 0,94$. По ts -диаграмме его теплосодержание составляет $t_2 = 575 \text{ ккал/кг}$. Получаемый из этого пара конденсат имеет теплосодержание $t_2' = 29 \text{ ккал/кг}$. Таким образом, 1 кг конденсирующегося пара отдает циркуляционной воде $575 - 29 = 546 \text{ ккал/кг}$ тепла. С другой стороны, 1 кг циркуляционной воды, нагреваясь на 10°C , получает 10 ккал , так как теплоемкость воды равна 1 ккал/кг . Отсюда находим, что для конденсации 1 кг пара, поступающего в конденсатор, требуется

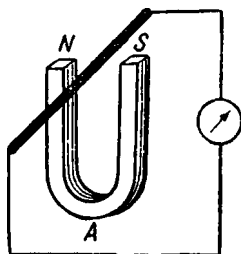
$$\frac{546}{10} \approx 55 \text{ кг}$$

циркуляционной воды; иначе говоря, через конденсатор проходит циркуляционной воды приблизительно в 55 раз больше по весу, чем пара, поступающего из турбины.

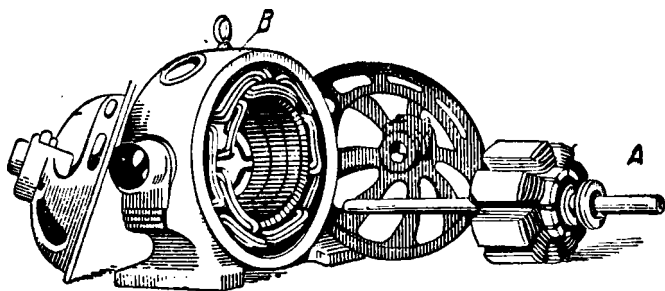
Производство турбин в СССР достигло высокой степени совершенства. До Великой Октябрьской революции в России турбины очень малой мощности строились только на одном заводе. После революции была поставлена задача освоить производство мощных турбин для строящихся центральных электрических станций, и уже в 1928 г. Ленинградский металлический завод (ЛМЗ им. Сталина) выпустил турбину мощностью $10\,000 \text{ квт}$. В настоящее время турбины строятся рядом заводов. Ими создан и освоен ряд оригинальных и уникальных в мире конструкций турбин. Сюда нужно отнести мощные теплофикационные турбины (25 и 50 тыс. квт) и конденсационные турбины мощностью $100\,000 \text{ квт}$ на $3\,000$ об/мин для высоких параметров пара. Строителям этих турбин во главе с главным конструктором ЛМЗ им. Сталина М. И. Гринбергом дважды присуждалась Сталинская премия.

Электрический генератор. Как было уже сказано, в турбине тепловая энергия пара превращается

в механическую энергию вращающегося вала. Редко бывает так, чтобы получаемая механическая энергия шла на непосредственное использование. Это имеет место лишь в турбовоздуходувках и турбонасосах. В первом случае турбина приводит в движение воздуходувку, подающую воздух под некоторым давлением, например, в доменную печь; во втором случае турбина приводит в движение насос, подающий воду, например, в котел. Обычно же механическая энергия вращающегося вала паровой турбины используется для получения электрической энергии; для этого применяют так называемые электрические генераторы, в которых и происходит преобразование механической энергии в электрическую. Это преобразование основано на принципе так называемой электромагнитной индукции, которая заключается в следующем: если в простран-



Фиг. 101. Появление индуктивного электрического тока.



Фиг. 102. Детали электрического генератора.

стве около магнита или, как говорят, в магнитном поле перемещать замкнутый проводник, то в нем появляется (индуцируется) электрический ток. Это можно осуществить так (фиг. 101): возьмем магнит *A* и между его полюсами *N* и *S* расположим проводник — проволоку, концы которой присоединены к гальванометру — прибору, служащему для измерения электрического тока. Если теперь начать перемещать проволоку вверх и вниз, то по ней потечет электрический ток, что и будет отмечено стрелкой

прибора. Можно поступить и наоборот: проволоку оставить в покое, а перемещать магнит — ток и в этом случае возникнет. На таком принципе основано устройство электрического генератора. Он состоит из двух основных частей (фиг. 102): вращающегося ротора *A*, на котором расположен ряд магнитов, и неподвижного статора *B* с помещенными в нем обмотками, состоящими из большого числа проводников. Ротор насажен на вал, который при помощи муфты соединяется с валом турбины; таким образом при вращении вала турбины магнитное поле все время движется поперек проводников статора; при этом в обмотках статора появляется электрический ток, который и отводят по проводам к потребителю. На фиг. 102 генератор изображен в разобранном виде.

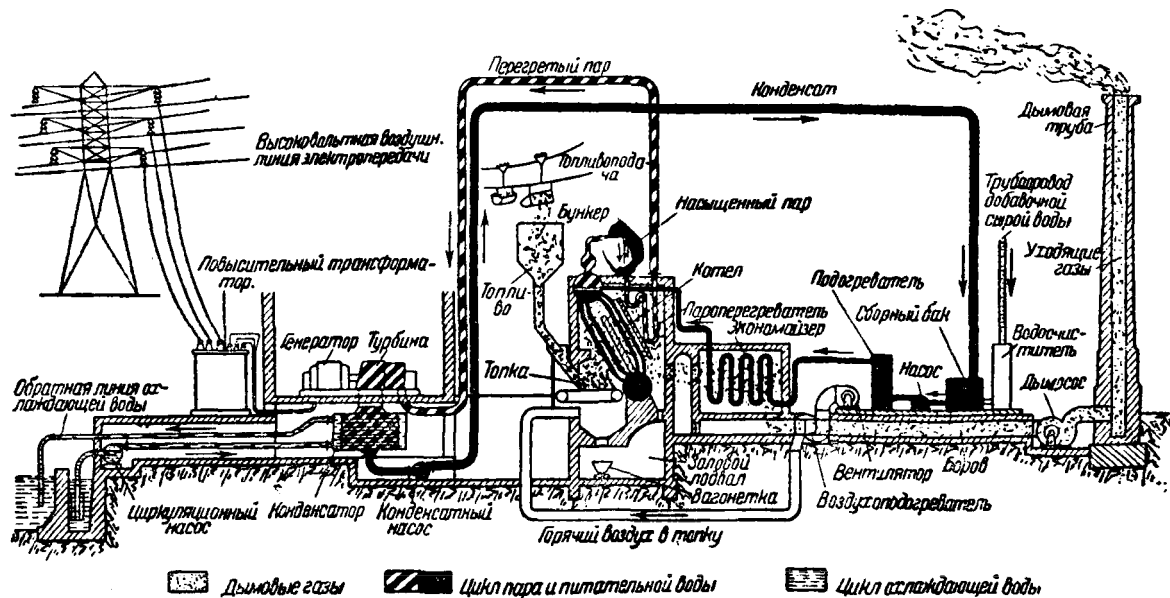
Трехфазный электрический генератор изобрел выдающийся русский инженер М. О. Доливо-Добровольский (1862—1919 г.).

36. СХЕМА ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

Каждая паровая электростанция в основном состоит из котельной, машинного зала и электрического распределительного устройства. Помимо этого имеются помещения для вспомогательного оборудования — насосов, вентиляторов, оборудования по очистке питательной воды.

На каждой станции имеется топливный склад.

На фиг. 103 представлен в упрощенном виде разрез по паротурбинной электростанции. Проследим по нему процесс выработки электрической энергии. Топливо со склада или непосредственно с места добычи ковшами (а часто вагонетками или железнодорожными вагонами) подают в бункер, и из него оно по рукавам сползает в топку. Горячие газы, получившиеся в результате горения (температура их доходит до 1 200—1 600° С), омывают трубки котла, а затем перегревателя. По выходе из котла газы имеют еще достаточно высокую температуру (350—450° С). Для того чтобы использовать энергию этих газов, устроен водяной экономайзер. Он состоит из ряда чугунных или стальных труб, по которым проходит питательная вода до поступления ее в котел. Горячие же газы движутся снаружи труб и нагревают воду, а сами при этом охлаждаются. Часто на этом процесс охлаждения газов еще не заканчивается. Дело в том, что в ряде случаев необходимо для



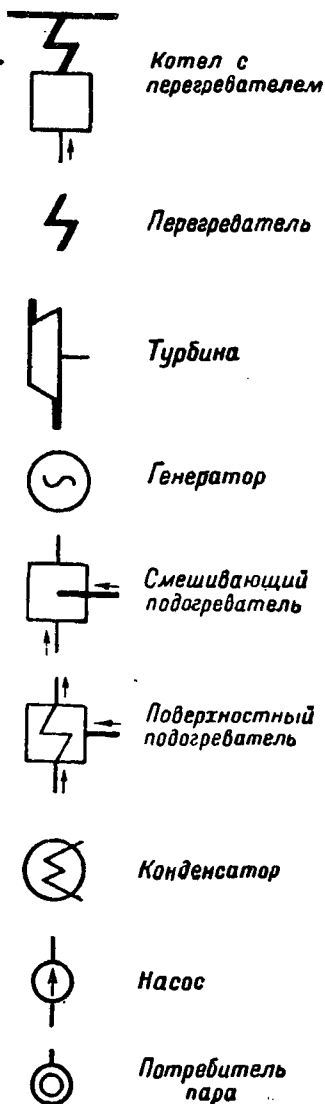
Фиг. 103. Схема расположения агрегатов на паросиловой установке.

обеспечения хорошего горения топлива подогреть воздух, поступающий в топку. Для этого устанавливают воздушный экономайзер (воздухоподогреватель), в котором воздух, проходя по устройствам для него каналам, отнимает тепло от газов, проходящих по другим соседним каналам. Таким образом горячие газы и воздух движутся навстречу в воздушном экономайзере, не смешиваясь друг с другом. При этом воздух нагревается, а газы охлаждаются. Воздух в воздушный экономайзер и дальше в топку нагнетается вентилятором. Дымовые же газы отсасываются дымоходом, который и выбрасывает их в дымовую трубу.

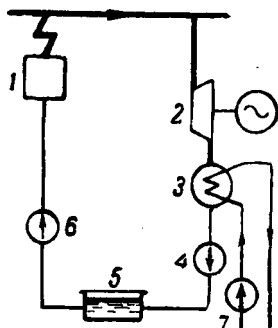
Проследим теперь движение пара и воды. На чертеже изображен двухбарабанный водотрубный котел. В его трубках за счет тепла, отнятого от газов, происходит парообразование. Пар поднимается по трубкам и собирается в барабане котла над водой. Это — насыщенный пар. Отсюда пар через сухопарник направляется в перегреватель, где он получает от газов дополнительное количество тепла и при этом становится перегретым. Из перегревателя пар направляется в машинный зал и поступает в турбину. Совершив работу в турбине, пар поступает в конденсатор. Здесь он конденсируется и конденсатным насосом направляется в сборный питательный бак. Сюда же поступает и добавочная вода, восполняющая потери пара и воды через различные неплотности. Эта добавочная вода предварительно проходит водоочиститель, где от нее отнимаются растворенные в ней соли, попадание которых в котел вредно отражается на его работе (они образуют накипь на трубках котла, которая ухудшает переход тепла от газов к воде через стенки трубок). Из питательного бака воду питательным насосом нагнетают через экономайзер снова в котел.

Для конденсации пара в конденсатор подают воду из реки, озера или пруда; для подачи этой воды устанавливают отдельный, так называемый циркуляционный насос.

Из сделанного описания движения пара и воды видно, что рабочее тело все время проходит замкнутый путь: питательный бак, питательный насос, экономайзер, котел, турбину, конденсатор, конденсатный насос, питательный бак и т. д.



Фиг. 104. Условные обозначения для схемы паросиловой установки.



Фиг. 105. Схема паросиловой установки в условном обозначении.

На одном валу с турбиной установлен генератор электрического тока. Выработанная им электрическая энергия поступает в электрическое распределительное устройство: здесь находятся сборные шины, на которые поступает электрический ток от всех генераторов. Здесь находятся все аппараты для переключения тока и, наконец, здесь помещаются трансформаторы для повышения напряжения электрического тока, если он передается на далекие расстояния.

Для схематического изображения паросиловой установки прибегают к условным обозначениям. Они приведены на фиг. 104.

Если применить эти условные обозначения, то схема простейшей паросиловой установки примет вид, указанный на фиг. 105.

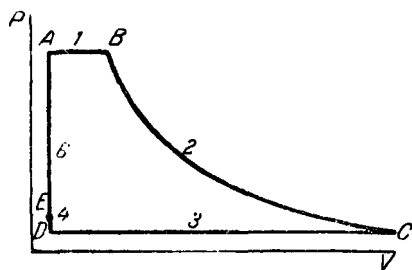
Здесь 1—котел с перегревателем; 2—турбина с генерато-

ром электрического тока (турбогенератор); 3 — конденсатор; 4 — конденсатный насос; 5 — питательный бак; 6 — питательный насос; 7 — циркуляционный насос.

