

WWW.JANKO.FRONT.RU

А. М. ЛИТВИН

ОСНОВЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ

*Рекомендовано Управлением учебными заведениями
Министерства электростанций СССР
в качестве учебного пособия
для курсов технического обучения рабочих кадров и мастеров*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1954 ЛЕНИНГРАД

Книга посвящена изложению основ теплоэнергетики.

Во вводной части описаны пути развития советской энергетики, указаны основные отличительные ее черты.

В книге дается элементарное изложение теоретических основ теплотехники: рассматриваются законы термодинамики и вопросы теплопередачи. Значительное внимание уделено описанию оборудования теплосиловых установок, их работы, вопросам топливосжигания и водоподготовки. В последней главе рассматриваются работа электрической станции в целом, связь ее с энергетической системой; достаточное место отведено вопросам экономики.

Книга предназначена служить учебным пособием при подготовке рабочих кадров и среднетехнического персонала электростанций, а также механиков энергоцехов промышленных предприятий.

Автор — *Литвин Александр Миссеевич* —
«Основы теплоэнергетики»



Редактор *Я. М. Рубинштейн*
Техн. редактор *И. М. Скворцов*.

Слано в набор 11/IX 1954 г.
Подп. к печ. 25/XI 1954 г. Бумага 84/108¹/₃₂
Объем 17,63 п. л. Уч.-изд. л. 20
Т-08449 Тираж 15 000 экз. Зак. № 1371
Цена 8 р.

Типография Госэнергоиздата.
Москва, Шлюзовая наб., д. 10

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЯТОМУ ИЗДАНИЮ

Учебное пособие «Основы теплоэнергетики», начиная с 1941 г., вышло четырьмя изданиями, из которых последнее относится к 1949 г. В период 1951—1953 гг. эта книга была переведена и издана в ряде стран народной демократии. Широкое использование книги, несомненно, свидетельствует о большой потребности в пособии, которое в элементарной форме рассказывало бы о теории и практике одной из важнейших отраслей народного хозяйства — теплоэнергетики.

Изменения, происшедшие за описанный период в деле подготовки кадров для тепловых электростанций и требованиях, предъявляемых к персоналу этих станций, равно как и в самой технике получения электрической энергии на станциях СССР, заставили автора по предложению издательства значительно изменить содержание книги. Прежде всего, учитывая возросший общий уровень знаний лиц, обучающихся на курсах учебных комбинатов электростанций, автор позволил себе отказаться от изложения основных положений смежных отраслей знаний — математики, механики, химии; в этой части оставлено только то, что имеет непосредственное отношение к излагаемой теме и без чего была бы нарушена связность изложения. С другой стороны, каждому работнику электростанции для отчетливого понимания технологического процесса получения электрической энергии на своем участке необходимо знать, как этот процесс происходит на соседнем участке и на всей станции в целом. Это заставило автора значительно шире изложить работу основного оборудования тепловой части электростанции, автоматического регулирования процессов в нем, экономических характеристик. Учитывая, что эта книга изучается первой, автор вначале излагает содержание основных понятий, относящихся к рассматриваемой области знаний, а также пути развития советской энергетики. В краткой форме дается описание энергетической си-

темы в целом и ее работы. Приводятся данные о стоимости сооружения станций и себестоимости электрической энергии.

Перечисленные изменения позволили дать новое построение всей книги. Оно приближено к построению курсов общей теплотехники.

Широкий охват темы, в особенности при элементарном ее изложении, делал задачу автора трудной, поэтому получение отзывов на книгу, в особенности от лиц, пользующихся ею как учебным пособием, было бы для автора очень полезно.

Как и предыдущие издания, эта книга предназначена служить учебным пособием для подготовки рабочих кадров и среднего технического персонала (бригадиров, мастеров).

По мнению автора она может быть и пособием по общей теплотехнике и при подготовке механиков для фабрично-заводских предприятий всех отраслей промышленности.

Большую помощь оказал автору при редактировании книги профессор Всесоюзного теплотехнического института доктор техн. наук Я. М. Рубинштейн, которому автор выражает глубокую благодарность.

Отзывы просьба направлять по адресу: Москва, Шлюзовая набережная, 10, Госэнергоиздат.

Автор

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие к пятому изданию	3
--	---

Глава первая. Развитие энергетики в СССР

1. Содержание понятий энергетика, теплотехника, электрификация	7
2. Пути развития и основные черты советской энергетики	19

Глава вторая. Рабочие тела и законы теории теплоты

3. Техническая система мер	30
4. Формула, зависимость, таблица, график	37
5. Агрегатные состояния вещества	42
6. Энергия и ее виды. Преобразования энергии. Закон сохранения и превращения энергии	46
7. Температура. Единица измерения энергии. Количество тепла	49
8. Свойства жидкостей	57
9. Переход тел из одного агрегатного состояния в другое	61
10. Свойства газообразных тел	64
11. Атмосферное давление	66
12. Измерение давления газа	68
13. Изменения состояния газа	73
14. Процесс изменения состояния газа при постоянном объеме	76
15. Процесс изменения состояния газа при постоянном давлении	79
16. Адиабатный процесс изменения состояния газа	83
17. Изотермический процесс изменения состояния газа	86
18. Водяной пар	90
19. Диаграмма i_s для водяного пара	95
20. Первый закон термодинамики	104
21. Второй закон термодинамики	108
22. Цикл Карно	116
23. Теплообменные аппараты	120
24. Способы распространения тепла	124
25. Основные случаи теплообмена	127
26. Теплообмен излучением	133

Глава третья. Котельный агрегат

27. Котельное топливо и его использование	137
28. Топливная политика и топливные ресурсы СССР	143
29. Горение топлива. Газовые смеси	150
30. Топочные устройства	160
31. Паровые котлы	170
32. Вода и ее обработка для питания котлов	188

33. Тяговые устройства, арматура, контрольно-измерительные приборы	194
34. Основные сведения об автоматическом регулировании котельного агрегата	200

Глава четвертая. Тепловые двигатели

35. Классификация двигателей по рабочему телу и принципу его работы	211
36. Двигатели внутреннего сгорания	213
37. Мощность двигателя внутреннего сгорания. Коэффициенты. Баланс тепла. Расход топлива	223
38. Паровые машины	230
39. Паровые турбины	236
40. Конденсационные устройства	250
41. Расход пара конденсационной турбиной	254
42. Режимы теплофикационной турбины с одним отбором пара	258
43. Регулирование паровых турбин	266
44. Регулирование теплофикационной турбины с одним отбором пара	273
45. Газовые турбины	276

Глава пятая. Тепловые электрические станции и энергетические системы

46. Схема паросиловой установки	281
47. Экономические характеристики паросиловой установки. Баланс тепла. Расход пара. Расход топлива	286
48. Регенеративный цикл. Вторичный перегрев пара	294
49. Теплофикация	301
50. Типовые схемы тепловых электрических станций	306
51. Компоновка тепловой части электрических станций	311
52. Топливоподача, очистка дымовых газов, золоудаление, водоснабжение	315
53. Энергетические системы	322
54. Эксплуатационные характеристики электростанций	332
55. Стоимость сооружения электрических станций и себестоимость электрической энергии	337
Приложения	342

ГЛАВА ПЕРВАЯ

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ В СССР

1. СОДЕРЖАНИЕ ПОНЯТИЙ ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ

В результате Великой Октябрьской социалистической революции в России на одной шестой части земного шара утвердилась советская власть, которая поставила своей задачей создание нового общественного строя — коммунистического. Для решения этой задачи были обобществлены средства производства и создана крупная социалистическая промышленность.

Развитие промышленности, сельского и коммунального хозяйства, транспорта, улучшение бытовых условий, поднятие культурного уровня трудящихся — все это непосредственно связано с потреблением больших количеств энергии.

Величайший русский ученый М. В. Ломоносов во второй половине XVIII в. положил начало открытию одного из основных законов природы, известного под названием закона сохранения и превращения энергии. Этот закон устанавливает, что в природе имеются громадные запасы энергии, которые не могут быть ни уничтожены, ни дополнительно вновь созданы. В природе существуют различные виды энергии — тепловая, механическая, электрическая, световая, химическая и др. Согласно тому же закону эти виды энергии могут только переходить один в другой при сохранении общего количества энергии неизменным.

Отрасль народного хозяйства, занятая превращением энергии из видов, в которых она широко встречается в природе, в виды, в которых она больше всего нужна для различных целей, называется энергетикой.

Создание в нашей стране мощной энергетики как базы всего народного хозяйства непосредственно связано с основ-

ным законом социализма, так как потребление больших количеств энергии является необходимым условием непрерывного роста и совершенствования социалистического производства на базе высшей техники; вот почему энергетика наряду с металлургией, топливной промышленностью и машиностроением представляет собой важнейшую отрасль народного хозяйства СССР.

Естественные (природные) источники, из которых энергия черпается для приготовления ее в нужных видах для той или иной отрасли народного хозяйства, того или иного технологического процесса, называются энергетическими ресурсами.

Различают следующие виды основных энергетических ресурсов:

- а) водная энергия (иначе гидроэнергия, гидравлическая энергия);
- б) химическая энергия топлив;
- в) энергия излучения солнца;
- г) энергия ветра.

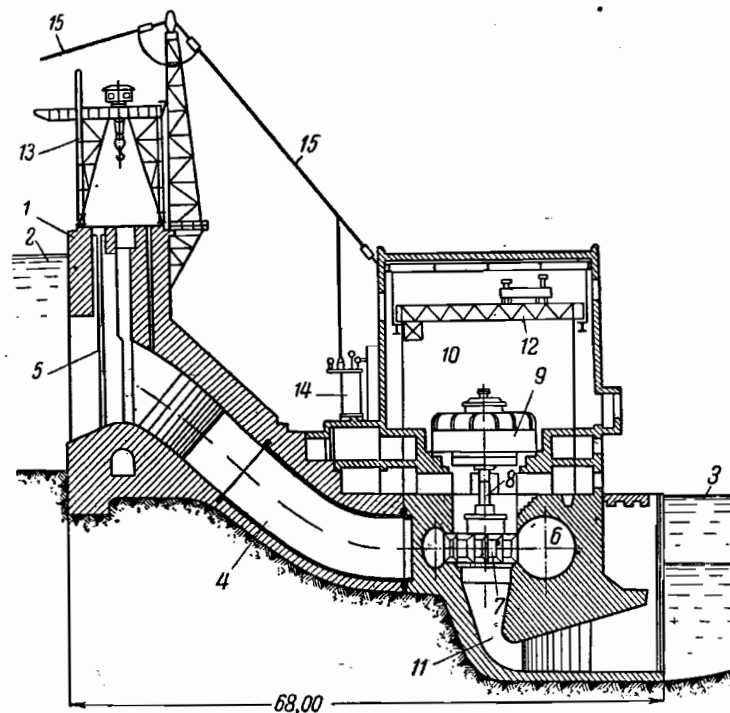
Водная энергия используется с незапамятных времен для вращения водяных колес в водяных двигателях (подъем воды на высоту, вращение водяных мельниц).

В современной технике водная энергия используется для получения электрической энергии на гидравлических электрических станциях (ГЭС), и отрасль техники, которая занимается использованием водной энергии для получения электрической энергии, называется гидроэнергетикой.

В общих чертах устройство гидравлической электрической станции заключается в следующем (фиг. 1).

При помощи плотины 1, возводимой поперек реки, повышается уровень воды; разность уровней перед и за плотиной определяет напор воды, создаваемый весом столба жидкости. Этот напор можно использовать для производства работы, поэтому говорят, что вода, накопленная перед плотиной, обладает потенциальной энергией. На гидравлических станциях этот напор используется следующим образом. По напорному трубопроводу 4 вода поступает с верхнего уровня 2 в спиральную камеру 6 и проходит через специальный направляющий аппарат; при этом вода теряет свою потенциальную энергию, за счет которой возникает кинетическая энергия, выражаю-

щаяся в том, что из направляющего аппарата вода выходит с большой скоростью; далее, вода поступает на изогнутые лопасти турбины 7, которые приходят во вращение; вместе с ними приходит во вращение и вал 8 турбины.



Фиг. 1. Схематический чертеж гидравлической электрической станции.
1 — плотина; 2 — верхний уровень воды в реке; 3 — нижний уровень воды; 4 — напорный трубопровод; 5 — водозапорные щиты; 6 — спиральная камера; 7 — рабочее колесо турбины; 8 — вал турбины; 9 — генератор электрического тока; 10 — машинный зал; 11 — отсасывающая труба; 12 — подъемный кран для разбора агрегата; 13 — подъемный кран для водозапорных щитов; 14 — повышающий трансформатор; 15 — линия высокого напряжения.

Таким образом, совершив работу вращения вала турбины и потеряв почти всю свою скорость, вода сливается на нижний уровень реки.

Энергия вращения вала — это механическая энергия; она возникла за счет кинетической энергии воды. С валом турбины сцеплен вал электрического генератора 9 — машины, в которой при вращении вала

вырабатывается электрическая энергия; она поступает в трансформатор 14, в котором напряжение электрического тока повышается. Из трансформатора электрическая энергия по проводам высокого напряжения направляется в электрическую сеть, а из последней — к потребителю.

Использование водных ресурсов для получения электрической энергии в царской России было минимальным. Только в конце XIX в. была построена первая небольшая ГЭС в Петербурге мощностью 350 квт. Ряд мелких станций был построен в начале XX в.

Лишь при Советской власти приступили к широкому использованию водных ресурсов страны для получения электрической энергии. За короткий исторический срок был построен ряд крупных гидравлических электрических станций.

Первенцем среди них была Волховская ГЭС, строительство которой было закончено в 1926 г. Ряд станций был построен на Кавказе и в Средней Азии; в 1932 г. вступила в строй крупнейшая в Европе Днепровская ГЭС. Из крупных станций следует отметить станции для снабжения Ленинграда (Нижне-Свирская), Москвы (Угличская, Щербаковская и др.). К началу Великой Отечественной войны были построены десятки крупных и средних ГЭС и большое количество колхозных и межколхозных гидростанций; только в третьей пятилетке, выполнение которой было прервано войной, к середине 1941 г. было введено гидростанций по мощности почти вдвое больше, чем за вторую пятилетку. Однако сооружение гидростанций получило решающее развитие в послевоенные годы. Строятся и намечаются к сооружению крупнейшие гидростанции на Волге, Днепре, Каме, на сибирских реках. Сооружение этих станций — важнейший этап в создании материальной базы для построения коммунистического общества.

Бурное развитие использования водных ресурсов страны объясняется рядом особенностей этого вида ресурсов и прежде всего тем, что водная энергия непрерывно возобновляется самой природой; получение электрической энергии за счет водной энергии не связано с расходом топлива; эксплуатация ГЭС не требует большого количества обслуживающего персонала; машины и аппараты этих станций легко поддаются автоматизации. Все это приводит к тому,

что стоимость электрической энергии, вырабатываемой на гидравлических станциях, минимальна: она в 5—7 раз меньше стоимости электрической энергии, получаемой за счет сжигания топлива. Но не только в этом заключается народнохозяйственное значение использования гидроресурсов: не требуется строительства угольных шахт, разгружается железнодорожный транспорт от перевозок топлива, создаются благоприятные условия для развития электрических отраслей промышленности — производства сталей высокого качества и цветных металлов, электрохимии и др.

В условиях существующего в нашей стране планового социалистического хозяйства построение гидроэлектростанций преследует не только цель получения электрической энергии; одновременно решаются задачи орошения и обводнения, связанные с развитием сельского хозяйства; решаются вопросы водного транспорта, водоснабжения, лесосплава и др.; иначе говоря, использование водных ресурсов в СССР происходит в тесной взаимосвязи всех сторон народного хозяйства и носит, как говорят, комплексный характер. В противоположность этому в капиталистических условиях энергетика подчинена интересам монополий, раздираемых непримиримыми противоречиями: использование водных ресурсов там носит уродливый характер, задерживается нефтяными и угольными монополиями, заинтересованными в продаже добываемой ими продукции; комплексное использование водных ресурсов минимально.

В царской России доля электрической энергии, вырабатываемой на гидравлических электрических станциях, почти равнялась нулю. В годы Советской власти при значительном ежегодном возрастании общей выработки электроэнергии эта доля неизменно увеличивается. К 1940 г. она составляла уже 10% всей электроэнергии, выработанной в стране, к 1948 г. — 18%. Но эта доля неизменно повышается и в ближайшие годы она должна увеличиться до 25—30%*. Это свидетельствует о том внимании, которое уделяется партией и правительством использованию водных ресурсов на электростанциях.

* Академик А. В. Винтер, Итоги и перспективы развития советской энергетики, Изд-во АН СССР, 1950, стр. 26.

Остальная нужная стране электрическая энергия вырабатывается за счет использования топливных ресурсов. Приведенные значения доли электроэнергии, полученной на гидростанциях, показывают, что все же наибольшая часть электроэнергии, потребляемой в нашей стране, пока получается за счет сжигания топлив, добываемых из недр земли. При таком сжигании химическая энергия топлив превращается в тепловую.

Электрические станции, преобразующие получающуюся при сжигании топлива тепловую энергию в механическую, а эту последнюю — в электрическую, называются тепловыми электрическими станциями.

Добываемое из недр земли топливо расходуется не только для получения электрической энергии. Огромные количества топлива используются для выработки механической энергии на транспорте (автомобиль, самолет, паровоз, паропход и пр.).

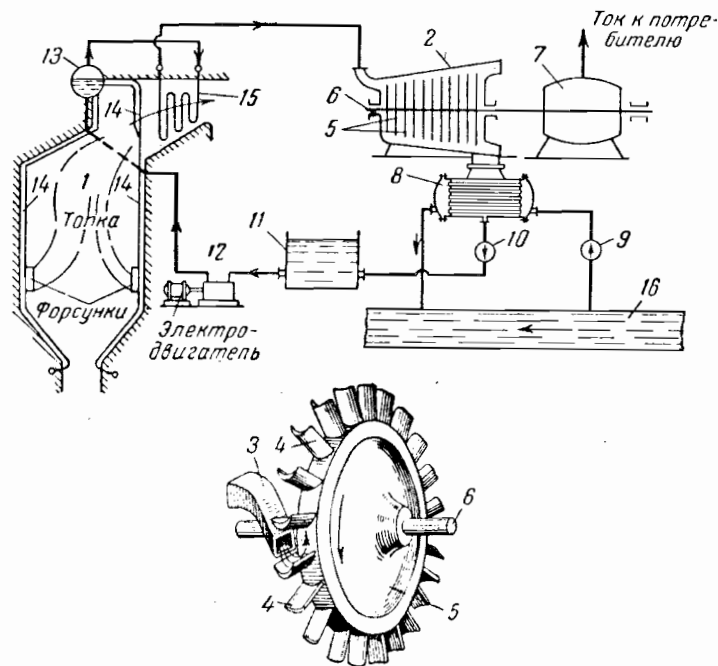
Большие количества топлива расходуются на тепловые нужды промышленности (пищевые предприятия, текстильные, металлургические и др.), сельского хозяйства, для отопления и вентиляции жилых и общественных зданий, на коммунальные нужды (бани, прачечные), для приготовления пищи.

Отдельная отрасль энергетики, которая занимается использованием топлив для получения тепловой энергии при их сжигании и преобразованием ее в механическую как для прямого использования, так и для дальнейшего преобразования в электрическую, называется теплотехникой или теплоэнергетикой.

Рассмотрим в общих чертах схему тепловой электрической станции и процесс производства электрической энергии (фиг. 2) на крупной тепловой электрической станции.

В топке 1 парового котла сжигается топливо, вдвухваемое в нее в виде угольной пыли через форсунки. Образовавшиеся в результате горения горячие газы омывают трубки 14 парового котла, в которых находится вода, поступающая в них из барабана 13 котла. Получившийся из воды пар поднимается по трубкам и собирается в верхней части барабана; отсюда он выходит в перегреватель 15, который омывается горячими газами, поступившими из топки в дымоход перегревателя. В даль-

нейшем газы по не показанному на чертеже дымоходу выходят в атмосферу. Получившийся перегретый водяной пар имеет давление и температуру, более высокие, чем окружающая нас среда, и поэтому обладает способностью совершать работу. О таком паре говорят, что он



Фиг. 2. Схема простейшей тепловой электрической станции.

1 — топка парового котла; 2 — паровая турбина; 3 — сопло; 4 — лопатка; 5 — диск; 6 — вал паровой турбины; 7 — генератор электрического тока; 8 — конденсатор; 9 — циркуляционный насос; 10 — конденсатный насос; 11 — бак питательной воды; 12 — питательный насос; 13 — барабан парового котла; 14 — трубки парового котла; 15 — пароперегреватель; 16 — источник водоснабжения (река).

обладает потенциальной энергией. В рассматриваемой паросиловой установке использование способности пара совершать работу, т. е. использование его потенциальной энергии, происходит следующим образом.

Из перегревателя парового котла водяной пар по трубопроводу направляется в паровую турбину 2. Здесь, проходя через суживающиеся сопла 3 (одно из сопел

изображено отдельно), пар расширяется и вытекает из них с большой скоростью; таким образом, в паровой турбине, как и в гидравлической, в соплах потенциальная энергия превращается в кинетическую. Здесь такой энергией обладает вытекающий из сопел с большой скоростью водяной пар. С этой скоростью пар поступает на изогнутые лопатки 4, насаженные на диски 5, укрепленные на валу 6 (часть вала с насаженными на него диском и лопатками показана отдельно). Кинетическая энергия пара передается лопаткам, и они вместе с диском и валом приходят во вращение. Энергия вращения вала — механическая энергия, возникшая за счет кинетической энергии пара. На одном валу с турбиной помещен электрический генератор 7, который за счет подводимой по валу механической энергии вырабатывает электрическую энергию; последняя поступает на металлические неизолированные провода, называемые шинами генератора, и с них направляется к ближайшим потребителям или поступает в трансформатор. В трансформаторе повышается напряжение электрического тока; ток высокого напряжения поступает в высоковольтную сеть, по которой направляется к далеко расположенным потребителям. Так электрическая энергия может передаваться на сотни километров от места ее приготовления к месту потребления.

Совершив работу вращения вала, водяной пар покидает турбину и поступает в особый аппарат — конденсатор 8. Внутри трубок конденсатора движется вода, подаваемая насосом 9 из реки или какого-либо другого источника (пруд, озеро). Вода отнимает тепло от пара, находящегося снаружи трубок, и он конденсируется. Охлаждающая вода покидает конденсатор и уходит обратно в реку, а получившаяся из пара вода, называемая конденсатом, направляется насосом 10 сначала в питательный бак 11, а затем насосом 12 через не показанный на чертеже подогреватель в барабан котла. Из барабана вода поступает в трубки 14, и путь воды вновь повторяется.