Схема эта упрощенная: в ней не показана установка для очистки добавочной питательной воды и др.

Стрелками указано направление движения пара, конденсата, циркуляционной воды.

Рассмотрим теперь, что происходит с рабочим телом при прохождении его через описанные здесь агрегаты. Как и раньше, проследим это по p -диаграмме (фиг. 106). Пусть точка E характеризует состояние воды,



Фиг. 106. Цикл Ренкина.

когда она находится в питательном баке. Отсюда она поступает в питательный насос, в котором давление поднимается до давления пара в котле (практически несколько больше). Объем воды при этом не изменяется, так как вода почти несжимаема. Линия EA на фиг. 106 показывает увеличение давления в питательном насосе. Далее вода поступает в котел, где она превращается в пар и перегревается, — линия AB . Объем при этом увеличивается, а давление остается постоянным. Из котла рабочее тело поступает в двигатель (турбину), где происходит его расширение, — линия BC . Давление при этом падает. Из турбины пар поступает в конденсатор, где от него отнимается при постоянном низком давлении тепло. Пар при этом конденсируется. Процесс этот изображен линией CD . Конденсат поступает в конденсатный насос, в котором давление его повышается — линия DE . Цифрами на фиг. 106 указаны те же агрегаты, что и на схеме фиг. 105.

Описанный здесь цикл носит название цикла Ренкина.

37. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ. БАЛАНС ТЕПЛА. РАСХОД ПАРА

Основной особенностью станции, описанной в предыдущем параграфе, является то, что пар, выходящий из турбины, направляется в конденсатор, где у него отнимается скрытая теплота парообразования; такие станции называют конденсационными станциями. Как было уже сказано, для того чтобы 1 кг пара в турбине совершил возможно большую работу, в конденсаторе такой станции поддерживают возможно меньшее давление (глубокий вакуум). В конденсаторах турбин удается получить давление около $p_2 = 0,04 \text{ атм}$. При таком давлении уходящая циркуляционная вода имеет низкую температуру (около 20°C) и использование ее для каких-либо нагревательных целей практически весьма мало возможно.

Подсчитаем термический к. п. д. конденсационной станции. Для этого, как мы делали и прежде при рассмотрении работы двигателей внутреннего сгорания, нужно найти частное от деления количества тепла, перешедшего в механическую энергию, на количество тепла, подведенное к рабочему телу.

В котле процесс происходит при постоянном давлении, поэтому к пару подводится количество тепла, равное разности теплосодержания пара i_1 и теплосодержания воды, поступающей в котел; как было ранее указано, теплосодержание воды равно ее температуре t ; таким образом в котле к 1 кг рабочего тела подводят количество тепла

$$q_1 = i_1 - t \text{ ккал/кг.}$$

В идеальном двигателе происходит адиабатическое расширение пара; пусть теплосодержание пара в конце расширения будет i_2 . В таком состоянии пар поступает в конденсатор, где превращается в жидкость; температура ее при этом будет t ; так как в конденсаторе процесс происходит при постоянном давлении, то и здесь количество отнятого тепла можно представить как разность теплосодержаний, т. е.

$$q_2 = i_2 - t \text{ ккал/кг.}$$

Здесь q_1 — количество тепла, полученное от горячего

в двигателе адиабатическое; как было указано в § 27, адиабата в is -диаграмме изображается вертикальной линией. Поэтому из точки 1 проводим линию, параллельную оси ординат до пересечения с изобарой конечного давления p_2 (точка 2). Для найденной точки находим t_2 . Значение t можно найти, если из точки 2 дойти по изобаре p_2 до верхней пограничной кривой (точка 3) и прочесть значение изотермы, проходящей через эту точку. Это и будет значение t . Иначе значение t может быть найдено по таблице насыщенного пара.

Рассмотрим, от каких величин зависит термический, к. п. д. цикла Ренкина, определяемый по формуле (60). Начальное теплосодержание i_1 пара, поступающего в двигатель, зависит от состояния пара, т. е. от его давления p_1 и температуры t_1 . Конечное теплосодержание i_2 пара зависит от того, до какого давления p_2 расширится пар в турбине; от p_2 зависит и температура t конденсата, получающегося в результате конденсации пара в конденсаторе. Таким образом, мы видим, что значение η_t зависит от того, каковы давление и температура пара в начальном состоянии (при поступлении в двигатель) и каково давление его по выходе из двигателя (т. е. каково давление в конденсаторе).

Нетрудно установить, как именно влияет начальное состояние пара и давление при выходе из двигателя на термический к. п. д. цикла. Для этого необходимо подсчитать его значение для ряда случаев. Так, для того чтобы выяснить, как влияет начальное давление на величину термического к. п. д., надо подсчитать значение к. п. д. для ряда случаев, отличающихся между собой только начальным давлением; для выявления влияния температуры пара нужно сделать те же просчеты изменяя значение температуры; так же поступают, желая выявить влияние конечного давления пара (т. е. пара, выходящего из турбины и поступающего в конденсатор).

В нижеследующих трех таблицах приведены подсчитанные таким образом значения η_t , выявляющие влияние параметров состояния пара на экономичность процесса превращения тепловой энергии в механическую. Так, из таблиц видно, что *увеличение давления и температуры пара, поступающего в двигатель, влечет за собой увеличение термического к. п. д. цикла; благоприятным для*

η_t является и уменьшение давления пара, выходящего из двигателя.

Итак, для повышения экономичности превращения тепла в работу в цикле Ренкина требуется, чтобы в двигатель поступал пар максимально возможных давления

Таблица I

Значение термического к. п. д. цикла Ренкина для различных начальных давлений

p_1 ата	15	25	50	75	100	125
η_t	0,340	0,368	0,388	0,404	0,414	0,420

Для всех случаев принято: $p_2=0,04$ ата, $t_1=400^\circ$ С.

Таблица II

Значение термического к. п. д. цикла Ренкина для различных начальных температур

t° С	300	350	400	450	500	550
η_t	0,374	0,380	0,388	0,395	0,401	0,408

Для всех случаев принято: $p_1=50$ ата, $p_2=0,04$ ата.

Таблица III

Значение термического к. п. д. цикла Ренкина для различных конечных давлений

p_2 ата	0,04	0,1	0,8	1,2	2	3	5	8
η_t	0,388	0,363	0,295	0,277	0,254	0,222	0,207	0,178

Для всех случаев принято: $p_1=50$ ата, $t_1=400^\circ$ С.

и температуры, а выходил из двигателя — возможно низкого давления. Однако, и то и другое имеет свой предел. Чем выше давление, тем труднее и дороже по-

строить самый двигатель, котел и всю запорную аппаратуру для пара (вентили, задвижки). В общем в настоящее время считают целесообразным строить станции на начальное давление пара приблизительно 100 атa (в котле).

Для турбин, имеющих мощность $25\text{--}100$ тыс. *квт*, давление 90 атa принимают сейчас в качестве наивысшего стандартного давления. Для турбин меньшей мощности стандартное давление составляет $30\text{--}35 \text{ атa}$.

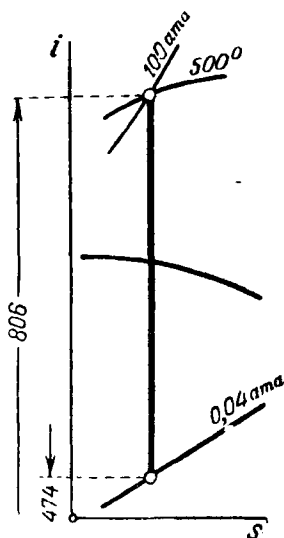
Чем выше температура, тем труднее подобрать металлы, которые могут надежно работать. Считают, что специальные стали, применяемые для пароперегревателя и для лопаток паровых турбин, в состоянии выдерживать температуры примерно до 550°C . Эти температуры и считают максимально допустимыми для паросиловых установок.

При входе в турбину высокого давления температура пара установлена в $480\text{--}500^\circ \text{C}$.

Эти значения параметров пара нельзя считать предельными. Советские научные учреждения и заводы для получения еще большей экономичности готовятся в следующем пятилетии перейти на сверхвысокие параметры пара—давление $200\text{--}225 \text{ ат}$ и температуру $550\text{--}600^\circ \text{C}$.

Минимальное давление в конденсаторе, ниже которого обычно не идут, для турбин составляет $0,03\text{--}0,04 \text{ атa}$. При дальнейшем уменьшении давления удельный объем пара становится очень большим; это влечет за собой чрезмерное увеличение размеров лопаток, да и температура циркуляционной воды часто недостаточно низка и не позволяет еще более снизить давление в конденсаторе.

Рассмотрим теперь баланс тепла конденсационных станций. Для этого подсчитаем в качестве примера тер-



Фиг. 108. Адиабатический процесс в is -диаграмме.

мический к. п. д. цикла Ренкина в установке, работающей при следующих параметрах пара (фиг. 108):

начальные параметры $p_1=100 \text{ ата}, t_1=500^\circ\text{С},$
 конечное давление $p_2=0,04 \text{ ата}.$

По ts -диаграмме находим

$$\begin{aligned} i_1 &= 806 \text{ ккал/кг}, \\ i_2 &= 474 \text{ ккал/кг}, \\ t &= 28,6^\circ\text{С}. \end{aligned}$$

На основании этих данных находим, что в механическую энергию превращается на 1 кг пара, поступающего в турбину, количество тепла, равное

$$i_1 - i_2 = 806 - 474 = 332 \text{ ккал/кг}.$$

В котле на 1 кг пара подведено тепла

$$i_1 - t = 806 - 28,6 = 777,4 \text{ ккал/кг}.$$

Отсюда термический к. п. д. описанной установки составляет

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - t} = \frac{332}{777,4} = 0,427 = 42,7\%.$$

(Значения термических к. п. д. для стандартных параметров пара см. в прим. 25.)

Можно принять, что в зависимости от параметров состояния термический к. п. д. не превышает в общем значений 40—45%. Это значит, что около 55—60% тепла пара в силу второго закона термодинамики не может быть превращено в механическую энергию и в этом смысле теряется; охлаждающая вода, выходящая из конденсатора и несущая с собой это тепло; имеет низкую температуру и поэтому не может быть использована и как греющее тело.

Если к тому же учесть неизбежные потери в котельной и машинном зале, то получится, что в конденсационной паросиловой установке используется от 18 до 32% тепла, выделяющегося при сгорании топлива.

Баланс тепла топлива будет примерно такой: около 50% теряется с охлаждающей водой конденсатора, 20%

составляют потери в котельной, 5% — потери машинного зала и только 25% используется для получения электрической энергии.

Этот баланс представлен схематически на фиг. 109. Здесь показаны основные потоки тепла (Б, В, Г, Д), на которые разделяется суммарное количество тепла А, выделившееся при сгорании топлива.

Расход пара в идеальной установке, работающей по циклу Ренкина, на производство 1 квтч электрической энергии можно найти по формуле

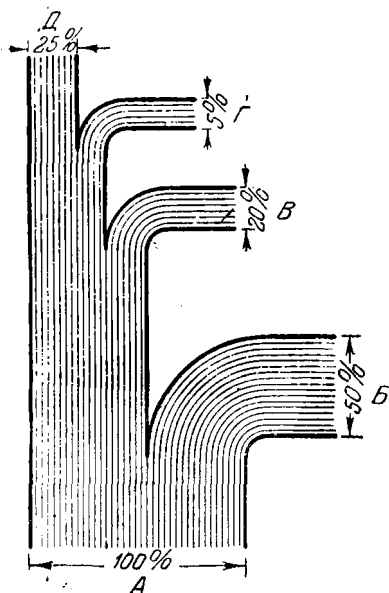
$$d_0 = \frac{860}{i_1 - i_2} \text{ кг/квтч.} \quad (61)$$

Здесь i_1 и i_2 — значения теплосодержания пара при поступлении и выходе из двигателя; их находят по ts -диаграмме, как описано ранее.

Смысл этой формулы понятен из следующих соображений: разность $i_1 - i_2$ представляет собой количество тепла, перешедшее в работу на 1 кг пара, поступившего в двигатель; из § 15 известно, что 1 квтч электрической энергии эквивалентен 860 ккал; следовательно, для того чтобы получить 1 квтч = 860 ккал, нужно к двигателю подвести столько килограммов пара, сколько раз разность $i_1 - i_2$ содержится в 860, что и находят делением 860 на $i_1 - i_2$.

В действительном двигателе есть ряд дополнительных потерь. Сюда относятся потери на трение в паре, в соприкасающихся частях двигателя, потери в окружающую среду и потери в электрическом генераторе.

Таким образом, в электрическую энергию в действи-



Фиг. 109. Баланс тепла паросиловой установки.