Так химическая энергия топлива в паросиловой установке оказалась превращенной в электрическую.

Значительно меньше используются остальные два вида упомянутых ранее энергоресурсов, хотя оба они, как и гидроресурсы, постоянно возобновляются природой и с этой

точки зрения представляют большой интерес для народного хозяйства.

Область техники, занятая непосредственным использованием солнечной энергии для технических целей, называется гелиотехникой (от греческого слова гелиос — солнце). В СССР ведется большая научно-исследовательская работа в этой области. Получены положительные результаты в практическом использовании ряда конструкций солнечных подогревателей. Многолетняя эксплуатация показала, что они способны нагревать воду до 55—60° С. Длительность сезона использования таких нагревателей для южной полосы Европейской части СССР определяется в 150—270 дней. Особенно эффективно применение гелиотехнических установок в южных районах СССР.

В районах с жарким климатом можно применить гелиоустановки для холодильных целей, кондиционирования воздуха (приготовление воздуха с постоянными температурой и влажностью) и в особенности для сельского хозяйства (парники, животноводство, сушка фруктов). Развитие гелиотехники открывает широкий путь для экономии топлива.

Область техники, использующая энергию ветра, называется ветроэнергетикой. Запасы энергии ветра колоссальны, однако использование их наталкивается на большие трудности, главным образом из-за изменчивости силы ветра и его направления. Наибольшее использование ветродвигатели получили в сельском хозяйстве, в особенности при совместной их работе с гидростанциями. В СССР, главным образом благодаря работам творца науки о движении воздуха и других газов (аэродинамики) великого русского ученого Н. Е. Жуковского, разработана теория быстрогоходного ветродвигателя, созданы конструкции такого двигателя и начато серийное их изготовление для использования главным образом в сельском хозяйстве и на огромных просторах Арктики, где в течение почти всего года дуют сильные ветры.

В крупном промышленном производстве электрической энергии, как говорят, в большой энергетике, ни энергия излучения солнца, ни энергия ветра не нашли себе пока применения, хотя работа в этом направлении, в особенности по использованию энергии ветра, в СССР ведется.

Наибольшее значение в крупнопромышленном производстве электрической энергии имеют гидроресурсы и топливные ресурсы страны; техника их использования и сооружения гидравлических и тепловых электрических станций достигла в СССР высокой степени совершенства.

Электрическая энергия среди прочих видов энергии занимает особое место с точки зрения использования ее в народном хозяйстве и быту; громадное преимущество этого вида энергии заключается в легкости передачи ее к потребителям, возможности подачи в трудно доступные места — на большую высоту, на большую глубину под воду или под землю. Ценное преимущество электрической энергии заключается также в ее легкой дробимости: к местам потребления она может подаваться в любых количествах — очень больших, например для крупных электродвигателей, и очень малых — для ламп накаливания, радиоламп. Электрическая энергия легко превращается в другие виды энергии: тепловую — в различного рода нагревательных приборах, механическую — в электродвигателях, световую — в лампах накаливания.

Использование электрической энергии в промышленности ускоряет технологические процессы производства, экономит затраты, обеспечивает внедрение новой высшей техники.

В металлургии при помощи электричества получают высококачественную сталь; в процессе выработки цветных металлов извлекают при помощи электрического тока разные ценные примеси: олово, серебро, золото. Электроэнергия позволяет легко внедрять автоматику, используется для закалки деталей, сушки древесины, нагрева, сварки. На использовании электроэнергии основано действие различного рода приборов по измерению и контролю производственных процессов, их автоматизации, регулированию и управлению на расстоянии.

Электроэнергия оказывает революционизирующее влияние и на другие стороны народного хозяйства: сельское хозяйство, транспорт, строительство. Электроэнергия делает более гигиеничными условия труда на предприятиях, улучшает и облегчает быт трудящихся. Вот почему проникновение электрической энергии во все области человеческой деятельности и быта — электрификация страны — было предметом особого внимания партии и правительства.

Основатель Коммунистической партии и Советского го-

сударства В. И. Ленин в своих трудах неоднократно говорит о значении электрификации. Переход к социализму и в дальнейшем к коммунизму В. И. Ленин видел в развитии электрификации. В речи на III Всероссийском съезде Российского Коммунистического Союза молодежи в 1920 г. Ленин так обосновал свое отношение к электрификации:

«Мы знаем, что коммунистическое общество нельзя построить, если не возродить промышленности и земледелия, причем надо возродить их не по-старому. Надо возродить их на современной, по последнему слову науки построенной, основе. Вы знаете, что этой основой является электричество, что только, когда произойдет электрификация всей страны, всех отраслей промышленности и земледелия, когда вы эту задачу освоите, только тогда вы для себя сможете построить то коммунистическое общество, которого не сможет построить старое поколение»¹.

Электрификацию В. И. Ленин понимал широко, в тесной связи со всем народным хозяйством, а не как изолированное построение электрических станций. На VIII Всероссийском съезде Советов В. И. Ленин говорил:

«Только тогда, когда страна будет электрифицирована, когда под промышленность, сельское хозяйство и транспорт будет подведена техническая база современной крупной промышленности, только тогда мы победим окончательно»².

Значение электрификации В. И. Ленин кратко сформулировал в ставшем историческим лозунге:

«Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны»³.

Международное значение преобразования отечественного народного хозяйства на базе электрификации В. И. Ленин выразил в том же докладе в словах:

«...если Россия покроется густой сетью электрических станций и мощных технических оборудований, то наше коммунистическое хозяйственное строительство станет образцом для грядущей социалистической Европы и Азии»⁴.

¹ В. И. Ленин, Соч., т. 31, стр. 264.

² В. И. Ленин, Соч., т. 31, стр. 484.

³ В. И. Ленин, Соч., т. 31, стр. 484.

⁴ В. И. Ленин, Соч., т. 31, стр. 486.

² А. М. Литвин.

Эти пророческие слова В. И. Ленина претворяются в жизнь в наши дни. Страны народной демократии, используя богатейший опыт электрификации СССР и бескорыстную помощь Советского Союза, выражающуюся в предоставлении долгосрочных кредитов на льготных условиях, в оказании технической и научной помощи, быстро преобразуют свое народное хозяйство на базе электрификации.

Продолжатель дела В. И. Ленина И. В. Сталин всегда подчеркивал, что электрификацию нужно понимать не изолированно, а в тесной связи и во взаимодействии с развитием всех сторон народного хозяйства страны. В своей речи на Пленуме ЦК ВКП(б) в 1928 г. он говорил:

«... под электрификацией страны Ленин понимает не изолированное построение отдельных электростанций, а постепенный «перевод хозяйства страны, в том числе и земледелия, на новую техническую базу, на техническую базу современного крупного производства», связанного так или иначе, прямо или косвенно, с делом электрификации»¹.

Начатое с первых лет организации Советской власти построение сельских электростанций, получившее особенно большое развитие с укрупнением коллективных хозяйств, сооружение мощных государственных гидростанций в различных местах страны — все это обеспечивает проникновение электричества в колхозный быт и сельское хозяйство. Замена тракторной тяги электрической поднимает сельское хозяйство на новый, более высокий уровень. Достаточно указать, что электромолотьба приносит экономии почти 6 кг горючего и 0,6 кг смазочного масла на 1 т обмолоченного зерна. Электроэнергия становится базой пахоты, проникает во все процессы животноводства.

Задачи, поставленные сентябрьским (1953 г.) и февральско-мартовским (1954 г.) пленумами ЦК КПСС перед сельским хозяйством по увеличению в ближайшие 2—3 года продукции, связаны с организацией сельскохозяйственного производства на базе высшей техники, т. е. на базе его дальнейшей электрификации.

Уже построенный социализм в стране и уверенное движение к созданию коммунистического общества, намечен-

¹ И. В. Сталин, Соч., т. 11, стр. 254. (Курсив И. В. Сталина).

ное историческим XIX съездом КПСС, подтверждают справедливость гениального предвидения В. И. Ленина, выразившегося в следующем утверждении, сделанном им в период полной разрухи в стране и неоконченной гражданской войны:

«Электрификация переродит Россию. Электрификация на почве советского строя создаст окончательную победу основ коммунизма в нашей стране, основ культурной жизни без эксплуататоров, без капиталистов, без помещиков, без купцов»¹.

2. ПУТИ РАЗВИТИЯ И ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ СОВЕТСКОЙ ЭНЕРГЕТИКИ²

Для царской России, несмотря на громадные природные богатства и высокий уровень научной мысли, опередившей в ряде отраслей знания зарубежную науку, характерен был низкий общий технический уровень развития промышленности и полукOLONиальная зависимость ее от иностранного капитала.

На XVIII съезде ВКП(б) В. М. Молотов указывал, что в 1913 г. производство чугуна на душу населения в России было в 11 раз меньше, чем в США, и в 8 раз меньше, чем в Германии, и это при громадных залежах железной руды. Добыча каменного угля на душу населения, также при наличии богатых залежей топлива во всех частях страны, была в России в 26 раз меньше, чем в США, и в 15 раз меньше, чем в Германии; продукция машиностроения была в 33 раза меньше, чем в США, и в 40 раз меньше, чем в Германии.

Некоторые отрасли промышленности отсутствовали; так, не было автомобильной и тракторной промышленности, станкостроения, не было химической промышленности, а та промышленность, которая имела, находилась в полной зависимости от иностранного капитала, главным образом французского, английского и бельгийского. Иностранные капиталисты были заинтересованы в том, чтобы тормозить развитие промышленности в России и держать ее в поло-

¹ В. И. Ленин, Соч., т. 30, стр. 343.

² Очень подробно эта тема рассмотрена в книге С. Ф. Шершова «Ленинско-Сталинский план электрификации СССР», ГЭИ. 1951. Из этой книги почерпнут ряд приведенных здесь сведений.

жении поставщика дешевого сырья и продуктов сельского хозяйства промышленному Западу.

Низкий уровень развития промышленности определил и низкий уровень развития энергетики. 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 — 15-е, а в Европе — 7-е; интересно отметить, что небольшая страна Швейцария стояла в этом отношении впереди России. Соответственно был низок и технический уровень энергетики. Например, в Петербурге работали 105 мелких электрических станций; разными были напряжение, частота, число фаз. Котельные электростанций имели давление порядка 8-14 *атм*, температуру пара 300—350° С; к. п. д. котлов достигал 65%. Котельные в Москве и Баку работали на нефти и высокосортном донецком топливе, а Петербург использовал импортный английский уголь.

На всех электростанциях только две турбины имели наибольшую тогда мощность 10 000 *квт* в одном агрегате. Максимальный к. п. д. станций составлял 11—12%, средний расход условного топлива равнялся 1050 *г* на 1 *квтч*. Суммарная мощность электростанций составляла 1 098 000 *квт*, а выработка электроэнергии 2 млрд. *квтч/год*.

Почти все основное оборудование электростанций было зарубежное, а сами электростанции принадлежали иностранцам.

Однако Советская власть не получила и того, что здесь перечислено, так как энергетика царской России была почти полностью разрушена в период империалистической войны 1914—1918 гг., последовавшей затем гражданской войны и иностранной интервенции.

Резкий контраст с состоянием энергетики в России представляли достижения русской научно-технической мысли, остававшиеся неиспользованными в царской России, правители которой с недоверием и опаской относились к науке. В науке царская власть видела рассадницу революционных идей; торгово-промышленные же круги царской России, будучи связаны с зарубежным капиталом, пренебрегали отечественными достижениями в области техники.

Основа теплотехнической науки были заложены гениальным русским ученым акад. М. В. Ломоносовым, от-

крывшим закон сохранения, названный его именем. М. В. Ломоносову принадлежит и первый трактат об электричестве на русском языке. В дальнейшем ряд русских ученых (И. А. Вышнеградский, Д. И. Менделеев, А. Г. Столетов и др.) продолжал дело М. В. Ломоносова и своими открытиями обогатил теплотехническую науку. Велики достижения русских техников и в прикладной энергетике. И. И. Ползунов сконструировал и пустил в ход первую паровую машину для заводских нужд. В дальнейшем Н. П. Петров, А. И. Предтеченский, К. В. Кириш, В. И. Григневский и др. своими работами заложили основы проектирования и построения паровых котлов и тепловых двигателей. Таким образом, русским ученым принадлежит первенство в теоретической и прикладной теплоэнергетике.

В области электроэнергетики русские ученые сделали ряд открытий и изобретений, определивших в дальнейшем бурное развитие этой области техники. Акад. В. В. Петров открыл электрическую дугу; А. Н. Лодыгин изобрел электрическую лампу накаливания, проф. Д. А. Лачинов дал теорию, а Ф. А. Пироцкий в 1874 г. провел первые опыты по передаче электрической энергии на расстояние; М. О. Доливо-Добровольский изобрел электрический двигатель и трансформатор трехфазного тока.

Изобретатель прогрессивного метода добычи торфа — гидроторфа — русский инженер Р. Э. Классон построил в 1914 г. первую в мире районную торфяную электрическую станцию, носящую в настоящее время его имя.

Таковы важнейшие достижения русской дореволюционной науки и техники в рассматриваемой здесь области знаний.

Однако наибольшего своего развития энергетика и теплотехническая наука достигли в советский период.

С первых дней организации Советской власти по инициативе В. И. Ленина осуществляется ряд мероприятий по развитию электроэнергетических баз в промышленных районах страны: был поставлен вопрос о строительстве Шатурской ГЭС, о строительстве ряда гидроэлектростанций на Волжской Сечи, в Ипатьеве, однако гражданская война мешала планомерному их проведению. В период 1918—1921 гг. был построен ряд небольших электростанций общей мощностью до 16 000 *квт*.

Впервые научно с государственной точки зрения вопрос об электрификации России был поставлен В. И. Лениным в 1918 г. в его статье «Набросок плана научно-технических работ». В этой статье даны практические указания о том, в каких направлениях должны развиваться работы по реорганизации народного хозяйства страны, а именно в статье говорится о том, что в плане научных работ по реорганизации промышленности и сельского хозяйства страны должно быть: «Обращение особого внимания на электрификацию промышленности и транспорта и применение электричества к земледелию. Использование перовоклассных сортов топлива (торф, уголь худших сортов) для получения электрической энергии с наименьшими затратами на добычу и перевоз горючего»¹.

В январе 1920 г., когда еще не окончилась гражданская война — предстояла борьба на Дальнем Востоке, в Закавказье, в Крыму, — В. И. Ленин дает указания о составлении плана электрификации России. Была организована под председательством Г. М. Кржижановского комиссия, широко известная под названием ГОЭЛРО (Государственная комиссия по электрификации России).

В составлении плана ГОЭЛРО принимал участие большой коллектив ученых и инженеров страны.

В соответствии с указаниями В. И. Ленина 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, добычу топлива, развитие транспорта, машиностроения. Рост промышленности по сравнению с довоенной намечался на 80—100%, добычи угля — в 2,1 раза; предусматривались создание новых отраслей промышленности, постройка новых линий железных дорог, электрификация ряда действовавших. По энергетике предусматривалось в течение 10—15 лет сооружение новых 30 крупных районных электростанций (из них десять — гидравлических) общей мощностью 1 750 000 квт.

План ГОЭЛРО по глубине и научному подходу к решению основных народнохозяйственных задач явился первым единым государственным хозяйственным планом, обеспечившим создание материально-технической базы социализ-

ма. Он был рассмотрен и утвержден на VIII Всероссийском съезде Советов рабочих и крестьянских депутатов в декабре 1920 г. В. И. Ленин на съезде характеризовал план ГОЭЛРО как вторую программу партии. Съезд поручил правительству и руководящим организациям широко его пропагандировать и принять к изучению во всех учебных заведениях республики.

Высокую оценку дал плану ГОЭЛРО И. В. Сталин, наметивший и конкретные пути его практического осуществления.

В чем же заключались основные пути развития советской энергетики?

По идеям плана ГОЭЛРО советская социалистическая энергетика должна была 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.

В дореволюционной России на электростанциях использовались 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. Развитие советской энергетики при построении крупных электрических станций было намечено по пути использования местных низкосортных топлив как технического мероприятия, способствующего развитию промышленности данного района, освобождающего железные дороги от излишних перевозок, и важнейшего оборонного мероприятия.

Особо нужно отметить роль теплофикации в развитии советской энергетики. 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, дающей огромную экономию топлива и улучшающей быт трудящихся.

Продолжавшаяся гражданская война мешала проведению в жизнь плана ГОЭЛРО. Только после окончания гражданской войны государство вплотную подошло к его

¹ В. И. Ленин, Соч., т. 27, стр. 288.

осуществлению, опираясь на национализированную крупную промышленность, землю, транспорт, банки.

В восстановительный период 1921—1927 гг. мощность станций по отношению к 1913 г. увеличилась в 1,6 раза, а выработка электрической энергии — в 2,1 раза. В этот период были построены и включены в работу крупнейшая торфяная Шатурская электрическая станция, Волховская гидроэлектростанция, ряд станций в Донском угольном бассейне.

Промышленность в эти годы добилась больших успехов: в 1925 г. она достигла 75% довоенной, сельское хозяйство — 87%.

В 1925 г. XIV съезд ВКП(б) утвердил программу индустриализации страны, которая должна была в условиях капиталистического окружения сделать нашу страну экономически независимой. Эта программа стала генеральной линией партии.

Первая пятилетка (1928—1932 гг.) принесла значительный рост промышленности: было введено в работу до 1500 новых предприятий и среди них ряд крупнейших электростанций — Днепровская, Зуевская, Каширская, Штеровская и др. Мощность электростанций по сравнению с 1913 г. возросла в 4,3 раза, а выработка электроэнергии — в 7 раз.

Доля электрической энергии во всей энергии, идущей на привод механизмов в промышленности (так называемый коэффициент электрификации), поднялась с 50,9% в 1928 г. до 71,2% в 1932 г.; это, а также значительный прирост крупных электростанций для централизованного снабжения промышленности характеризуют процесс ее электрификации. В этот же период была произведена электрификация ряда участков железнодорожного транспорта. В сельском хозяйстве производились опыты по его электрификации.

Бурный рост потребления электроэнергии свидетельствует о грандиозном количественном скачке промышленности. В общественном отношении первая пятилетка принесла полное обновление промышленности, создание по существу новой социалистической индустрии, явившейся экономическим фундаментом построения социалистического общества.

В этот период ряд советских энергетиков выявил в проектировании и на строительстве свой технический талант и организаторские способности. Среди них надо прежде всего отметить акад. И. Г. Александрова (1875—1936 гг.), с именем которого связана разработка проектов крупнейших гидростанций, акад. Г. О. Графтио (1869—1949 гг.), который участвовал в проектировании и строительстве таких станций, как Волховская, Нижне-Свирская, Днепровская. Крупный вклад в советскую энергетику сделал выдающийся инженер-гидроэнергетик акад. Б. Е. Веденеев (1885—1946 гг.), один из составителей плана ГОЭЛРО и главный инженер Днепровской гидростанции. В славном ряду советских энергетиков, стоящих у истоков отечественной энергетики, видное место занимает акад. А. В. Винтер, возглавлявший строительство Шатурской и Днепровской электростанций.

Вторая пятилетка (1933—1937 гг.) вместе с первой принесла коренное изменение экономического облика нашей страны. Вошли в строй такие крупнейшие электростанции, как Сталиногорская, Дубровская, Свирская. Мощность электростанций была увеличена в 8 раз по сравнению с 1913 г., а по выработке электроэнергии Советский Союз занял 2-е место в Европе. В этот период истек срок осуществления плана ГОЭЛРО; задания плана были перевыполнены почти в 3 раза.

В течение второго пятилетия закончился процесс электрификации промышленности, усилилась электрификация железнодорожного транспорта, было положено начало электрификации сельского хозяйства.

По производству чугуна и стали в 1937 г. Советский Союз вышел на 2-е место в Европе, по продукции всей промышленности он занял 1-е место в Европе и 2-е в мире. По главнейшим видам продукции — углю, цинку, электроферросплавам, тракторам, бумаге и др. — Советский Союз стал независимым от иностранного рынка. Резко снизился импорт энергетического оборудования, а по генераторам он совсем был прекращен.

В третьем пятилетии XVIII съезд партии (в 1939 г.) поставил задачу дальнейшего роста энергетики СССР.

План этого пятилетия не был завершен вследствие начатой Германией войны против СССР; несмотря на это,

выполнение его оказалось значительным. За период до начала войны было введено в работу около 2,4 млн. кВт новой мощности, т. е. в 2,2 раза больше общей мощности электростанций в 1913 г.; соответственно возросла и промышленность и главным образом машиностроение. Среди других качественных сдвигов в промышленности надо отметить значительное развитие химической промышленности и рост выплавки сталей высокого качества (легированных сталей).

Годы мирного хозяйственного строительства СССР сменились периодом напряженной борьбы всего советского народа с немецко-фашистскими захватчиками. Для ведения Отечественной войны понадобились напряжение всех сил народа, мобилизация всей промышленности 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 происходили перестройка и развитие энергетики, в первую очередь той ее части, которая добывает электроэнергию путем сжигания топлива, т. е. теплоэнергетики.

За 3 года (1942—1944) построено было 2 250 новых крупных промышленных предприятий и среди них крупнейшие электростанции: Челябинская, Красногорская, Безымянская, Рыбинская и др.

Победа над врагом выдвинула новые грандиозные задачи перед нашей промышленностью. Надо было не только восстановить разрушенные предприятия—среди них 61 крупную электростанцию, в том числе Днепрогэс, — 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. Перед энергетиками Советского Союза была поставлена задача резко повысить установленную мощность

электростанций, увеличить выработку электроэнергии в 1950 г. на 70% по сравнению с 1940 г. и при этом широко внедрить новейшую энергетическую технику — пар высоких параметров, теплофикацию, автоматику производственных процессов.

Эти задачи были успешно выполнены: в начале 1947 г. довоенная мощность электростанций была восстановлена, а по выработке электроэнергии СССР занял 1-е место в Европе и 2-е место в мире.

Выработка электроэнергии в 1950 г. — последнем году послевоенной (четвертой по счету) пятилетки — составила свыше 90 млрд. кВтч.

Из качественных сдвигов в области энергетики за этот период надо отметить значительный разворот автоматизации процессов на электростанциях и в сетях, внедрение широкого фронта водяного пара высоких параметров (100 атм и 510°С), выполнение ряда научно-исследовательских работ по изучению водяного пара сверхвысоких параметров (300 атм и 600°С), значительное снижение удельного расхода топлива: в 1950 г. он равнялся 0,539 кг/кВтч, т. е. вдвое меньше, чем в 1913 г., усиленное строительство сельских электростанций, мощность которых составила на 1/X 1948 г. 226% по отношению к 1/I 1940 г.