тельности превратится не вся разность $i_1 - i_2$ ккал/кг, а некоторая доля ее. Эта доля измеряется особым коэффициентом; он называется относительным электрическим коэффициентом полезного действия и обозначается $\eta_{эо}$ («эта» со значком эо). Для хороших турбогенераторов этот коэффициент составляет 0,7—0,8. Таким образом, если учесть перечисленные потери, то в электрическую энергию на 1 кг пара, поступившего в двигатель, превратится не $(i_1 - i_2)$, а $(i_1 - i_2)\eta_{эо}$. Отсюда можно найти действительный расход пара на 1 квтч с учетом потерь, если узнать, сколько раз произведение $(i_1 - i_2)\eta_{эо}$ заключается в 860, т. е. разделить 860 на $(i_1 - i_2)\eta_{эо}$. Итак, расход пара на 1 квтч в действительном двигателе составит

$$d_s = \frac{860}{(i_1 - i_2)\eta_{эо}} \text{ кг/квтч}, \quad (62)$$

Пример 25. Подсчитать значения термических к. п. д. цикла Ренкина для стандартных параметров пара:

- 1) $p_1 = 15 \text{ ата}, t_1 = 350^\circ \text{C};$
- 2) $p_1 = 29 \text{ ата}, t_1 = 400^\circ \text{C};$
- 3) $p_1 = 35 \text{ ата}, t_1 = 435^\circ \text{C};$
- 4) $p_1 = 90 \text{ ата}, t_1 = 480^\circ \text{C}.$

Конечное давление $p_2 = 0,04 \text{ ата}.$

Проведя в is -диаграмме адиабаты расширения, находим, подставляя значения в формулу (60):

$$1) \eta_t = \frac{751 - 511}{751 - 28,6} = 0,332;$$

$$2) \eta_t = \frac{771 - 499}{771 - 28,6} = 0,366;$$

$$3) \eta_t = \frac{788 - 500}{788 - 28,6} = 0,379;$$

$$4) \eta_t = \frac{796 - 474}{796 - 28,6} = 0,419.$$

38. РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ЦИКЛ. ВТОРИЧНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ПАРА

Недостаточное использование тепла пара при преобразовании его в механическую энергию заставляет искать путей к улучшению цикла паросиловой установки. Одним из способов повышения экономичности установок

является так называемый регенеративный подогрев питательной воды. Получаемый при этом цикл паросиловой установки называют регенеративным циклом. Сущность этого цикла заключается в следующем.

В цикле Ренкина конденсат, получаемый в конденсаторе, имеет температуру, равную температуре кипения воды при том давлении, при котором находится пар в конденсаторе (или, что то же, температуру конденсации пара при том же давлении). Если, например, принять, что давление в конденсаторе $p_2 = 0,04 \text{ ата}$, то по таблице насыщенного пара можно определить, что температура кипения при этом составляет $t_2 = 28,6^\circ \text{С}$. Таким образом, конденсат поступает в питательный бак и далее в котел при температуре около 29°С . Для превращения в пар этот конденсат сначала за счет тепла топлива нагревается в котельной установке до температуры кипения и затем начинается процесс парообразования. Если, допустим, давление в котле $p_1 = 100 \text{ ата}$, то теплосодержание воды в состоянии кипения составляет 334 ккал/кг . Теплосодержание же конденсата, поступающего в котел, по той же таблице $28,6 \text{ ккал/кг}$. Таким образом, чтобы 1 кг конденсата, поступающий в котел, только довести до состояния кипения, к нему нужно подвести

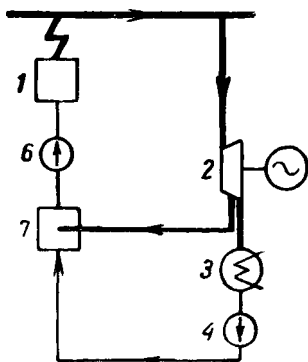
$$334 - 28,6 \approx 305 \text{ ккал/кг.}$$

Это тепло, как уже было сказано, в цикле Ренкина подводится за счет сжигаемого под котлом топлива.

Между тем пар, выходящий из турбины и поступающий в конденсатор, имеет, как мы видели, еще большое теплосодержание. Отнимаемое от него при конденсации тепло уходит с циркуляционной водой, и использовать этот пар, равно как и циркуляционную воду, которая нагревается за его счет, в этих условиях не представляется возможным.

Совершенно очевидно, что было бы очень выгодно нагревать конденсат, выходящий из турбины, не за счет тепла топлива, а паром, совершившим работу в турбине. Этого нельзя сделать тем паром, который совершил расширение в турбине до давления в конденсаторе $p_2 = 0,04 \text{ ата}$, потому что его температура при расширении понизилась уже до $28,6^\circ \text{С}$, но для этих целей

можно использовать пар, совершивший частичное расширение в турбине и имеющий при выходе более высокую температуру. В этом случае часть тепловой энергии пара, поступившего в двигатель, будет затрачена на совершение работ, а другая — на нагрев конденсата. Так и делают. Часть поступающего в турбину пара отводят наружу из какой-либо промежуточной ступени. Другая часть пара, поступившего в двигатель (большая), расширяется от начального давления до давления в конденсаторе и совершает обычный цикл Ренкина.



Фиг. 110. Схема паросиловой установки с регенеративным подогревом и смешивающим подогревателем.

На фиг. 110 представлена схема установки с одним отбором для подогрева питательной воды. На схеме цифрами 1, 2, 3, 4 отмечены те же агрегаты, что и на фиг. 105 (питательный бак для простоты не показан). Выходящий из конденсатора конденсат имеет попрежнему температуру $28,6^{\circ}\text{C}$ (при давлении пара в конденсаторе $p_2 = 0,04 \text{ ата}$). Однако в дальнейшей схеме цикла отличается от цикла Ренкина. Конденсат из питательного бака поступает не прямо в котел, а идет сначала в подогреватель 7. Сюда же поступает пар, отбираемый из турбины. Этим паром и нагревают конденсат до желаемой температуры, зависящей от давления отбираемого пара, и только после этого конденсат направляют в котел.

Как видно, выгода в сравнении с циклом Ренкина заключается в том, что у той части пара, который отбирают из турбины, скрытая теплота парообразования не пропадает с циркуляционной водой, а передается конденсату (как говорят, восстанавливается или регенерируется). Это и увеличивает термический к. п. д. установки.

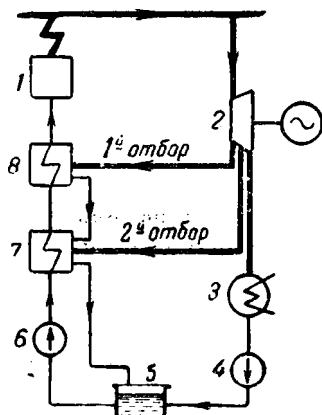
Казалось бы, что чем выше будет поднята температура конденсата за счет отъемного пара из двигателя, тем выгоднее. Но более высокой температуры нагрева конденсата можно достичь, отнимая из турбины пар более высокого давления, а это снижает выгоду, так как

уменьшает совершаемую отбираемым паром работу. Поэтому подогрев конденсата редко доводят выше чем до $180\text{--}200^\circ\text{C}$. Для получения максимальной выгоды нагрев конденсата совершают ступенями, устраивая несколько отборов, чтобы отбираемый пар совершил возможно большую работу в турбине. Однако обычно не делают более трех-четыре отбора, чтобы вся установка не получилась слишком сложной, дорогой и неудобной в эксплуатации.

Подогреватели для конденсата могут быть смешивающие: в них конденсат и отбираемый из турбины пар смешиваются друг с другом; бывают и поверхностные подогреватели, в них смешения не происходит. Поверхностные подогреватели устроены так же, как и конденсаторы, т. е. в них имеется большое количество трубок, по которым проходит нагреваемый конденсат. Трубки омываются паром, поступающим из турбины.

Схема паросиловой установки с двумя отборами и с поверхностными подогревателями представлена на фиг. 111. На ней цифрами 1, 2, 3, 4 и 6 отмечены те же агрегаты, что и на фиг. 105. Дополнительно здесь означают: 5 — питательный бак, 7 — второй подогреватель и 8 — первый подогреватель.

Как видно из схемы, конденсат из сборного бака поступает во второй подогреватель; сюда же поступает и пар из второго отбора. Здесь совершается частичный нагрев конденсата до температуры, соответствующей температуре отбираемого пара. В дальнейшем конденсат из второго подогревателя поступает в первый; сюда же поступает и пар из первого отбора. Температура пара, отбираемого из первого отбора, более высокая, чем во втором отборе, поэтому здесь совершается дальнейший подогрев питательной воды. Конденсат отборного пара,



Фиг. 111 Схема паросиловой установки с регенеративным подогревом и двумя поверхностными подогревателями.

получившийся в первом и втором подогревателях, поступает в питательный бак, что и указано стрелками.

В настоящее время регенеративный подогрев питательной воды является необходимым устройством на каждой паросиловой электростанции. Регенерация дает до 7—8% экономии топлива.

Вторичный перегрев пара. В § 37 было указано, что повышение начального давления пара увеличивает термический к. п. д. установки. Однако вместе с повышением давления появляется одно неблагоприятное явление: сильно возрастает влажность пара в конце расширения пара в турбине; появляющиеся в паре капельки воды поступают с большой скоростью на лопатки последних ступеней турбины и постепенно разрушают их.

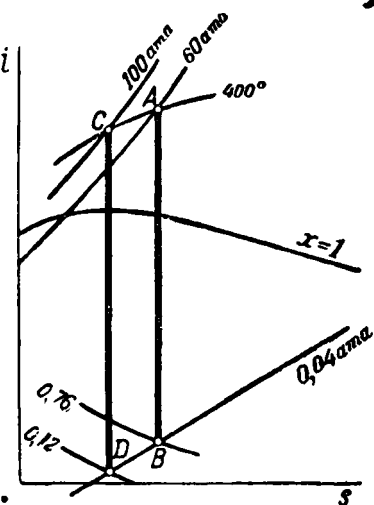
Увеличение влажности пара с ростом давления хорошо видно, если изобразить в *ts*-диаграмме процесс расширения пара в турбине. На фиг. 112 представлены два таких процесса. В одном случае линия *AB* представляет собой расширение пара от $p_1 = 60 \text{ ата}$ и $t_1 = 400^\circ \text{C}$ до $p_2 = 0,04 \text{ ата}$. В другом случае линия *CD* представляет собой расширение пара от $p_1 = 100 \text{ ата}$, $t_1 = 400^\circ \text{C}$ до $p_2 = 0,04 \text{ ата}$. Как видно, эти два случая отличаются между собой по начальному давлению. Вместе с тем из этой диаграммы видно, что начальному давлению $p_1 = 60 \text{ ата}$ соответствует в конце адиабатического расширения пар со степенью сухости $x_2 = 0,76$ (в действительном двигателе степень сухости получится выше), если же пар имеет начальное давление $p_1 = 100 \text{ ата}$, то в конце расширения его степень сухости уже меньше и составляет $x_2 = 0,72$.

Для того чтобы избежать большой влажности пара (считается возможным иметь степень сухости не меньше 0,88—0,9) при высоком начальном давлении, прибегают к промежуточному (вторичному) перегреву пара. В этом случае весь процесс расширения пара между начальным и конечным давлением разбивают на две части, соответственно чему и устанавливают две турбины: одну высокого (первая ступень), другую низкого давления (вторая ступень).

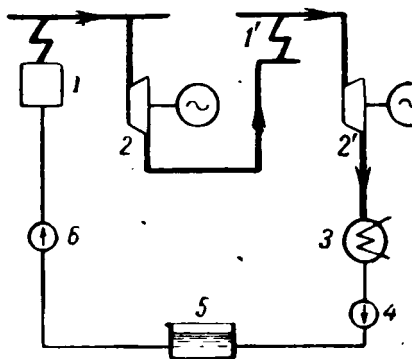
На фиг. 113 представлена схема станции со вторичным перегревом. На ней цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6 показаны агрегаты такие же, как и на фиг. 105. Цифрой 1'

обозначен вторичный перегреватель. Турбина высокого давления помещена слева, турбина низкого давления — справа (2').

Работа пара в такой установке происходит следующим образом. Пар из перегревателя котла поступает в турбину высокого давления и расширяется в ней до какого-то промежуточного давления. Если, например, начальное давление пара $p_1 = 100 \text{ ата}$, то в турбине



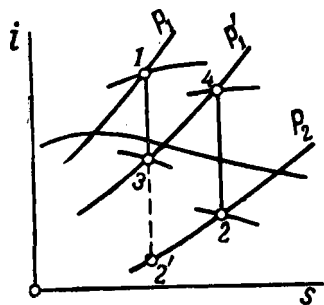
Фиг. 112. Понижение степени сухости пара при увеличении начального давления пара (*is*-диаграмма).



Фиг. 113. Схема паросиловой установки со вторичным перегревом пара.