Громадное большинство электростанций к этому времени было соединено между собой при помощи линий высокого напряжения, образуя районные энергетические системы.

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, т. е. создать межрайонные объединения энергосистем. Так, объединившись, Горьковская, Ярославская и Ивановская энергосистемы через мощные гидростанции на Волге — Угличскую и Щербаковскую — соединились с Московской энергосистемой. Районные энергосистемы Донбасская, Днепровская и Ростовская также соединились между собой. Намечается соединение ряда других районных систем.

Появление межрайонных объединений является началом построения единой высоковольтной сети (ЕВС) Советского Союза, создание которой позволит наи-

более целесообразно использовать энергетические ресурсы страны.

В результате работ советских ученых и инженеров в Советском Союзе спроектирована и построена первая в мире промышленная электростанция на атомной энергии мощностью 5 000 кВт.

27 июля 1954 г. атомная электростанция была пущена в эксплуатацию и дала электрический ток для промышленности и сельского хозяйства прилегающих районов.

Таким образом, впервые электрическая энергия получается не за счет сжигания топлива, а за счет атомной энергии — расщепления ядра атома урана.

Вводом в действие атомной электростанции сделан реальный шаг в деле мирного использования атомной энергии.

Советскими учеными и инженерами ведутся работы по созданию промышленных электростанций на атомной энергии мощностью 50—100 тыс. кВт.

Пятый пятилетний план развития народного хозяйства страны (1951—1955 гг.) согласно директивам исторического XIX съезда партии является важнейшим этапом в развитии энергетики.

Рост выработки электроэнергии на конец пятилетия по сравнению с 1950 г. определен на 80%; производство паровых турбин должно возрасти в 2,3 раз, паровых котлов — в 2,7 раза, гидротурбин — в 7,8 раз.

Перед советской энергетикой поставлены следующие почетные задачи:

«Увеличить за пятилетие общую мощность электростанций, примерно, вдвое, а гидроэлектростанций — втрое, обеспечив в части тепловых электростанций в первую очередь расширение действующих предприятий. Ввести в действие крупные гидроэлектростанции, в том числе Куйбышевскую на 2 100 тысяч киловатт, а также Камскую, Горьковскую, Мингечаурскую, Усть-Каменогорскую и другие общей мощностью 1 916 тысяч киловатт. Осуществить строительство и ввести в действие линию электропередачи Куйбышев—Москва.

Развернуть строительство Сталинградской, Каховской и Новосибирской гидроэлектростанций, начать строительство новых крупных гидроэлектростанций: Чебоксарской на Волге, Воткинской на Каме, Бухтарминской на Иртыше и ряда других.

Начать работу по использованию энергетических ресурсов реки Ангара для развития на базе дешевой электроэнергетики и местных источников сырья алюминевой, химической, горнорудной и других отраслей промышленности».

Повышение уровня промышленного производства за пятилетку установлено на 70%.

Пятый пятилетний план развития народного хозяйства успешно выполняется. Выработка электроэнергии, а вместе с ней и общий рост промышленного производства неизменно растут. В 1952 г. производство чугуна достигло 25 млн. т, стали — 35 млн. т, проката — 27 млн. т, угля — 300 млн. т, нефти — 47 млн. т. Выработка электроэнергии составила 119 млрд. кВтч.

В области теплоэнергетики намечен к разрешению ряд проблем; среди них важнейшие — использование водяного пара сверхвысоких параметров, применение газовых турбин, комплексное использование топлив. Согласно директивам XIX съезда должна быть завершена полная автоматизация районных гидроэлектростанций, осуществлено широкое применение автоматизации производственных процессов на тепловых электростанциях, приступлено к внедрению телемеханизации в энергетических системах.

В новую фазу своего развития вступает электрификация сельского хозяйства. Источниками электроэнергии становятся не только колхозные электростанции, но и более крупные межколхозные, а также государственные электростанции — от разветвленных линий электропередачи. XIX съездом дается следующая директива:

«Считать одной из важнейших задач внедрение электротракторов и сельскохозяйственных машин, работающих на базе использования электроэнергии, особенно в районах крупных гидроэлектростанций».

Пятый пятилетний план развития народного хозяйства страны, обеспечивая широкую электрификацию всех сторон народного хозяйства, вместе с тем ведет к стиранию существенного различия между трудом умственным и физическим, между городом и деревней, что означает новый крупный шаг вперед по пути развития нашей страны от социализма к коммунизму.

ГЛАВА ВТОРАЯ

РАБОЧИЕ ТЕЛА И ЗАКОНЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОТЫ

3. ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МЕР

В разнообразных областях техники и в быту приходится иметь дело с различного рода измерениями. Так, при постройке здания встречается необходимость измерять площадь и объем его, а также вес 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 расходующего топлива и время, в течение которого оно израсходовано.

В этих примерах вес, площадь, объем и время называют величинами. Кроме перечисленных, существует еще много других величин, о которых речь будет идти впереди.

Для того чтобы измерить какую-нибудь величину, нужно иметь для нее единицу измерения. Например, для того чтобы измерить длину какого-либо предмета, нужно условиться о том, какой отрезок следует принять за единицу измерения длины. Если такая договоренность имеется, то для измерения длины предмета следует узнать, сколько раз этот отрезок, принятый за единицу измерения, заключается в измеряемой длине. Этим самым и будет произведено необходимое измерение. Так производится, например, всем известное измерение длины комнаты, длины куска материи. Из изложенного мы можем заключить, что *измерить какую-либо величину — это значит сравнить ее с другой величиной того же рода, принятой за единицу измерения данной величины.*

В прежнее время в каждой стране были свои единицы измерения, но пользование различными единицами при измерении одних и тех же величин неудобно, так как оно затрудняет хозяйственные сношения отдельных стран между собой.

В прошлом столетии в большинстве стран была введена так называемая метрическая система мер. Только Англия со своими колониями и Соединенные Штаты Америки не ввели у себя метрической системы, что и составляет 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 Международном бюро весов и мер (в Париже) 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 обычные «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, который равен 1000 метрам.

С другой стороны, было бы также неудобно небольшие отрезки измерять в метрах; для этого существуют единицы измерения, меньшие метра. Это — дециметр, сантиметр, миллиметр, причем $1 \text{ метр} = 10 \text{ дециметров} = 100 \text{ сантиметров} = 1000 \text{ миллиметров}$.

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 составляет большое преимущество метрической системы мер.

Следующая величина, имеющая чрезвычайно важное значение в технике, — это сила. Понятие об этой величине каждый из нас имеет из непосредственного 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 ско-

ростью и требуется увеличить скорость движения или, наоборот, затормозить, 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; 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 технической системе мер принят килограмм (обозначается кг).

Для измерения очень больших сил или весов применяют другую единицу измерения — тонну (т); для измерения очень малых сил применяют грамм (г); соотношения между ними таковы:

$$1 \text{ т} = 1\,000 \text{ кг};$$

$$1 \text{ кг} = 1\,000 \text{ г}.$$

В технике очень часто приходится измерять продолжительность какого-либо процесса. Для этого существует единица измерения времени — секунда (сек.) Другими единицами для измерения времени служат минута (мин.), равная 60 сек., и час, равный 60 мин.

Изучение других величин, с которыми приходится иметь дело в технике, показывает, что все они могут быть образованы при помощи уже рассмотренных. Поэтому рассмотренные величины — длина, сила и время — называются основными, а все остальные — производными величинами.

Рассматриваемая здесь система единиц измерений называется технической системой мер.

Рассмотрим ряд производных величин, с которыми приходится часто иметь дело, и единицы измерения этих величин в технической системе мер.

В качестве единицы измерения площадей принимают площадь такого квадрата, у которого длина и ширина равны 1 м. Такая площадь называется квадратным метром и обозначается м^2 . Для измерения больших площадей единицей измерения может служить квадратный километр (км^2), а для малых площадей — дм^2 , см^2 , мм^2 .

При помощи единицы измерения длины можно получить и единицу измерения объема. Для этого берут куб, у которого длина, ширина и высота равны каждая 1 м. Полученный таким образом объем называется кубическим метром; он обозначается м^3 и служит единицей измерения объемов тел. Для этой же цели могут служить см^3 (кубический сантиметр), дм^3 (кубический дециметр) и др. Общеупотребительная единица измерения объема жидкостей — литр (л) — равна 1 дм^3 .

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 вес измеряют в килограммах, то *удельным весом тела называется вес 1 м^3 этого тела, измеренный в килограммах*. Так, например, удельный вес стали 7 800 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 стали составляет 7 800 $\text{кг}/\text{м}^3$. Чтобы самому найти удельный вес какого-либо тела, надо было бы отрезать кусок его, имеющий объем 1 м^3 (или, если это жидкость, налить ее 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. 1 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 1 000; полученное число и будет удельным весом в $\text{кг}/\text{м}^3$.

Удельным объемом какого-либо тела называется объем такого количества его, 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 1000 кг/м^3 , т. е. 1 м^3 воды весит 1000 кг , или 1 т , то удельный объем воды (при 0°C) равен:

$$1:1000 = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

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

С понятием силы непосредственно связана величина — давление, которую 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. Поэтому 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 паровых 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).

Площадь 1 см^2 в $10\,000$ раз меньше, чем площадь 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 тела, то эту единицу измерения называют технической атмосферой или для краткости просто атмосфе-

рой (*ат*). Таким образом, если говорят, что давление в котле равно 20 ат , 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 позднее, когда ближе познакомимся с газообразными телами.

Пример 1. На чашке весов, площадь которой равна 240 см^2 , лежит равномерно распределенный по ней груз, вес которого составляет $1,2 \text{ кг}$. 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 1 см^2 ; очевидно, получится:

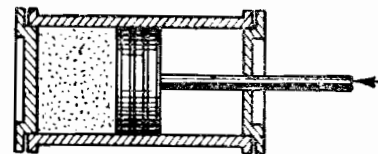
$$1,2:240 = 0,005 \text{ кг/см}^2.$$

Таким образом, давление груза на площадку равно $0,005 \text{ кг/см}^2$, или $0,005 \text{ ат}$.

Пример 2. Давление пара в цилиндре машины (фиг. 3) равно 12 ат ; площадь поршня равна 200 см^2 . Вычислить, с какой силой пар давит на поршень.

Так как давление 12 ат соответствует силе 12 кг на 1 см^2 , то сила, приходящаяся на весь поршень, площадь которого равна 200 см^2 , составит:

$$12 \cdot 200 = 2\,400 \text{ кг}.$$

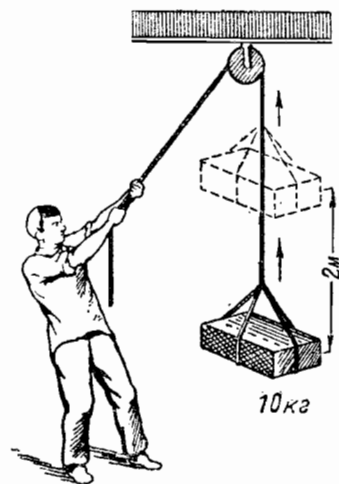


Фиг. 3. Цилиндр с подвижным поршнем.

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 перемещение. Эта единица измерения работы носит название килограмметр и обозначается кгм .

Если работу будет совершать сила в несколько килограммов, допустим 10 кг, и перемещение будет произведено, положим, на 2 м, то работа, очевидно, будет равна 20 кгм. На фиг. 4 показано совершение такой работы человеком при подъеме груза. Здесь при помощи неподвижного



Фиг. 4. Работа подъема груза.

блока направление силы, развиваемой человеком, изменено таким образом, что сила, с которой трос тянет груз, направлена в сторону его перемещения, т. е. вверх. Вычисление работы еще ничего не говорит об интенсивности, с которой эта работа совершена. Очевидно, что большая работа, совершенная за очень длительный промежуток времени, может быть менее интенсивна, чем малая работа, совершенная за короткий промежуток времени. Для того чтобы судить об интенсивности, с которой работа совершается, нужно знать, какая работа совершена в единицу времени, например в 1 сек. *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.

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

Найдем работу, совершенную подъемником. Она составляет:

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

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

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

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

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

Выразим эту мощность в лошадиных силах:

$$167 : 75 = 2,23 \text{ л. с.}$$

В киловаттах мощность подъемника составит:

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

4. ФОРМУЛА, ЗАВИСИМОСТЬ, ТАБЛИЦА, ГРАФИК

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

$$\text{стоимость топлива} = \text{цена топлива} \times \text{вес топлива.}$$

Однако такая запись очень громоздка. Для ее сокращения величины, входящие в записанное правило, обозначают какими-либо буквами. Если обозначить стоимость топлива буквой A , цену топлива — a , а вес топлива — G , то правило вычисления стоимости топлива будет записываться так:

$$A = aG.$$

Это выражение 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, v — удельный объем, то правило можно записать в виде таких формул:

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

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

(наиболее важные формулы мы будем нумеровать, помещая 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 соответственных 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 полу-

чаться 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 было сказано о работе и мощности, то нужно было бы поступить так. Обозначим работу буквой W , силу — P , перемещение — s , мощность — N и время — t . Правило вычисления работы, иначе говоря, формула для вычисления работы, запишется так:

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

а формула для вычисления мощности так:

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

Формула (1) для вычисления веса тела показывает, что чем больше удельный вес тела, тем больше вес одного и того же объема его; 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. Так, вес тела и его объем — это величины, прямо пропорциональные.

Формула (6) дает возможность установить следующее: чем больше время, в течение которого совершается одна и та же работа, тем интенсивность ее совершения, т. е. мощность, применяемая для ее выполнения, меньше; аналогично на основании формулы (4) можно заключить: чем больше удельный вес тела, тем меньше объем одного и того же весового количества его.

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.

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

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

$$G = 2V. \quad (7)$$

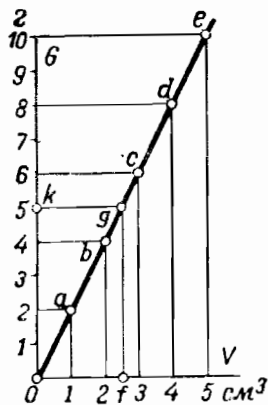
Для того чтобы выразить эту формулу графически, поступим следующим образом. Возьмем две перпендикулярные линии, выходящие из точки O (фиг. 5), и условимся на горизонтальной линии откладывать в виде отрезков значения объемов, а на вертикальной, то же в виде отрезков, соответствующие им значения весов. Для этого нужно предварительно условиться относительно масштаба для рассматриваемых величин. Пусть для объемов отрезок в 5 мм соответствует 1 см³, а для весов отрезок в 5 мм — 1 г; тогда согласно выбранному масштабу объемам 1, 2, 3, 4 см³ и т. д. будут соответствовать отрезки 5, 10, 15, 20 мм и т. д., а весам 1, 2, 3 г — отрезки 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 около них 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 — G ; рядом с каждой из букв поставим единицы измерения, в которых измерена каждая из величин.

Фиг. 5. Изображение зависимости между величинами в виде графика.

Найдем далее вес 1 см³. На основании формулы (7) этот вес составляет:

$$G = 2 \cdot 1 = 2 \text{ г.}$$

Чтобы изобразить полученный результат на нашем чертеже, восставим два перпендикуляра: один — в точке, соот-



ветствующей 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 см³ весит 2 г.

Найдем теперь вес 2 см³. По формуле (7) 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 см³, другой — в точке, соответствующей найденному для этого объема весу 4 г, и в пересечении этих перпендикуляров получим искомую точку b . Точка b пересечения этих перпендикуляров и показывает, что тело объемом 2 см³ весит 4 г. Таким же образом найдем точки c , d , e и т. д., показывающие веса объемов 3, 4, 5 см³ и т. д. Соединив точки a , b , c , d , e , получаем линию, дающую в графической форме зависимость веса тела от объема, соответствующую формуле (7).

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 2,5 см³, и восставим в ней перпендикуляр; в точке пересечения этого перпендикуляра с линией ae , характеризующей вес тела по формуле (7), находим точку g ; опустив из нее перпендикуляр на линию весов G , находим точку k , по положению которой видим, что объему 2,5 см³ соответствует вес 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 (7) 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 технической 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.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПРОРАБОТКИ

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

Ответ: $0,255 \text{ ат}$.

2. Пар в котле находится под давлением 10 кг/см^2 ; вычислить силу, с которой пар давит на днище, площадь которого $1,3 \text{ м}^2$.

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

4. При поднятии груза подъемником совершено 2400 кгм работы в течение 15 сек ; вычислить мощность подъемника в л. с. и квт .

Ответ: $2,13 \text{ л. с.}$, $1,57 \text{ квт}$.

5. Имеется двигатель мощностью 2 квт ; выразить мощность двигателя в л. с. и кгм/сек .

Ответ: $2,72 \text{ л. с.}$, 204 кгм/сек .

6. Двигатель имеет мощность 120 л. с. ; выразить эту мощность в квт .

Ответ: $88,2 \text{ квт}$.

5. АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

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, а иногда и более.

Различные вещества отличаются разным строением атомов, которые состоят из еще более мелких составных частей.

Молекулы чрезвычайно малы. Для того чтобы составить представление об их размерах, укажем, что если бы можно было около $10\,000\,000$ молекул среднего размера плотно уложить рядом, то их длина составила бы всего около 1 мм .

Молекулы в теле находятся в непрерывном движении,

причем средние скорости этого движения тем больше, чем выше температура тела.

Все тела в природе бывают в трех агрегатных 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 не отходят от своих мест далеко, 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 перекатываются друг по другу. Отличительным свойством жидкости является то, что жидкость принимает форму того сосуда, в который она налита, и не оказывает почти никакого сопротивления изменению своей формы. Вместе с тем жидкость имеет свой объем, иначе говоря, какую бы форму 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 выпускать или выкачивать находящийся там газ, то остающийся газ всегда будет равномерно заполнять весь баллон.

Твердое, жидкое и газообразное состояния называются агрегатными состояниями вещества. Одно и то же вещество может встретиться во всех трех состояниях, например: лед, вода, пар.

Большой вклад в науку о строении тел сделал величайший русский ученый акад. М. В. Ломоносов. В середине XVIII в. он в ряде своих работ развил учение о молекулярно-кинетической природе тел (т. е. о том, что тела состоят из молекул, находящихся в движении) и приложил это учение к объяснению многих явлений, в частности к химии, учению о теплоте.

Молекулы многих веществ состоят из неодинаковых атомов. Такие вещества называются сложными. Они представляют собой химические соединения из нескольких элементов. Некоторые из элементов в природе встречаются не в соединениях, а, как говорят, в свободном состоянии. Вещества, которые они образуют, называются простыми веществами. Так, простыми веществами являются азот, кислород, медь, серебро и др.

Веса атомов и молекул чрезвычайно малы, и на практике было бы неудобно каждый раз рассчитывать, какую долю грамма они составляют. Поэтому в науке пользуются особым способом, заключающимся в следующем: вес атома водорода (самого легкого из атомов) считают равным единице; веса атомов других элементов показывают, во сколько раз атом данного элемента весит больше атома водорода. Это число называется атомным весом элемента.

Названия элементов принято обозначать одной или двумя буквами латинского названия данного элемента. Так, азот обозначается буквой N от названия этого элемента Nitrogenium (нитрогениум), водород — H от Hydrogenium (хидрогениум), кислород — O от Oxigenium (оксигениум), свинец — Pb от Plumbum (плюмбум).

В табл. 2 в конце книги приведены сведения о главных элементах, встречающихся в теплотехнике.

Состав вещества характеризуется его химической формулой, которая показывает, из каких элементов оно состоит и сколько атомов данного элемента входит в каждую молекулу этого вещества. Так, вода имеет формулу H_2O . Формула эта говорит о том, что молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Кислород имеет

химическую формулу O_2 ; это значит, что одна молекула кислорода состоит из двух атомов кислорода; углекислый газ имеет химическую формулу CO_2 , которая показывает, что молекула углекислого газа состоит из одного атома углерода и двух атомов кислорода.

Зная химическую формулу вещества и атомные веса элементов, составляющих его, можно найти молекулярный вес, показывающий, во сколько раз вес молекулы этого вещества больше веса атома водорода. Так, молекулярный вес воды (H_2O) составит:

$$2 \cdot 1 + 16 = 18.$$

Здесь $2 \cdot 1$ — вес двух атомов водорода и 16 — вес одного атома кислорода. Молекулярный вес углекислого газа CO_2 , определенный тем же способом, составит:

$$12 + 2 \cdot 16 = 44.$$

Для многих теплотехнических расчетов оказывается очень удобным пользоваться единицей измерения количества вещества, называемой молей. Моль вещества содержит столько килограммов, сколько единиц в молекулярном весе. Так, если молекулярный вес углекислого газа имеет 44 единицы, то моль углекислого газа весит 44 кг. В табл. 3 приведены молекулярные веса тех веществ, которые представляют интерес в теплотехнических расчетах.

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.

Явления, которые сопровождаются появлением новых веществ, называются химическими превращениями, или химическими реакциями.

Подробное изучение весовых количеств веществ, вступающих в реакцию, привело к установлению закона сохранения вещества, который гласит: *вес веществ, вступающих в реакцию, всегда равен весу полученных веществ*. Этот закон был открыт в XVIII в. гениальным русским ученым акад. М. В. Ломоносовым.

6. ЭНЕРГИЯ И ЕЕ ВИДЫ. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ 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 наблюдений мы отмечаем, что энергия бывает различных видов. Так, рассмотренная нами энергия движения тел в определенном направлении (движение камня, автомобиля, вала) есть механическая энергия.

Из предыдущего мы знаем, что все тела состоят из мельчайших невидимых частиц — молекул, о существовании которых мы судим по различным их проявлениям. Они находятся в бесперывном 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, проявляющаяся во время химических реакций; атомная, выделяющаяся при расщеплении атома.

Все виды энергии делятся на два крупных класса: кинетическую и 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. Эта энергия 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. Находя-

щийся 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 в другие. Действительно, летящий с большой скоростью камень при столкновении со стенкой останавливается; это значит, что механическая энергия камня исчезает, но при этом как самый камень, так и стенка, где камень ударился о нее, 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 — мы наблюдаем, например, при движении автомобиля. Тепловая энергия выделяется при сгорании бензина в двигателе автомобиля, и тут же происходит преобразование части 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 в тепловую (электрический чайник, утюг). На производстве мы наблюдаем преобразование электрической энергии в механическую. Это преобразование состоит в том, что электродвигатель, получающий из электрической сети электрическую энергию, приводит в движение станок, движущиеся части которого получают механическую энергию от вала электродвигателя. За счет этой энергии станок совершает полезную работу.