высокого давления расширение производится приблизительно до $p_1' = 30 \text{ ата}$. Выходящий из турбины высокого давления пар вновь перегревается, для чего его большей частью снова направляют в котельную, и там он проходит через вторичный перегреватель котла, где и получает дополнительное количество тепла при постоянном давлении. Вновь перегретый пар из котельной направляют в машинный зал, и там он поступает в турбину низкого давления, где расширяется от промежуточного давления до давления в конденсаторе. Для нашего примера расширение в турбине низкого давления 2' происходит от давления $p_1' = 30 \text{ ата}$ до $p_2 = 0,04 \text{ ата}$.

Изобразим в is -диаграмме расширение пара в цикле со вторичным перегревом (фиг. 114). Линия $1-3$ изображает адиабатическое расширение пара в цилиндре высокого давления. Так как вторичный перегрев происходит при $p = \text{const}$, то он изобразится отрезком $3-4$, идущим вдоль изобары $p'_1 = 30 \text{ ата}$. Закончится он в точке 4, показывающей, до какой температуры происходит вторичный перегрев пара. Из точки 4 начинается линия $4-2$, характеризующая процесс адиабатического расширения пара в турбине низкого давления. Процесс заканчивается в точке 2, которая дает возможность найти степень сухости в конце расширения при наличии вторичного перегрева.



Фиг. 114. is -диаграмма расширения пара в цикле со вторичным перегревом.

В is -диаграмме хорошо видно, что конечная степень сухости при этом сильно повышается. Вместе с тем в is -диаграмме можно определить, какова была бы степень сухости, если бы расширение происходило без вторичного перегрева. Для этого нужно из точки 3 продолжить адиабату $1-3$ до пересечения с изобарой $p_2 = 0,04 \text{ ата}$. Пересечение происходит в точке $2'$, которая показывает, что если бы вторичного перегрева не производить, то степень сухости была бы много меньше, чем при наличии вторичного перегрева.

Введение вторичного перегрева пара несколько улучшает экономичность станции, но сильно усложняет оборудование и условия эксплуатации. Поэтому там, где влажность пара не превосходит нормальной, промежуточный перегрев пара не применяют.

39. РАСХОД ТОПЛИВА

Количество топлива, которое нужно сжечь в топке котла для того, чтобы получить на электростанции, работающей по одному из описанных нами циклов, 1 квтч электрической энергии, называется удельным расходом топлива. Эта величина является важнейшим

показателем работы электростанций. Для того чтобы найти удельный расход топлива, нужно прежде всего знать расход пара d_3 на 1 квтч, который вычисляют по приведенным выше формулам или по данным специальных испытаний паровой турбины или машины. Подсчитаем, сколько тепла нужно израсходовать в котле, чтобы получить d_3 кг пара.

Один килограмм воды (конденсата) поступает в котел с температурой t_0 , а выходит из котла пар с теплосодержанием i_1 . Следовательно, для того чтобы получить в котле 1 кг пара, нужно к поступившему в котле конденсату подвести тепла

$$i_1 - t_0 \text{ ккал/кг.}$$

Так как для получения 1 квтч электрической энергии требуется d_3 кг пара, то в котле на 1 квтч требуется подвести к воде тепла

$$d_3(i_1 - t_0) \text{ ккал/квтч.}$$

Это тепло подводится к воде от горячих газов, получающихся при горении топлива.

Каждый килограмм топлива при полном сгорании выделяет количество тепла, равное низшей теплотворной способности Q_n^p рабочего топлива.

Однако не все тепло Q_n^p можно в котле передать воде. Часть этого тепла теряется в процессе работы котла, а именно: мелкие кусочки топлива проваливаются несгоревшими через решетку топки; стенки котла отдают некоторое количество тепла окружающему воздуху; газы, покидающие котел, уносят с собой также некоторое количество тепла из того, которое выделилось при сгорании. Частное от деления количества тепла, переданного воде, на все количество тепла, выделившееся при сгорании топлива, называется коэффициентом полезного действия котельной установки и обозначается $\eta_{к\text{у}}$. Значение $\eta_{к\text{у}}$ для работающей установки находят специальным испытанием, а для проектируемой — расчетом.

Для того чтобы найти количество тепла, которое передается воде при сгорании 1 кг топлива, нужно,

очевидно, умножить Q_n^p на $\eta_{ку}$. Итак, при сгорании 1 кг топлива рабочее тело в котле получает $Q_n^p \cdot \eta_{ку}$ ккал тепла. Если для получения 1 квтч электрической энергии требуется $d_s(i_1 - t_s)$ ккал тепла, то, очевидно, килограммов топлива для этого будет израсходовано столько, сколько раз $Q_n^p \cdot \eta_{ку}$ содержится в произведении $d_s(i_1 - t_s)$. Это находится делением. Если теперь расход топлива на 1 квтч обозначить b , то получим

$$b = \frac{d_s(i_1 - t_s)}{Q_n^p \eta_{ку}} \text{ кг/квтч}, \quad (63)$$

В следующей таблице приводятся значения к. п. д. и расхода топлива для различных паровых электростанций:

Характеристика оборудования	К. п. д. станции, %	Удельный расход условного топлива, кг на выработанный киловаттчас
Локомобили на 10 — 12 ата, работающие без конденсатора	5—6	2,46—2,04
Локомобили на 12 — 15 ата с конденсацией и центральным экономайзером . .	12—14	1,02—0,88
Турбина на 12 — 15 ата и 350° С малой мощности	14—15	0,88—0,82
Турбины на 29 ата и 400° С средней мощности	22—23	0,56—0,53
Турбины на 29 ата и 400° С большой мощности	24—25	0,51—0,49
Турбины на 90 ата и 480° С большой мощности	29—31	0,42—0,40

Пример 26. Испытанием установлено, что среднесуточный расход пара турбиной составляет 5,2 кг/квтч. Станция сжигает подмосковный уголь с теплотворной способностью $Q = 3\,200$ ккал/кг. Параметры пара, потребляемого турбиной, $p_1 = 30$ ата, $t_1 = 400^\circ \text{С}$. Температура питательной воды 120°С . Коэффициент полезного действия котельной 0,82. Вычислить суточный расход топлива на станции, если выработка станции составляет $\mathcal{E} = 400\,000$ квтч/сутки.

Находим по i_s -диаграмме теплосодержание пара, характеризуемого параметрами $p_1 = 30$ ата, $t_1 = 400^\circ \text{С}$; оно составляет $i_1 = 715$ ккал/кг.

По формуле (63) находим расход топлива на 1 квтч

$$b = \frac{d_g (i_1 - t_g)}{Q_n^p \eta_{ку}}$$

Подставляя значения, получим

$$b = \frac{5,2 (715 - 120)}{3 \cdot 200 \cdot 0,82} = \frac{5,2 \cdot 595}{3 \cdot 200 \cdot 0,82} = 1,18 \text{ кг/квтч.}$$

Отсюда суточный расход топлива

$$B = 1,18 \cdot 400 \ 000 = 472 \ 000 \text{ кг/сутки.}$$

$$B = 472 \text{ т/сутки.}$$

40. ТЕПЛОФИКАЦИЯ

Изучая баланс тепла, выделяющегося при сгорании топлива на конденсационной станции, мы видим, что тепло на ней используется в очень малой степени. Только сравнительно незначительная часть его, примерно 25—30% (и это только на лучших станциях), полезно используется, превращаясь в механическую и затем в электрическую энергию. Мы выяснили и причину такого низкого использования тепла топлива. Она заключается прежде всего в том, что преобразованию тепла в механическую энергию ставит предел второй закон термодинамики. Некоторое увеличение использования тепла здесь можно получить только за счет введения тех или иных усовершенствований. При этом напрашивается мысль: если использование тепла нельзя повысить за счет преобразования его в механическую энергию, то нельзя ли добиться использования не превращенного в механическую энергию тепла для каких-либо других, например, нагревательных целей? При ближайшем рассмотрении оказалось, что на рассмотренных нами конденсационных станциях возможности в этом направлении чрезвычайно ограничены. Как мы видели, не превращенное в механическую энергию тепло в громадной своей части покидает установку с охлаждающей водой конденсатора. Охлаждающая вода не может быть использована ввиду недостаточно высокой ее температуры. Таким образом *отработавший на конденсационных станциях пар не годится для производства работы, а для нагревательных целей ввиду низкой температуры область применений его чрез-*

вычайно ограничена (иногда эту воду употребляют для отопления парниковых хозяйств, если станция расположена не в городе).

Для того чтобы сделать возможным использование не превращенного в механическую энергию тепла и тем самым повысить коэффициент использования тепла топлива, надо повысить температуру пара, покидающего двигатель. Пример такого использования мы видели в регенеративном цикле. В этом цикле некоторая часть пара расширяется не полностью до давления в конденсаторе, а до более высокого давления, при котором температура его может быть достаточно высокой для того, чтобы этот пар оказался годным для нагревательных целей, как говорят, для теплового потребления. В регенеративном цикле этот пар употребляют для нагревания воды, поступающей в котел. В этом случае часть тепла, подведенного к отбираемому из турбины пару, превращается в работу, а остальная используется для нагревания воды, т. е. все тепло, подведенное к этому пару, используется полностью. Однако в регенеративном цикле нельзя в достаточной мере добиться такого использования, так как для нагревания питательной воды требуется мало пара (10—20%), и поэтому количество механической энергии, выработанной отборным паром, мало. Большая часть требующейся электрической энергии, вырабатывается за счет пара, поступающего затем в конденсатор, что создает большие количества неиспользованного тепла.

Но нельзя ли организовать выработку всей или почти всей электрической энергии таким образом, чтобы тепло, отдаваемое холодному источнику, можно было использовать? Оказывается — можно. Дело в том, что имеется громадное число предприятий, которым требуется для производства тепловая энергия. Сюда относятся текстильные, пищевые, химические, металлургические предприятия. Кроме того в зимнее время в большом количестве нужен пар для отопления жилых зданий и предприятий. Значит для возможно большего использования тепла топлива надо пар, совершивший работу в двигателе, после этого направлять к использованию для теплового потребления на перечисленных предприятиях или для отопления жилых зданий. При этом в турбине он не должен расширяться полностью до давления 0,04 *ата*, а лишь до тако-

го более высокого давления, при котором его температура соответствует требующейся для предприятия, на которое этот пар поступает. Правда, при этом расход пара на выработку 1 *квтч* электрической энергии заметно повышается, но это не ухудшает экономичности выработки электрической энергии, так как все тепло этого пара по выходе из турбины оказывается использованным. В итоге получается значительная экономия топлива по сравнению с тем расходом, который получился бы, если бы электрическая энергия вырабатывалась на конденсационной станции, а пар, необходимый предприятию, производился в отдельной котельной.

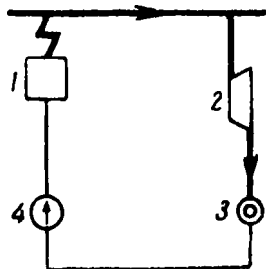
Так как в этом случае конечное давление пара повышается, термический к. п. д. становится меньше; это указывает на то, что доля тепла, превращенного в механическую энергию, уменьшилась. Однако, вследствие того, что тепло отработавшего пара здесь используется, общее использование тепла увеличивается.

Приведем результаты подсчета расхода топлива на двух установках: в одной из них пар для производства берут из турбины, и таким образом до поступления на производство он вырабатывает электрическую энергию. В другом случае пар в том же количестве и тех же параметров получают в котельной низкого давления, а электрическая энергия вырабатывается на конденсационной станции. Условия работы первой установки следующие: турбина, мощность которой $N = 12\,000$ *квт*, отдает весь отработавший в ней пар на предприятие для технологических нужд. Конденсат из производства возвращается при температуре насыщения, соответствующей давлению пара. Начальные параметры пара, потребляемого турбиной:

$$p_1 = 35 \text{ ата}, \quad t_1 = 450^\circ \text{ С.}$$

Давление отработавшего пара $p_2 = 2$ *ата*.

Схема станции, здесь описанной, изображена на фиг. 115.



Фиг. 115. Схема паросиловой установки, имеющей турбину с противодавлением.

Подробный расчет показывает, что расход топлива на совместную выработку электрической энергии и пара в этой установке составляет

$$B = 7,22 \text{ т/час.}$$

Если же электрическую энергию производить на конденсационной станции, а для снабжения паром предприятия построить отдельную котельную, то расход топлива составит

на выработку электроэнергии . . .	4,55 т/час
„ „ „ пара	5,48 „

Итого . . . 10,03 т/час

Из сравнения видно, что во втором случае для получения того же количества электрической энергии и пара для производства израсходовано топлива значительно больше. Экономия в первом случае составляет

$$\frac{10,03 - 7,22}{10,03} \cdot 100 = 28,1 \%$$

Экономия получилась бы еще большей, если сравнение произвести для установок высокого давления.

Итак, мы видим, что наиболее экономичное использование тепла топлива получается тогда, когда электрическая станция снабжает предприятия и население не только электрической энергией, но и тепловой для промышленных и бытовых нужд или для отопления. В этом случае процесс выработки электрической энергии построен на ином, более выгодном принципе, при котором теплота отработавшего пара не уходит бесполезно с циркуляционной водой, а отправляется для использования.