Научно правильные представления о тепле были установлены сравнительно недавно. Еще в середине XVIII в. в Западной Европе господствовала так называемая теория теплорода. Согласно этой теории тепловое состояние тела определялось переходом от тела к телу невесомой и невидимой жидкости — теплорода. Одним из первых эту теорию отверг М. В. Ломоносов в 1744 г.

Для объяснения физических и химических явлений он исходил из разработанных им молекулярно-кинетических положений о строении тел. На основании их он в своем труде «Размышления о причине теплоты и холода» говорит: «Так как движение не может происходить без материи, то необходимо, чтобы достаточное основание теплоты заключалось в движении какой-то материи».

Вместе с тем М. В. Ломоносов считал, что все явления в природе связаны между собой, взаимно обусловлены. Исходя из этого, он установил закон сохранения материи и движения, посящий название закона Ломоносова: «...все перемены, в натуре случающиеся, такого суть состояния, что, сколько чего у одного тела отнимается, столько присовокупится к другому, так, ежели где убудет несколько материи, то умножится в другом месте... Сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения, ибо тело, движущее своею силой другое, столько же оная у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает»¹.

Этот закон получил свое развитие и приложение к тепловым явлениям только через 100 лет. В середине прошлого столетия ряд ученых занимался изучением превращений одних видов энергии в другие. 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 после упомянутых работ М. В. Ломоносова способствовали работы ряда других ученых. В окончательной форме он был установлен работами Майера в 1842 г. Этот год и считают годом введения в науку закона сохранения и превращения энергии.

Закон сохранения и превращения энергии наряду с рядом других открытий XIX в., способствовал утверждению марксистского диалектического метода познания природы

¹ М. В. Ломоносов, Избранные философские произведения, Госполитиздат, 1950, стр. 344.

и общества, который рассматривает природу и общество как единое целое, где явления зависят друг от друга и обуславливают друг друга. В этом отношении установление закона сохранения и превращения энергии явилось ударом по метафизическому методу познания природы и общества, который рассматривает явления обособленными, застывшими.

Громадное философское значение для утверждения мировоззрения пролетариата видел в законе сохранения и превращения В. И. Ленин. Он называл этот закон «установлением основных положений материализма»¹.

7. ТЕМПЕРАТУРА. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ. КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛА

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 самым разнообразным. В этой книге мы рассмотрим ртутные термометры, употребляемые для измерения сравнительно невысоких температур, и термоэлектрические пирометры — для измерения повышенных температур.

¹ В. И. Ленин, Материализм и эмпириокритицизм, ГПИ, 1948, стр. 314.

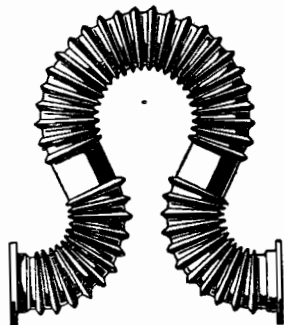
4 А. М. Литвин.

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.

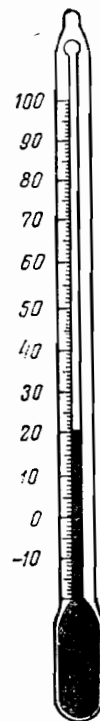
Так, при прокладке железнодорожных путей оставляют между отдельными рельсами небольшие промежутки, и в жаркую погоду, когда рельс удлиняется, эти промежутки уменьшаются; иначе рельсы уперлись бы концами и выпучились бы. Мост устанавливают таким образом, что один конец его жестко прикрепляют к его опоре, а другой покоится свободно на катках, и в жаркие дни при удлинении мост немного передвигается на катках. При монтаже паропроводов в них включают изогнутые гибкие трубы, так называемые компенсаторы (фиг. 6), которые принимают на себя удлинение или укорочение паропроводов, происходящее при изменении температуры металла.

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. 7). В узкую трубку, имеющую расширение внизу, наливают ртуть и помещают эту трубку в тающий лед (фиг. 8). Уровень ртути отмечают цифрой 0° (нуль градусов). Затем эту же трубку помещают (фиг. 9) в пары кипящей воды (при нормальном атмосферном давлении). Ртуть расширяется, и ее уровень занимает в трубке новое, более высокое положение. Новый уровень отмечают числом 100° (сто градусов). Расстояние между 0 и 100° делят на 100 частей; для этого пользуются особой, так называемой международной термодинамической шкалой; так она называется потому, что принята во всем мире и основана на законах термодинамики; получающиеся при этом на термометре деления не в точ-

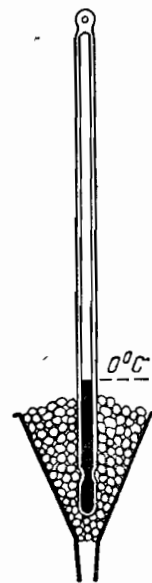


Фиг. 6. Компенсатор.

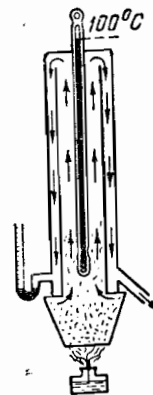
ности равны друг другу; каждое деление называется градусом. Так получают градус стогоградусной шкалы температур, которую иногда неправильно называют шкалой Цельсия. Рядом с числом, измеряющим температуру тела, ставят букву С (стогоградусная). Если теперь построенный нами термометр погрузить в жидкость, температуру которой желают измерить, и ртуть в трубке под-



Фиг. 7. Ртутный термометр.



Фиг. 8. Определение нулевой точки на термометре (0°C).



Фиг. 9. Определение точки кипения (100°C) на термометре.

нимется до деления 50, то это будет означать, что температура этой жидкости 50°C (пятьдесят градусов стогоградусной шкалы).

Итак, в стогоградусной шкале отсчет температур производится от точки таяния льда. Существуют и другие шкалы (Реомюра, Фаренгейта), но их в СССР не применяют.

Деления на шкале термометра, пользуясь той же международной термодинамической шкалой, можно продолжить

выше 100 и ниже 0° С. При обозначении температуры ниже нуля ставится знак — (минус).

Ртутные термометры можно применять в пределах между температурами —39 и примерно +550° С; при более низких температурах ртуть замерзает, а при более высоких температурах в стекле получают слишком большие напряжения.

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

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

$$t = T - 273; \quad (8)$$

$$T = t + 273. \quad (9)$$

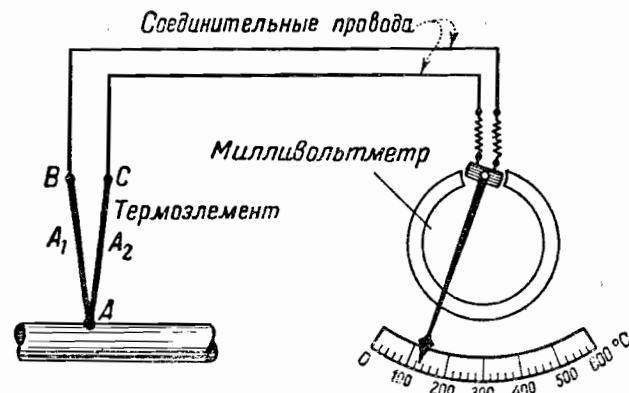
Температуры, отсчитанные от абсолютного нуля, обозначают °К. Таким образом, если написано: $T = 500^\circ \text{К}$, это значит, что тело имеет температуру 500° по абсолютной шкале температур; в стоградусной шкале ей будет соответствовать по формуле (8) температура

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

Для измерения высоких температур применяют другие приборы.

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. 10). Берут две проволоки A_1 и A_2 из разных металлов и спаивают или сваривают два их конца (A); два других конца C и B при помощи проволок присоединяют к электрическому прибору G , который называется милливольтметром. Если теперь конец A присоединить к телу с высокой температурой (в нашем случае — труба; к ней припаян конец A), которую хотят измерить, и принять меры к тому, чтобы температура в точках B и C



Фиг. 10. Термоэлектрический пирометр (термопара).

не менялась, то в наших проволоках потечет электрический ток, который будет отклонять стрелку прибора и тем больше, чем выше температура в точке A . На приборе часто имеется шкала, по которой можно непосредственно прочесть температуру, измеряемую прибором.

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

После того как мы научились измерять степень нагремости тел, можно указать, как вычисляется изменение длины какого-либо тела при нагревании. Для этого нужно знать определяемый опытным путем коэффициент линейного расширения тела. Он обозначается бук-

вой 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 1 м увеличивается на 11 миллионных метра, или на 11 тысячных миллиметра. Отсюда вытекает 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:

$$\Delta l = \alpha l_1 (t_2 - t_1). \quad (10)$$

Здесь 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:

$$l_t = l_1 + \Delta l. \quad (11)$$

Пример 4. 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 (10)

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

$$\Delta l = 165 \text{ мм.}$$

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. 4 и 5 в конце книги). Обозначают теплоемкость буквой c .

Для воды $c = 1 \text{ ккал/кг град}$;

Для стали $c = 0,11 \text{ ккал/кг град}$.

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, которое подвергается нагреванию — G , то для того чтобы это тело нагреть от t_1 до t_2 , нужно подвести к нему тепла

$$Q = Gc(t_2 - t_1). \quad (12)$$

С другой стороны, чтобы охладить тело от температуры t_1° до t_2° , от него нужно отнять

$$Q = Gc(t_1 - t_2) \text{ ккал.} \quad (13)$$

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 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 1 лошадиная сила (*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:

$$\mathcal{E} = Nt. \quad (14)$$

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

$$N = \frac{\mathcal{Q}}{t}. \quad (15)$$

Согласно закону сохранения и превращения энергии преобразования энергии происходят в строго определенных количествах; следовательно, между приведенными в этом параграфе единицами измерения тепловой и электрической, а также механической энергии должна существовать определенная зависимость.

Механическую энергию обычно измеряют той же единицей измерения, что и работу, т. е. килограммометром (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*.

В § 3 было сказано, что $1 \text{ кВт} = 102 \text{ кгм/сек}$, а $1 \text{ час} = 3600 \text{ сек.}$; поэтому

$$1 \text{ кВтч} = 102 \cdot 3600 = 367\,000 \text{ кгм},$$

или

$$1 \text{ кВтч} = 367\,000 : 427 = 860 \text{ ккал},$$

а

$$1 \text{ л. с. ч.} = 860 : 1,36 = 632 \text{ ккал}.$$

Пример 5. Электрический двигатель у строгального станка мощностью 2 кВт работал в течение 3 час. Вычислить, сколько тепла при этом выделилось, если двигатель работал при полной нагрузке.

По формуле (14)

$$\mathcal{Q} = Nt = 2 \cdot 3 = 6 \text{ кВтч},$$

что дает количество тепла

$$Q = 6 \cdot 860 = 5\,160 \text{ ккал}.$$

Это тепло в большей своей части пошло на нагревание резца и обрабатываемой детали; оставшая часть тепла воспринята окружающим воздухом.