Такой способ называется **комбинированным** способом производства электрической и тепловой энергии.

Комбинированный способ производства электрической и тепловой энергии является основой **тепловой** **электростанции**, широко проводимой в СССР.

Электрические станции, на которых получение электрической и тепловой энергии для теплового потребления производится комбинированным способом, называются **теплоэлектроцентралями** или коротко **ТЭЦ**.

Устройство энергетического хозяйства, в котором от ТЭЦ производится централизованное снабжение электрической энергией и теплом, требует правильного размещения станций с точки зрения как имеющихся залежей топлива, так и расположения предприятий района, потребляющих электрическую и тепловую энергию. Иначе говоря, использование выгод, даваемых выработкой энергии на ТЭЦ, возможно лишь при организации хозяйства на плановых началах, имеющихся только при социалистическом хозяйстве. При частновладельческой организации хозяйства использованию ТЭЦ ставится предел различными интересами предприятий, являющихся потребителями тепла и электрической энергии. Вот почему СССР по развитию теплофикации стоит на первом месте в мире. Дореволюционная Россия не знала теплофикации, поэтому можно считать, что теплофикация — результат технической политики Советской власти.

Партия и правительство СССР уделяют большое внимание теплофикации. В постановлении ЦК ВКП(б) и СНК СССР от 10/VI 1935 г. «О генеральном плане реконструкции г. Москвы» сказано: «Важнейшей задачей реконструкции городского хозяйства Москвы является ее теплофикация — основное средство для высвобождения города от дальнепривозного топлива, для рационализации его теплового хозяйства и дальнейшего повышения электроснабжения города».

В решениях XVIII съезда ВКП(б) также указывается на необходимость развития теплофикации и производства теплофикационных турбин.

В законе о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг. говорится: «...закончить строительство и ввести в действие 37 районных тепловых электростанций, в том числе 21 теплоэлектроцентраль».

41. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ. СТРОИТЕЛЬСТВО СТАНЦИЙ В СССР

Есть несколько типов установок, служащих для выработки электрической энергии. В крупных промышленных районах электростанции по преимуществу строят вблизи мест добычи топлива, к месту же потребле-

ния электрической энергии от этих станций прокладывают провода высокого напряжения, по которым и передается электрическая энергия. Из экономических соображений и в целях надежности линии высокого напряжения, идущие от различных станций данного района, соединены между собой, так что они образуют общую сеть своего района. Это дает возможность более правильного экономического использования оборудования станций путем максимальной загрузки тех из них, которые работают на менее ценном местном топливе, а при одинаковом топливе — тех из них, на которых установлено более совершенное оборудование.

Кроме того при наличии общей сети высокого напряжения каждая из станций является резервом (запасом) для другой.

Станция, служащая для централизованного снабжения района электрической энергией, называется центральной электрической станцией или коротко ЦЭС. Иногда в данном промышленном районе имеется несколько ЦЭС, работающих на общую электрическую сеть района.

Часто по тем или иным соображениям отдельные заводы имеют свои электростанции, которые при наличии в этом районе объединения ЦЭС присоединяются к его электрической сети. Такие заводские станции называются блокстанциями.

Станции, работающие в городах и дающие ток главным образом для освещения и мелким промышленным предприятиям, называются коммунальными электростанциями.

Как показывает приведенный в предыдущем параграфе расчет, наиболее выгодно по расходу топлива ставить на ТЭЦ такие турбины, из которых весь отработавший пар направляется для теплового использования. Такие турбины называются турбинами с противодавлением, так как пар из них выходит с некоторым давлением, более высоким, чем давление в конденсационных турбинах.

На фиг. 115 изображена схема станции, на которой установлена турбина с противодавлением. На этой схеме означают: 1 — котел с перегревателем; 2 — турбина с противодавлением; 3 — производство, потребляющее пар из турбины; 4 — питательный насос.

Однако турбины с противодавлением большей частью неудобны для ТЭЦ по следующим соображениям. Весь пар, выходящий из турбины, направляют на производство, и поэтому электрическая мощность, развиваемая этими турбинами, зависит от количества пара, требующегося для производства, и в тех случаях, когда сокращается потребляемое количество пара, падает и мощность двигателя. При отсутствии теплового потребления такая турбина, очевидно, не может находиться в работе. Вследствие этого турбина с противодавлением может быть хорошо использована главным образом на сравнительно небольших станциях заводского типа с большим и постоянным потреблением тепла для нужд производства.

Иногда применяют еще так называемые турбины с ухудшенным вакуумом. Эти турбины в периоды отсутствия тепловой нагрузки работают как конденсационные. Когда же требуется тепло для нагревательных целей, увеличивают давление пара, поступающего в конденсатор (ухудшают вакуум), охлаждающая вода выходит из конденсатора уже с более высокой температурой и в таком виде может быть использована для тепловых нужд. При работе с ухудшенным вакуумом рабочая мощность такой турбины, как и у всякой турбины с противодавлением, целиком зависит от теплового потребления.

Наиболее удобной для ТЭЦ является турбина с отбором пара. В ней по пути движения пара устраивают одну или несколько камер между ступенями, из которых можно отводить пар промежуточного давления. Этот пар направляют на производство, а также и на нужды самой станции. Остальной пар направляют в конденсатор, который работает при обычном давлении, например, $p_2 = 0,04$ ата. Такая турбина при любой потребности в тепле и даже при полном отсутствии теплового потребления может давать полную мощность, работая как чисто конденсационная турбина. В настоящее время турбины с отбором находят наибольшее распространение на ТЭЦ.

На фиг. 116 изображена схема станции, на которой установлена турбина с отбором. На этой схеме означают: 1 — котел; 2 — турбина с отбором; из отбора берут пар для производства и для регенеративного подогре-

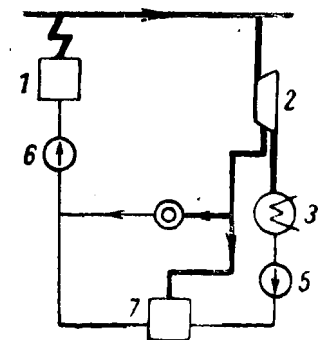
вателя; 3 — конденсатор; 5, 6 — насосы; 7 — подогреватель.

Экономика народного хозяйства в СССР основывается на совершенно иных, чем в капиталистических странах, основах, и развитие его идет своим самобытным путем.

Наше хозяйство — это плановое социалистическое хозяйство, в котором целесообразно развиваются все

отрасли, и стимулом его развития является повышение жизненного уровня всего народа.

Исходя из этих принципов и были составлены план ГОЭЛРО и последующие планы строительства электростанций. Общая мощность всех электростанций в дореволюционной России составляла 1 098 000 *квт* при выработке в 2 млрд. *квтч* в год. Общая же мощность станций к концу пятилетия 1946—1950 гг. будет доведена до 22,4 млн. *квт* при выработке в 82 млрд. *квтч* в год.



Фиг. 116. Схема паросиловой установки, имеющей турбину с отбором пара.

В первый период строились, главным образом, конденсационные станции; начало развития теплофикации относится к 1925 г., но уже перед Великой Отечественной войной по мощности теплоэлектроцентралей и длине тепловых сетей наша страна была первой в мире.

Вместе с ростом мощностей электростанций и развитием теплофикации происходил переход на использование пара все более высоких параметров. В дореволюционной России использовались параметры: давление — 15 *ата* и температура 350° С. В период 1930—1932 гг. был совершен переход на параметры 29 *ата* и 400° С (перед турбинами). В годы, предшествовавшие Великой Отечественной войне, начался переход на более высокие параметры пара, и был построен ряд станций, использующих давление 60—100 *ата* и соответственно более высокие температуры пара. После Великой Отечественной войны широким фронтом осуществлен переход на давление пара 90 *ата* и температуру 480° С (перед тур-

бинами), и в настоящее время ведутся подготовительные работы к переходу на сверхвысокие параметры пара.

В примере 25 показан рост экономичности цикла Ренкина при переходе на высокие параметры пара. Произведенные подсчеты показывают, что на действующих станциях переход от параметров 15 ата и 350° С к параметрам 29 ата и 400° С дает экономию топлива около 25%, переход же от 29 ата и 400° С к 90 ата и 480° С — 17%; дальнейший переход к сверхвысоким параметрам может дать дополнительно еще около 15% экономии топлива.

Советские теплотехники за прошедший период приобрели большой опыт в строительстве и эксплуатации тепловых электрических станций. За этот период ими решен ряд сложных теплотехнических проблем: разрешены в большей своей части вопросы сжигания низкосортных топлив; решены сложные вопросы, связанные с поведением рабочего тела внутри котла, достигнуты значительные успехи в проблеме водоподготовки, изучено поведение металла и др. Советская теплотехника догнала и во многих вопросах перегнала зарубежную технику строительства и эксплуатации электростанций.

В текущем пятилетии совершается широкое внедрение в практику эксплуатации электростанций автоматического регулирования тепловых процессов. Автоматическое регулирование дает увеличение к. п. д. станции, снижает аварийность, уменьшает количество эксплуатационного персонала. Научно-исследовательские институты и заводы страны разработали ряд систем автоматического регулирования тепловых процессов, которые уже внедрены в практику эксплуатации станций.

В технике строительства станций следует отметить широко внедренный во время Великой Отечественной войны так называемый «блочный» метод монтажа котлов. При этом методе, в отличие от монтажа котлов «россыпью», при котором каждая деталь поднимается и монтируется отдельно, большие узлы котла монтируются внизу и затем в собранном виде (блоками) поднимаются и устанавливаются на свое место.

Блочный метод монтажа котельных агрегатов значительно уменьшает время монтажа и удешевляет его. В настоящее время монтажные организации разрабаты-

вают методы такого строительства станций, при котором возведение здания станции и монтаж его агрегатов идут одновременно. Решение этой проблемы будет способствовать дальнейшему сокращению сроков и удешевлению строительства электрических станций.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

24. Изложите своими словами содержание первого и второго закона термодинамики.

25. Какие машины называются «перпетуум мобиле первого и второго рода» и почему их нельзя построить?

26. Как происходит изменение состояния рабочего тела в цикле Карно?

27. Что показывает термический к. п. д.?

28. Расскажите, из каких процессов состоит цикл Дизеля?

29. Какие основные потери тепла имеются в двигателях внутреннего сгорания? Укажите их приблизительное численное значение.

30. Из каких элементов состоит рабочее топливо?

31. Что такое коэффициент избытка воздуха и отношению каких величин он равен?

32. Как подсчитать процентное содержание CO_2 в топке при полном горении?

33. Какие существуют двигатели, работающие водяным паром? Каковы основные принципы их работы?

34. Расскажите по чертежу электростанции, как она работает; укажите путь топлива, газов, воды, пара.

35. Изобразите схему цикла Ренкина и расскажите, как происходит изменение состояния рабочего тела в нем.

36. Напишите формулу термического к. п. д. цикла Ренкина и расскажите, что означают в нем отдельно числитель и знаменатель.

37. От каких факторов и как зависит термический к. п. д. цикла Ренкина?

38. Как нагревается конденсат в цикле Ренкина и как в регенеративном цикле?

39. Изобразите схему регенеративного цикла и расскажите, как происходит изменение состояния рабочего тела в нем.

40. Какова цель введения вторичного перегрева? Расскажите по схеме цикла с вторичным перегревом, какие процессы совершает рабочее тело?

41. Какое отличие ЦЭС от ТЭЦ? Какая основная потеря тепла в ЦЭС и на что используется это тепло на ТЭЦ?

42. Почему обычно не может быть использовано тепло циркуляционной воды на ИЭС?

43. Изобразите схему станции с комбинированным и раздельным производством электрической и тепловой энергией.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПРОРАБОТКИ

37. Подсчитайте термический к. п. д. цикла Карно, если температура верхнего источника $t_1 = 500^\circ \text{C}$, нижнего $t_2 = 120^\circ \text{C}$. Каково будет значение термического к. п. д.: а) если, оставив прежним значение t_2 , принять $t_1 = 300^\circ \text{C}$; б) если, оставив значение t_1 , принять $t_2 = 200^\circ \text{C}$?

Отв.: 49,3%, 63,3%, 38,8%.

38. Вычислить расход топлива на 1 л. с. ч. в двигателе, работающем на бензине с теплотворной способностью $Q = 10\,500 \text{ ккал/кг}$, если для него эффективный к. п. д. составляет 22%.

Отв.: 0,274 кг/э. с. ч.

39. Сравнить по экономичности два двигателя, из которых один расходует 0,22 кг/э. с. ч. нефти с $Q = 9\,800 \text{ ккал/кг}$, а другой 0,20 кг/э. с. ч. с $Q = 10\,200 \text{ ккал/кг}$.

Отв.: первый расходует 2 160 ккал/э. с. ч., второй 2 040 ккал/э. с. ч.

40. В одной котельной сжигают под котлом мазут с $Q_n^p = 9\,370 \text{ ккал/кг}$, а в другой — торф с $Q_n^p = 2\,000 \text{ ккал/кг}$. Сравнить для обоих видов топлива количества воздуха для горения, значения CO_2 , если для мазута $\alpha = 1,1$, а для торфа $\alpha = 1,3$.

Отв.: для мазута: $V_d = 11,5 \text{ нм}^3/\text{кг}$, $\text{CO}_2 = 14,1\%$,

для торфа: $V_d = 2,9 \text{ нм}^3/\text{кг}$, $\text{CO}_2 = 14,9\%$.

41. Найдите термический к. п. д. цикла Ренкина, если рабочее тело в нем изменяет свое состояние от

$$p_1 = 29 \text{ ата и } t_1 = 400^\circ \text{C}$$

до

$$p_2 = 0,04 \text{ ата.}$$

Отв.: 0,366.

42. Как изменится термический к. п. д. цикла (задача 41), если оставив прежними значения p_2 и t_1 , взять $p_1 = 60 \text{ ата}$. Как изменится он, если, не меняя p_1 и p_2 , взять $t_1 = 500^\circ \text{C}$; как изменится η_r , если, не меняя p_1 и t_1 , взять $p_2 = 0,06 \text{ ата}$.

43. Вычислить расход пара в установке, работающей по циклу Ренкина, если $p_1 = 90 \text{ ата}$, $t_1 = 480^\circ \text{C}$, $p_2 = 0,04 \text{ ата}$, $\eta_{эо} = 0,78$.

Отв.: 3,42 кг/квтч. •

44. Установка мощностью 12 500 квт расходует при полной нагрузке 5,0 кг/квтч пара. Топливом служит подмосковный уголь с $Q_n^p = 8\,000 \text{ ккал/кг}$. Котельная работает с $\eta_{ку} = 0,82$. Начальные параметры пара $p_1 = 35 \text{ ата}$, $t_1 = 435^\circ \text{C}$. Температура питательной воды 145°C . Определить часовой расход топлива при полной нагрузке.

Отв.: 16,8 т/час.

ГЛАВА ПЯТАЯ ТЕПЛООБМЕН

42. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

В начале этой книги было указано, что тепловая энергия имеет широкое применение не только для преобразования ее в механическую (а затем в электрическую) энергию, но что она нужна также для целей нагревания. Очень большое количество производственных процессов нуждается в тепле. В таких случаях обычно греющим телом является газообразное или жидкое тело. В качестве газообразного тела употребляют большей частью водяной пар или продукты сгорания топлива. Из жидких тел в качестве греющего тела применяют чаще всего воду.

Нагревание можно производить непосредственным смешением нагреваемого тела с греющим; можно также получить нагревание и не производя смешения — в этом случае между нагреваемым и греющим телом помещается твердая стенка, хорошо проводящая тепло.

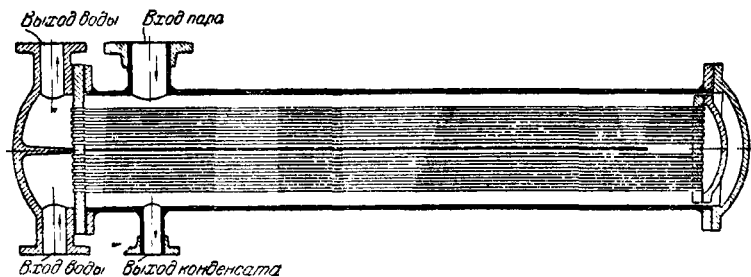
Иногда, наоборот, стремятся к тому, чтобы нагретое тело не отдавало своего тепла окружающей среде; так, трубы, по которым движется водяной пар, покрывают изоляцией из материалов, плохо проводящих тепло.

Аппараты, в которых производится нагревание одних тел другими через разделительную стенку, называются теплообменными аппаратами. Так, паровой котел есть теплообменный аппарат. В нем мы имеем несколько разных случаев обмена тепла. В кипяточных трубках происходит передача тепла от газов к кипящей воде; в перегревателе происходит теплообмен между газами и водяным паром; в трубках водяного экономайзера — между газами и водой; наконец, в воздушном экономайзере обмениваются теплом горячие газы и воздух. Другой пример теплообменных аппаратов представляют собой подогреватели, в которых производится нагрев воды для отопления и других бытовых нужд паром или другой более горячей водой.

Примером теплообменного аппарата является и конденсатор, описание которого приведено в § 35.

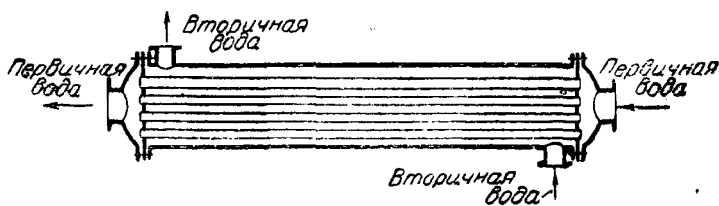
На фиг. 117 изображен подогреватель, служащий для нагревания воды паром. Вода поступает в

нижнюю половину левой крышки и из нее в нижние ряды трубок. Дойдя до правой крышки, вода здесь поворачивает и входит в верхние ряды трубок. Отсюда она поступает в верхнюю половину левой крышки и через верхний штуцер выходит из теплообменного аппарата.



Фиг. 117. Паровой подогреватель.

рата. Греющий пар поступает в верхнюю часть аппарата и омывает трубки. Отдавая свое тепло воде через стенки трубок, пар конденсируется, и конденсат через нижний штуцер выходит из теплообменного аппарата. Описанный тип подогревателя находит применение на теплоэлектроцентралях, в установках отопления промышленных предприятий и в домах в тех случаях, когда грею-



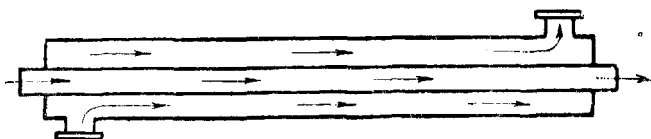
Фиг. 118. Водоводяной подогреватель.

щим телом является пар. Похожую конструкцию применяют и как водоводяной подогреватель, т. е. для тех случаев, когда греющим телом является вода, а нагреваемым также вода.

Другим типом водоводяного подогревателя является конструкция, изображенная на фиг. 118. Здесь первичная вода, т. е. греющая, движется внутри трубок, а вторич-

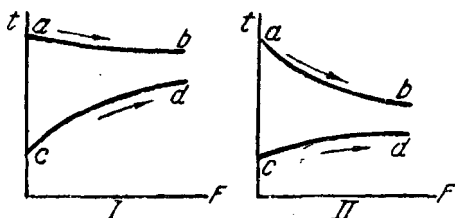
ная (нагреваемая) снаружи трубок. Направление и той и другой воды может быть изменено на обратное.

Простейшей конструкцией теплообменного аппарата является конструкция, изображенная на фиг. 119. Здесь одна труба расположена внутри другой. Вход и выход греющего и нагреваемого тела показан на чертеже стрелками.



Фиг. 119. Теплообменный аппарат („труба в трубе“) с параллельным током.

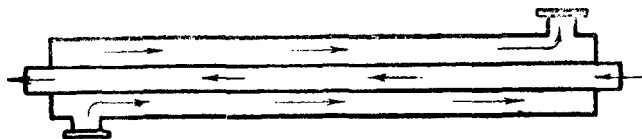
Направление движения греющего и нагреваемого тела имеет существенное значение; так, в теплообменном аппарате, изображенном на фиг. 119, греющее и нагреваемое тела движутся в одном направлении. Такой аппарат называется аппаратом с параллельным током или с прямотоком.



Фиг. 120. Ход изменения температуры в теплообменном аппарате с параллельным током.

Изобразим графически изменение температур греющей и нагреваемой жидкости, например, воды. На оси абсцисс отложим расстояния, пройденные водой в аппарате вдоль поверхности теплообмена. По оси ординат будем откладывать значения температур, которые получает вода по мере движения. В описанном здесь аппарате с параллельным током температуры будут изменяться так, как показано на фиг. 120, а именно:

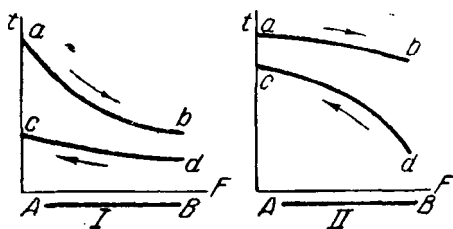
температура греющей воды будет падать так, как представлено верхней кривой ab . Температура нагреваемой воды будет при этом повышаться, как это показано нижней кривой cd . В зависимости от количеств той и другой жидкости эти кривые могут менять свой характер. (этим и отличаются случаи I и II на фиг. 120), но они всегда расположатся так, что нижняя кривая никогда не сольется с верхней, т. е. никогда в теплооб-



Фиг. 121. Теплообменный аппарат с противотоком.

менном аппарате с параллельным током температура выходящей нагреваемой воды не станет равной температуре выходящей греющей воды.

Бывают и другого типа теплообменные аппараты. В них греющая и нагреваемая жидкости движутся в противоположных направлениях. Такие аппараты называются аппаратами с противотоком. Если в теплообменном аппарате, изображенном на фиг. 119 поме-



Фиг. 122. Ход изменения температур в теплообменном аппарате с противотоком.

нять местами вход и выход нагреваемой воды, то получится теплообменный аппарат с противотоком, показанный на фиг. 121. Изобразим на графике изменения температур греющей и нагреваемой жидкости. Попреежнему по оси абсцисс будем откладывать расстояния,

пройденные водой от входа в аппарат (фиг. 122); так как речь идет об аппарате с противотоком, то входы нагреваемой и греющей воды находятся на противоположных концах; пусть ось аппарата на чертеже представлена линией AB ; будем считать точку A входом греющей воды, а точку B входом нагреваемой воды. В таком случае ход изменения температур той и другой воды представится линиями ab и dc . Линия ab представляет собой падение температуры греющей воды, а линия dc — возрастание температуры нагреваемой воды. Меняя количества той и другой воды, можно изменять в известных пределах температуру выходящей греющей воды и температуру выходящей нагреваемой воды (этим и отличаются случаи I и II на фиг. 122).

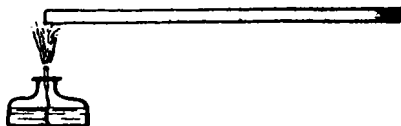
Отличительной особенностью этого теплообменного аппарата в сравнении с аппаратом, имеющим параллельный ток, является то, что здесь выходящая нагреваемая жидкость может иметь температуру более высокую, чем выходящая нагревающая жидкость, чего в аппарате с параллельным током получить нельзя.

Понять причину этого можно из рассмотрения фиг. 122. В аппарате с противотоком нагреваемая жидкость движется навстречу греющей; при этом она встречает по пути своего движения всё более и более высокую температуру. Выход нагреваемой жидкости происходит там, где греющая жидкость имеет самую высокую температуру. Наоборот, в аппарате с параллельным током движение обеих жидкостей идет в одном и том же направлении, и нагреваемая жидкость выходит там, где греющая жидкость имеет самую низкую температуру.

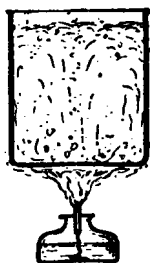
43. СПОСОБЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА

Рассмотрим подробнее процесс распространения тепла. Возьмем твердое тело и начнем его нагревать с одного конца (фиг. 123). Температура его в этом месте поднимется. Это будет означать, что молекулы в той части тела, где происходит нагревание, пришли в более энергичное колебание, чем в остальной части тела. Сталкиваясь с соседними, молекулы нагреваемого конца твердого тела будут передавать им часть своей энергии. Так будет происходить передача тепловой энергии от более нагретой части тела к менее нагретой части.

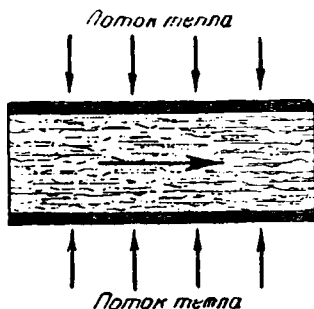
Этот способ распространения тепла называется **теплопроводностью**. Так распространяется тепло главным образом в твердых телах, но распространение тепла теплопроводностью можно получить и в жидкостях и газах. Так, если нагревать воду сверху, то передача тепла от нагретых верхних слоев к холодным нижним слоям будет происходить только теплопроводностью. Количество тепла, которое передается в 1 час через стенку площадью в 1 м^2 и толщиной в 1 м при разности температур на крайних поверхностях этой стенки в 1° С , называется коэффициентом теплопроводности. Он обозначается λ (греческая буква «ламбда»). Теплопроводность жидких и газообразных тел мала, и поэтому переход тепла в этом случае будет происходить очень медленно.



Фиг. 123. Распространение тепла в твердом теле (теплопроводность).



Фиг. 124. Естественная конвекция в жидкости.



Фиг. 125. Вынужденная конвекция в жидкости.

Распространение тепла теплопроводностью в жидкостях и газах имеет малое значение. Существенное влияние на распространение тепла в жидкостях и газах оказывает характер движения. Жидкость или газ может двигаться спокойно, параллельными струйками, без каких-либо завихрений. Такое движение называется **параллельно-струйным** или **ламинарным**. Оно встре-

чается в очень узких трубках, при малой скорости и, главным образом, у жидкостей, отличающихся большой вязкостью (масла, нефть). Но большей частью в теплотехнике бывает так, что жидкость движется беспокойно, отдельные струйки ее перемешиваются друг с другом. Такое движение называется вихревым или турбулентным движением.

Пусть в сосуде находится вода и нагревание ее производится снизу (фиг. 124). Когда нижние слои воды нагреются, заключающаяся в них вода расширится и станет легче, чем вода в верхних слоях, температура которых ниже. Вследствие этого более тяжелые верхние слои начнут двигаться вниз, а более легкие — вверх. При движении горячие слои будут перемешиваться с более холодными и отдавать им часть своего тепла. Такое распространение тепла называется конвекцией.

Описанный случай называется естественной конвекцией; здесь движение воды происходит за счет получающейся при нагревании разности удельных весов. Движение тем сильнее, чем сильнее нагрев. Естественную конвекцию воздуха мы получаем около батарей центрального отопления. Воздух, нагретый около батарей, как более легкий, поднимается вверх, а на его место приходит более холодный воздух. Так осуществляется движение воздуха и перемешивание холодных и нагретых струй его.

Иной случай распространения тепла конвекцией имеем мы при движении жидкого или газообразного тела в трубе. Пусть вода, подаваемая насосом, движется в трубе, которая омывается горячими газами (фиг. 125). Здесь, в случае, если движение турбулентное, нагревание воды от горячих стенок получается, главным образом, вследствие того, что происходит непрерывное перемешивание холодных струек, движущихся из средней части трубы, с горячими струйками, подходящими в среднюю часть от стенок. Таким образом и здесь происходит распространение тепла конвекцией.

Так как движение жидкости в этом случае происходит за счет какой-либо внешней побудительной силы (насос, вентилятор), то такой поток жидкости в трубе называется вынужденным потоком, а конвекция тепла — вынужденной конвекцией.

Если движение в трубе не турбулентное, а ламинар-

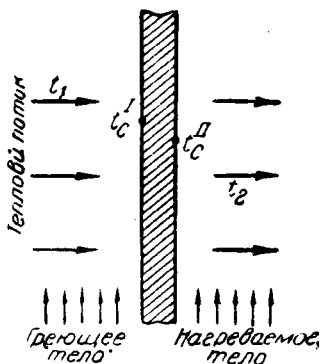
ное, то распространения тепла за счет перемешивания горячих и холодных струек не будет. В этом случае, так же, как мы наблюдали в твердом теле, энергия будет передаваться от более подвижных молекул к соседним менее подвижным, т. е. в этом случае передача теплоты будет происходить, как и в твердых телах, теплопроводностью. Такая передача тепла гораздо слабее, чем при наличии конвекции.

44. ОСНОВНЫЕ СЛУЧАИ ТЕПЛООБМЕНА

Рассмотрим подробнее процесс передачи тепла от одного тела к другому через разделительную стенку. Такой случай представлен на фиг. 126. Здесь слева и справа от разделительной стенки движутся два тела (жидкие или газообразные); пусть температура одного из них t_1 , другого t_2 . Если слева греющее тело, то t_1 больше t_2 . Обозначим температуру поверхности стенки слева $t_{ст}^I$, температуру поверхности стенки справа $t_{ст}^{II}$.

Очевидно, что $t_{ст}^I$ больше $t_{ст}^{II}$.

Вследствие того, что $t_1 > t_2$, возникает поток тепла слева направо (на чертеже он показан горизонтальными стрелками). В жидкости слева наибольшая температура будет в центре потока, она будет снижаться по направлению к стенке. У самой стенки вследствие трения жидкость будет двигаться очень медленно, и поэтому даже в том случае, если движение всей жидкости будет турбулентное, у самой стенки образуется очень незначительной толщины слой, в котором жидкость движется ламинарно. Этот слой называется пограничным слоем жидкости. Вследствие перемешивания струек в центральной части потока изменение температуры во всем потоке будет незначительное;



Фиг. 126. Теплопередача (теплообмен через разделительную стенку).

в пограничном же слое, где перемешивание отсутствует, падение температуры будет значительное.

Движущийся слева направо поток тепла сначала воспринимается левой поверхностью стенки вследствие соприкосновения жидкости со стенкой, затем тепло путем теплопроводности распространяется в стенке и достигает правой поверхности стенки; в дальнейшем при соприкосновении с нагреваемой жидкостью происходит передача тепла от правой поверхности стенки к нагреваемой жидкости.

В теплотехнике установились следующие названия для описанных здесь явлений. Передача тепла от греющего тела (жидкого или газообразного) к стенке называется теплоотдачей. Так же называется и передача тепла от стенки к нагреваемому телу (жидкому или газообразному).

Теплоотдача характеризуется коэффициентом теплоотдачи, обозначаемым греческой буквой α (альфа). Коэффициент теплоотдачи измеряет количество тепла, которое передается от греющего тела к стенке (или наоборот) в один час через поверхность, равную 1 м^2 , при разности температур между греющим телом и стенкой в 1°С .

В целом явление передачи тепла от греющего тела (жидкого или газообразного) к нагреваемому (жидкому или газообразному) через разделительную стенку называется теплопередачей.

Теплопередача характеризуется коэффициентом теплопередачи, обозначаемым буквой k . Коэффициент теплопередачи измеряет количество тепла, которое передается от греющего тела к нагреваемому в один час через поверхность, равную 1 м^2 , при разности температур между греющим и нагреваемым телом в 1°С .

Если общая поверхность, через которую передается тепло, есть F , средняя температура греющего тела t_1 , средняя температура нагреваемого тела t_2 , то количество тепла, которое передается от греющего тела к нагреваемому, определится по формуле

$$Q = kF(t_1 - t_2) \text{ ккал/час.} \quad (64)$$

Когда требуется определить поверхность теплообмен-

ного аппарата для передачи определенного количества тепла, то пользуются формулой

$$F = \frac{Q}{k(t_1 - t_2)}. \quad (65)$$

При расчетах вместо $(t_1 - t_2)$ подставляют так называемую среднюю разность температур Δt_{cp} . Подсчеты показывают, что для теплообменных аппаратов, работающих по принципу противотока, Δt_{cp} получается большей, чем у аппаратов с параллельным током при одинаковых в обоих случаях значениях начальных и конечных температур греющей и нагреваемой жидкостей. Вследствие этого и поверхность противоточного аппарата получается меньшей, чем у аппарата с параллельным током. В этом и заключается преимущество противоточных теплообменных аппаратов.

При расчете теплообменных аппаратов, котлов, конденсаторов очень важно знать коэффициент теплопередачи, так как им определяется размер поверхности аппарата для передачи заданного количества тепла.

Очевидно, что передача тепла от греющего тела к нагреваемому будет тем лучше и коэффициент теплопередачи тем больше, чем лучше происходит теплоотдача от греющего тела к стенке, чем больше будет теплопроводность стенки, чем меньше ее толщина и чем лучше будет теплоотдача от стенки к нагреваемому телу.

Если обозначить α_1 — коэффициент теплоотдачи от греющего тела к стенке, α_2 — коэффициент теплоотдачи от стенки к жидкости, λ — коэффициент теплопроводности стенки, а толщину ее s , то коэффициент теплопередачи k для плоской стенки определится по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ ккал./м}^2\text{час град.} \quad (66)$$

Для неплоской стенки (например, трубы) формула несколько сложнее, но часто и в этих случаях пользуются формулой (66), так как получающаяся разница невелика.

Как видно из формулы (66), для того чтобы подсчитать коэффициент теплопередачи, надо знать значения величин α_1 , α_2 , λ . Последняя величина λ — коэффициент теплопроводности стенки, определяется сравнительно

просто. Этот коэффициент зависит только от свойств материала стенки. В настоящее время из опытов с достаточной точностью известны значения коэффициентов теплопроводности почти всех материалов, с которыми приходится иметь дело в теплотехнике. Их можно найти в справочных таблицах. Не так просто обстоит дело с определением коэффициентов теплоотдачи α_1, α_2 . Здесь недостаточно знать только свойства материалов, между которыми происходит теплообмен соприкосновением. Значение α зависит не только от этих свойств, но также от размеров и формы твердого тела и от условий движения жидкого или газообразного тела, главным образом от скорости этого движения (чем больше скорость, тем выше α). Большое влияние на величину α имеют также параметры состояния движущегося тела, его температура, удельный вес, и такие его свойства, как вязкость и теплопроводность. Наоборот, от материала стенки α в сущности совсем не зависит.

Значения α для одних и тех же тел могут быть самые различные. Это можно видеть по следующим приближительным значениям пределов α :

для газов α	от	5	до	500	ккал/м ² час град
• жидкостей	"	300	"	6'000	" "
• конденсирующегося пара	"	5 000	"	15 000	" "
• кипящей воды	"	2 000	"	8 000	" "

Для определения α прибегают к опытам. Но для того чтобы узнать, как величина α зависит от всех обстоятельств, которые мы перечислили, требуется поставить громадное количество опытов. Постепенно накапливаются данные для расчета теплоотдачи в самых разнообразных случаях и для различных аппаратов. Они собраны в специальных книгах и справочниках.

Для сокращения числа опытов в последние годы разработана так называемая теория подобия, которая позволяет единичный опыт распространить на большую группу явлений. Это значительно сокращает число опытов. Теория подобия вместе с тем позволяет опыты производить не на самих аппаратах, для которых ищется значение α , а на уменьшенных и упрощенных моделях.

Для теплотехники это имеет существенное значение, так как аппараты, с которыми мы имеем дело в действительности, сложны и велики, и постройка их для про-

изводства опытов требовала бы больших затрат и длительных сроков. Производство же опытов на моделях сравнительно просто и может быть выполнено в короткие сроки.

Основы теории подобия в России были заложены в конце прошлого столетия проф. В. Л. Кирпичевым (1845—1913 гг.), однако полного своего развития она достигла в XX в. Советская школа ученых, возглавляемая академиком М. В. Кирпичевым, создала стройную теорию теплового подобия, во многом опередив в этом направлении зарубежную науку. На основе этой теории наши научно-исследовательские институты, идя самостоятельным путем, решили ряд сложных проблем теплообмена в котельных агрегатах, печах и других теплообменных аппаратах.

В СССР исследованием явлений теплопередачи, определением величин коэффициентов теплоотдачи и моделированием тепловых устройств занимается Энергетический институт Академии наук им. Г. М. Кржижановского, Всесоюзный теплотехнический институт имени Ф. Э. Дзержинского, Центральный котлотурбинный институт имени И. И. Ползунова и ряд других институтов и организаций.

Пример 27. В водоводяном подогревателе нагревается вода для отопления здания. Средняя температура греющей воды $t_1 = 120^\circ \text{C}$, средняя температура нагреваемой воды $t_2 = 80^\circ \text{C}$. Поверхность теплообменного аппарата $F = 1,2 \text{ м}^2$. Материал трубок — сталь с $\lambda = 35 \text{ ккал/м час град}$; трубки имеют внутренний диаметр $d_1 = 18 \text{ мм}$, наружный диаметр $d_2 = 20 \text{ мм}$. Вычислить количество тепла, передаваемого нагреваемой воде, если можно принять коэффициент теплоотдачи от греющей воды к стенке $3000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}$, а коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой жидкости $4000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}$.

Вычислим предварительно коэффициент теплопередачи от греющей жидкости к нагреваемой. Рассчитываем поверхность нагрева как плоскую стенку. По формуле (66) имеем

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

В этой формуле $\alpha_1 = 3000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}$; $\alpha_2 = 4000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}$.

Толщина стенки s определится как половина разности наружного и внутреннего диаметров трубки:

$$s = \frac{d_2 - d_1}{2} = \frac{20 - 18}{2} = 1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м.}$$

Подставим значения величин в формулу (66):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{3000} + \frac{0,001}{35} + \frac{1}{4000}} = 1\,635 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град.}$$

Теперь можно найти и количество тепла Q . Для этого воспользуемся формулой

$$Q = kF(t_1 - t_2).$$

Подставляя сюда значения величин, находим

$$Q = 1\,635 \cdot 1,2 \cdot (120 - 80) = 78\,400 \text{ ккал/час.}$$

45. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ

Из изложенного в § 42 видно, что в теле теплота может распространяться или теплопроводностью (в твердых, жидких и газообразных телах) или конвекцией (только в жидких и газообразных телах).

При рассмотрении явлений теплоотдачи мы видели, что от одного тела к другому теплота может передаваться путем соприкосновения этих тел. Так, от греющей жидкости к стенке теплота переходит при соприкосновении со стенкой; таким же образом происходит переход тепла от стенки к нагреваемой жидкости.

Однако переход тепла от одного тела к другому посредством соприкосновения не является единственным способом передачи тепла. Например, у человека, стоящего против дверцы работающей топки, появляется ощущение теплоты, если открыть дверцу. Для того чтобы убедиться в том, что это ощущение теплоты происходит не от окружающего воздуха, можно измерить температуру воздуха; окажется, что она будет одинаковой как до, так и после открытия дверцы. Это ощущение теплоты показывает, что произошел теплообмен между слоем горящего топлива и человеком, находящимся перед открытой дверцей топки, хотя никакого соприкосновения здесь нет. Специальным опытом можно показать, что такой же теплообмен произошел бы, если бы между слоем горящего топлива и стоящим перед топкой человеком не было и воздуха.

Сущность теплообмена, происходящего между раскаленным слоем топлива и человеком, заключается в

следующем. Горящий слой топлива посылает во все стороны тепловые лучи, которые, достигая человека, вызывают в нем ощущение тепла. Тепловые лучи несут особый вид энергии, которая называется лучистой энергией. Таким же способом передается на землю энергия солнца. Тепловые лучи, исходящие от солнца, проходят все пространство между солнцем и землей и, достигнув земли, ею воспринимаются. Окружающий же землю воздух нагревается от земли соприкосновением. Вот почему чем выше от земли, тем воздух холоднее.

В рассмотренном нами ранее случае теплообмена лучистая энергия возникает в горящем топливе за счет его тепловой энергии, достигнув же человека, лучистая энергия превращается вновь в тепловую. Отсюда и ощущение тепла.

Переход тепла от одного тела к другому при помощи тепловых лучей называется теплообменом излучением или радиацией.

Подробное изучение теплообмена излучением показывает, что все тела в природе посылают в окружающее их пространство тепловые лучи и излучают энергию.

Количество энергии, излучаемое в час с поверхности твердого тела, очень сильно зависит от его температуры. Оно пропорционально четвертой степени абсолютной температуры T и может быть вычислено по следующей формуле:

$$Q = C \cdot F \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ ккал/час.} \quad (67)$$

В этой формуле F — поверхность тела, измеренная в м^2 , а C — так называемый коэффициент излучения.

Коэффициент излучения для разных тел различен. Он зависит от свойств и характера поверхности тела. Например, у тел с гладкой поверхностью (полированные металлы) способность к излучению мала. Они имеют низкий коэффициент излучения, численно равный 0,1—0,3. Напротив, тела с шероховатой поверхностью (стальные трубы в котле, кирпичная кладка) сильно излучают энергию, их коэффициент излучения доходит до 4 и выше, а для таких тел, как сажа, бумага, некоторые краски, коэффициент излучения почти достигает наибольшей возможной величины 4,96, которая, как показывает теория, может быть только у воображаемого «абсолютно черного тела».

Значения коэффициентов излучения для самых разнообразных тел определены из опыта и приводятся в справочниках.

Подсчитаем, например, количество энергии, излучаемой 1 м² кирпичной кладки при температуре $t = 727^\circ \text{C}$. По формуле (67) получим:

$$Q = 4 \cdot 1 \left(\frac{727 + 273}{100} \right)^4 = 4 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 = 40\,000 \text{ ккал/час.}$$

Для температуры $t = 227^\circ \text{C}$ количество энергии, излучаемой кладкой, составит всего

$$Q = 4 \cdot 1 \left(\frac{227 + 273}{100} \right)^4 = 4 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 5 = 2\,500 \text{ ккал/час,}$$

а при комнатной температуре $t = 27^\circ \text{C}$ излучение совсем мало:

$$Q = 4 \cdot 1 \left(\frac{27 + 273}{100} \right)^4 = 4 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 324 \text{ ккал/час.}$$

Из этих примеров видно, что теплообмен излучением имеет особо важное значение при высоких температурах, а потому в теплотехнике, где многие процессы происходят при высоких температурах (топки котлов, печи), теплообмен излучением играет большую роль.

Когда тепловые лучи падают на твердое тело, то не вся заключающаяся в них энергия поглощается телом и переходит в тепло. Некоторая часть падающей энергии отражается от поверхности тела обратно в пространство. Лишь абсолютно черное тело поглощает все падающие лучи. Для реальных тел поглощение тем сильнее, чем больше коэффициент излучения этим телом собственных тепловых лучей.

При теплообмене радиацией между двумя телами каждое из них излучает энергию (тем больше, чем выше его температура) и часть ее воспринимается другим телом. В результате же то из двух тел, температура которого выше, отдает тепло, а тело, имеющее более низкую температуру, тепло получает.

Способностью к излучению обладают не только твердые и жидкие тела, но также и некоторые газы. Среди газов, с которыми приходится иметь дело в теплотехнике, излучают энергию водяной пар и углекислый газ. Эти газы входят в состав продуктов сгорания топлива. Таким

образом, когда продукты сгорания движутся по дымоходам котла, они передают стенкам котла тепло не только соприкосновением, но и излучением.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

44. Для чего применяют теплообменные аппараты? Назовите несколько примеров теплообменных аппаратов.
45. Какие типы теплообменных аппаратов различают по направлению движения греющей и нагреваемой жидкости?
46. Какое различие существует между теплообменными аппаратами с параллельным током и противотоком по максимальной температуре, до которой можно нагреть жидкость в каждом из них?
47. Как распространяется тепло внутри тела?
48. Какое отличие в распространении тепла в твердом теле от распространения тепла в жидком и газообразном?
49. Опишите своими словами явления, носящие названия теплоотдача и теплопередача.
50. Что измеряет коэффициент теплоотдачи и коэффициент теплопередачи?
51. Какое движение называется ламинарным и какое турбулентным?
52. В чем сущность передачи тепла излучением?
53. Каким способом передается тепло от продуктов сгорания топлива к стенке котла?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПРОРАБОТКИ

45. По одну сторону плоской стальной стенки толщиной $s = 8$ мм движется вода, по другую воздух. Определить коэффициент теплопередачи через стенку, если $\alpha_1 = 2000$ ккал/м² час град, $\alpha_2 = 20$ ккал/м² час град; для стали $\lambda = 40$ ккал/м час град.

Отв.: 9,7 ккал/м² час град.

46. Для предыдущей задачи определить коэффициент теплопередачи, если по другую сторону стенки находится не воздух, а также вода, коэффициент теплоотдачи к которой $\alpha_2 = 2000$ ккал/м² град.

Отв.: 833 ккал/м² час град.

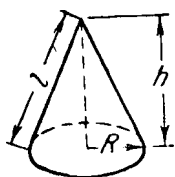
ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЯ

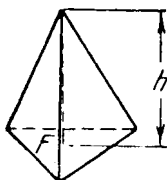
ЛАТИНСКИЙ АЛФАВИТ

Обозначения букв	Названия букв	Обозначения букв	Названия букв
<i>A, a</i>	а	<i>N, n</i>	эн
<i>B, b</i>	бэ	<i>O, o</i>	о
<i>C, c</i>	цэ	<i>P, p</i>	пэ
<i>D, d</i>	дэ	<i>Q, q</i>	ку
<i>E, e</i>	э	<i>R, r</i>	эр
<i>F, f</i>	эф	<i>S, s</i>	эс
<i>G, g</i>	гэ (же)	<i>T, t</i>	тэ
<i>H, h</i>	ха (франц. аш)	<i>U, u</i>	у
<i>I, i</i>	и	<i>V, v</i>	вэ
<i>J, j</i>	иот	<i>W, w</i>	дубль-вэ
<i>K, k</i>	ка	<i>X, x</i>	икс
<i>L, l</i>	эль	<i>Y, y</i>	игрек
<i>M, m</i>	эм	<i>Z, z</i>	зэт

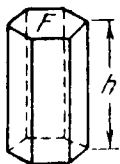
ОБЪЕМЫ ТЕЛ



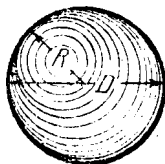
Конус
 h — высота конуса
 R — радиус основания;
 l — образующая конуса;
 $V = \frac{1}{3} \pi R^2 h.$



Пирамида
 h — высота;
 F — площадь основания;
 $V = \frac{1}{3} hF.$



Призма
 F — площадь основания;
 h — высота;
 $V = Fh.$



Шар
 R — радиус шара;
 D — диаметр;
 $V = \frac{4}{3} \pi R^3.$

Таблица 1

Удельные веса различных веществ (в кг/м³)

Алюминий	2 700	Вода (4°С)	1 000
Железо	7 800	Керосин (0°С)	800
Медь	8 900	Ртуть (0°С)	13 600
Платина	21 500	Спирт (0°С)	790
Дерево	600	Азот*	1,25
Чугун	7 000	Воздух*	1,29
		Кислород*	1,42
		Углекислый газ*	1,97

* При температуре в 0° С и давлении в 760 мм рт. ст.

Таблица 2

Химические знаки и атомные веса важнейших элементов

Название элемента	Латинское название	Его произношение	Химический знак	Атомный вес
Серебро	Argentum	Аргэнтум	Ag	108
Алюминий	Aluminium	Алюминийум	Al	27
Углерод	Carboneum	Карбонеум	C	12
Медь	Cuprum	Купрум	Cu	64
Железо	Ferum	Феррум	Fe	56
Водород	Hydrogenium	Хидрогениум	H	1
Азот	Nitrogenium	Нитрогениум	N	14
Кислород	Oxygenium	Оксигениум	O	16

Таблица 2а

Молекулярные веса некоторых газообразных тел

Название газа	Химическая формула	Молекулярный вес
Водород	H ₂	2
Кислород	O ₂	32
Азот	N ₂	28
Окись углерода	CO	28
Углекислый газ	CO ₂	44
Водяной пар	H ₂ O	18
Метан	CH ₄	16

Таблица 3

Теплоемкость твердых и жидких тел (в ккал/кг град)

Алюминий	0,22	Вода	1,0
Железо (чугун)	0,11	Керосин	0,51
Медь	0,09	Ртуть	0,03
Платина	0,03	Спирт	0,58
Марганец	0,5		

Таблица 4

Теплоемкость газообразных тел (в ккал/кг град)

	При постоянном давлении	При постоянном объеме
Кислород	0,22	0,16
Азот	0,25	0,18
Углекислый газ	0,204	0,15
Воздух	0,24	0,172

Таблица 5

Температура и теплота плавления некоторых тел

Тела	Температура плавления, °С	Теплота плавления
Алюминий	658	90 ккал/кг
Железо	1 520	49 "
Медь	1 084	42 "
Олово	232	14 "
Чугун	1 165	33 "
Лед	0	80 "

Таблица 6

Температура кипения и теплота парообразования (при нормальном давлении) для некоторых тел

Тела	Температура кипения в градусах	Скрытая теплота парообразования, ккал/кг
Спирт	78	202
Вода	100	539
Ртуть	357	68
Эфир	35	90

Таблица 7

Насыщенный водяной пар

Давление, ата	Темпера- тура кипя- чения, °С	Удельный объем сухого на- сыщенного пара, v''	Скрытая теп- лота парообра- зования, ккал/кг	Теплосодер- жание жидко- сти, ккал/кг	Теплосодержа- ние сухого насыщенного пара, ккал/кг
0,04	28,6	35,5	580,8	28,6	609,4
0,5	78,3	28,7	552,4	78,2	630,6
1,03	100	1,73	539	100	639
2	120	0,9	527	120	647
3	133	0,62	518	133	651
5	151	0,38	505	152	657
8	170	0,15	490	171	661
10	179	0,198	482	181	663
15	197	0,13	466	201	667
20	211	0,1	452	216	668
50	263	0,04	392	274	666
100	310	0,018	317	334	651

Таблица 8

Низшая теплотворная способность рабочих топлив в ккал/кг

Дров	3 200	Спирт	7 200
Торф	3 000	Керосин, бензин . . .	10 500
Подмосковный уголь	3 000	Нефть	10 000
Каменный уголь . .	5 000—7 000		

Таблица 9

Топливо	CO ₂ макс
Дрова	20,0
Торф	19,4
Подмосковный уголь .	19,3
Антрацит	20,0
Мазут	15,5

Редактор *П. Я. Тюрин*
Техн. редактор *А. М. Фридкин*

Сдано в пр-во 15/IV 1949 г.
Подписано к печати 26/X 1949 г.
Объем 14 п. л. Уч.-издат. 13 л.
Тираж 15 000 экз. Формат бумаги 84/108^{1/32}.
А-13139 Заказ. 2132.

Типография Госэнергоиздата.
Москва, Шлюзовая наб., 10.



Цена 7 ру.