Пример 6. Электрическим нагревательным прибором нагрели $4,3 \text{ кг}$ 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 (12) составляет:

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

что соответствует количеству электрической энергии

$$\mathcal{Q} = \frac{215}{860} = 0,25 \text{ кВтч}.$$

Отсюда мощность нагревательного прибора (учитывая, что 30 мин. = 0,5 часа) по формуле (15)

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

8. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

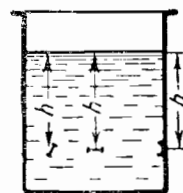
Налитая в какой-либо сосуд произвольной формы жидкость на любой глубине производит своим весом давление. Если в сосуде (фиг. 11) выбрать одинаковые площадки на одной глубине, то каковы бы ни были направление площадок и форма сосуда, давление на каждую из них может быть вычислено по формуле

$$p = h\gamma. \quad (16)$$

Здесь p — давление, производимое жидкостью;

h — высота от уровня жидкости;

γ — удельный вес жидкости.



Фиг. 11. Давление жидкости.

Например, если сосуд наполнен водой и высота его $h = 2 \text{ м}$, то давление воды на дно сосуда составляет:

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

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:

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

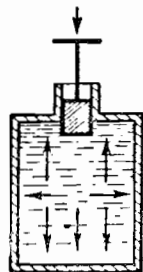
Если взять изогнутую (так называемую U-образную) трубку и налить в нее жидкость, то в обоих коленях

жидкость установится на одной и той же высоте (фиг. 12). С обеих сторон площадки AB жидкость будет давить на нее с одинаковой силой. Поэтому жидкость будет оставаться в покое и не будет переливаться из одного колена в другое. То же получится, если оба колена будут разных сечений (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



Фиг. 12. Сообщающиеся сосуды.



Фиг. 13. Передача давления жидкости во все стороны.

французским ученым Паскалем, родившимся в 1623 г. и умершим в 1662 г.

Представим себе сосуд, наполненный жидкостью (фиг. 13). Пусть в верхней крышке имеется отверстие со вставленным в него поршнем. Если при помощи этого поршня произвести на жидкость давление, например 2 кг/см^2 , то каждый квадратный сантиметр поверхности внутри жидкости испытывает дополнительное давление 2 кг .

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

$$p_{cm} = p_a + h\gamma.$$

Давление p_{cm} 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. 13), т. е. направленную вдоль движения, жидкость оказывает статическое давление. Если же расположить площадку b на том же уровне перпендикулярно движению жидкости, то она 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

$$p_{дин} = \gamma \frac{w^2}{2g}. \quad (17)$$

Здесь w — скорость движения, м/сек;

γ — удельный вес, кг/м³;

$g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ — ускорение силы тяжести;

$p_{дин}$ — динамическое давление, кг/м².

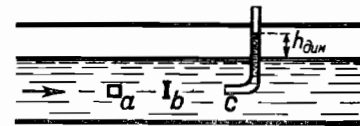
Наглядно динамическое давление можно показать (фиг. 14) при помощи трубки c , нижний конец которой отогнут и расположен против движения. В вертикальной части трубки уровень жидкости поднимается выше уровня жидкости в канале и добавочная высота как раз уравнивает динамическое давление, так что

$$p_{дин} = h_{дин} \gamma. \quad (18)$$

Такая трубка носит название трубки Пито и служит прибором для измерения скорости движения жидкости в канале; эту скорость легко определить по динамическому давлению, пользуясь формулами (18) и (17). Величина $h_{дин}$ называется динамическим напором жидкости.

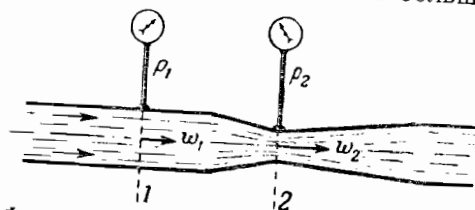
Полное давление на площадку b или в плоскости отверстия c трубки равно сумме статического и динамического давлений:

$$p_{полн} = p_{ст} + \frac{\gamma w^2}{2g}. \quad (19)$$



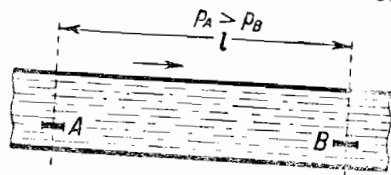
Фиг. 14. Динамический напор.

Если жидкость движется по трубопроводу, который в разных местах имеет различные сечения (фиг. 15), то скорость в узком сечении больше, чем в широком. Значит, и динамическое давление в узком сечении больше, как видно



Фиг. 15. Изменение динамического напора при изменении скорости.

из формулы (17). Опыт показывает, что в том и другом сечениях, если они расположены на одинаковом уровне, получается одно и то же полное давление, а следовательно, статическое давление (т. е. давление на стенку трубопро-



Фиг. 16. Падение давления при движении жидкости или газа по трубопроводу.

вода) в узком сечении меньше, чем в широком. Эта зависимость выражается формулой

$$p_1 + \gamma \frac{w_1^2}{2g} = p_2 + \gamma \frac{w_2^2}{2g}, \quad (20)$$

которая носит название уравнения Бернулли (1700—1788 гг.) по имени открывшего ее знаменитого ученого. 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. 16), то можно обнаружить, что статические, а следовательно, и полные давления даже на одном уровне (точки A и B) будут неодинаковы. Давление в точке A (p_A) больше, чем давление в точке B (p_B) на величину Δp , называемую падением давления. Происходит это вследствие трения жидкости о стенки и отдельных ее слоев между собой.

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

$$\Delta p = \zeta \frac{l}{d} \gamma \frac{w^2}{2g}. \quad (21)$$

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 вызывает 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, задвижках и т. д. К этой длине прибавляют фактическую длину трубопровода и для общей длины по формуле (21) подсчитывают полное падение давления на рассматриваемом участке. Этот метод одинаково применим как для жидкостей, так и для газообразных тел, если их удельный вес при течении мало изменяется.

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).

9. ПЕРЕХОД ТЕЛ ИЗ ОДНОГО АГРЕГАТНОГО 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 определена для одного и того же вещества. Отвердевание тел происходит при тех же температурах, что и плавление.

Для того чтобы твердое тело расплавить, его нужно сначала нагреть до температуры плавления. Сам процесс плавления также требует 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. 6 в конце книги), то общее количество тепла, требующееся для плавления 1 кг тела, составит:

$$Q = c(t_n - t_1) + m. \quad (22)$$

Пример 7. Свинец плавится при 327°C , а теплота плавления его 5 ккал/кг . Теплоемкость твердого свинца $c = 0,03 \text{ ккал/кг}$. Вычислить количество тепла, которое потребуется, чтобы расплавить $0,5 \text{ кг}$ свинца, имеющего температуру 27°C .

По формуле (22) на 1 кг потребуется затратить $Q = c(t_n - t_1) + m = 0,03(327 - 27) + 5 = 14 \text{ ккал/кг}$.

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 при вполне определенной температуре для одного и того же тела, но при разных температурах для разных веществ, причем в этом случае температура перехода в газообразное состояние зависит в сильной степени и от того, под каким давлением находится жидкость. Так, при давлении 1 ат вода переходит в пар при температуре около 100°C , а при давлении 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 1 ат для воды $r = 539 \text{ ккал/кг}$.

Нетрудно теперь подсчитать общее количество тепла, которое требуется затратить, чтобы 1 кг воды при температуре t превратить в пар. Если при заданном давлении температура кипения t_n , то это количество можно найти по формуле

$$Q = c(t_n - t) + r, \quad (23)$$

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

В табл. 7 в конце книги приведены значения температуры кипения и теплот парообразования для некоторых тел.

Пример 8. Определить количество тепла, необходимое для того, чтобы воду при $t = 80^\circ\text{C}$ и давлении $p = 20 \text{ ат}$ превратить в пар.

Из табл. 8 (в конце книги) находим, что при $p = 20 \text{ ат}$ $t_n = 211^\circ\text{C}$, $r = 452 \text{ ккал/кг}$. Отсюда по формуле (23) находим:

$$Q = c(t_n - t) + r = 1(211 - 80) + 452;$$

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

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

7. Какое различие существует между твердыми, жидкими и газообразными телами?
8. Что такое химическая реакция; какие типы реакций вы знаете?
9. Что такое атомный и молекулярный вес?
10. В чем заключается содержание закона Паскаля?
11. Назовите известные вам виды энергии.
12. В чем заключается содержание закона сохранения и превращения энергии? Приведите примеры преобразования энергии.
13. Чем отличается температура, измеренная по столбчатой шкале, от абсолютной температуры тела?
14. Что такое теплоемкость? Напишите формулу для вычисления количества тепла, идущего на нагревание тела?
15. Как подсчитать количество тепла, требующееся на превращение твердого тела в жидкое и жидкого в газообразное?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПРОРАБОТКИ

7. 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 ?

Ответ: $0,0124 \text{ м} = 12,4 \text{ мм}$.

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

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

Ответ: 450 ккал.

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

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

11. Сколько килограмметров работы надо совершить, чтобы полученным за счет этой работы теплом нагреть при атмосферном давлении до кипения 2 кг воды от начальной температуры 20°C ?

Ответ: 68 300 кгм.

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

Ответ: 8,9 л. с.

13. Электродвигатель потребляет 150 квтч энергии за 1,5 часа. Вычислить его мощность.

Ответ: 100 квт.

14. Двигатель мощностью 3 л. с. работает 5 час. Вычислить в киловатт-часах расход энергии при полной нагрузке двигателя.

Ответ: 11 квтч.

10. 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.

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 (точнее при $99,1^{\circ}\text{C}$); 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 он кипит при 35°C , если находится под давлением 1 ат. С другой стороны, газообразный эфир 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 паров 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; 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, водяной пар, окись углерода. Большое применение в теплоэнергетике имеет воздух; прежде всего он находит приме-

нение как тело, участвующее в процессе горения топлива, и как газ, подвергающийся сжатию в компрессорах.

Воздух представляет собой смесь различных газов. В основном воздух состоит из двух газов — кислорода и азота: первого — по весу 23,2%, по объему 21,0%; второго — по весу 76,8%, по объему — 79,0%. В тех или иных пропорциях к воздуху всегда бывают примешаны и другие газы; так, в воздухе присутствуют пары воды, углекислый газ и др.

Необходимый для горения топлива кислород берется из атмосферного воздуха.

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 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.

11. 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 изменений 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 на уровне океана приблизительно 760 мм (фиг. 17). Это значит, что атмосферный воздух, оказывающий давление на свободную поверхность ртути в чашке, своим давле-

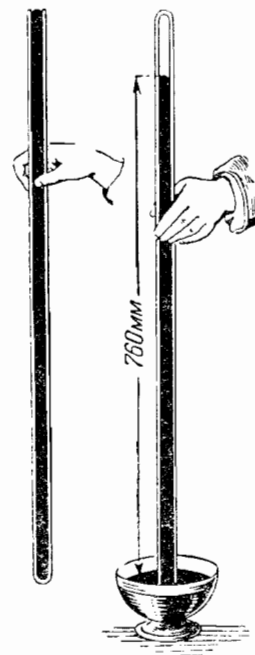
нием на уровне океана уравнивает давление ртутного столба высотой около 760 мм. При этом над ртутью в трубке будет пустота (точнее — пары ртути, давление которых ничтожно, и им пренебрегают).

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 0° С. 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.

Если взвесить вертикальный столб ртути высотой 760 мм при температуре ртути 0° С в трубке с площадью основания 1 см², то окажется, что вес его равен 1,033 кг; это значит, что нормальное давление равно 1,033 кг/см², а так как давление 1 кг/см² 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, поддерживает давление столба ртути высотой 735,6 мм при температуре ее 0° С.

Если бы вместо ртути была взята вода, которая в 13,6 раза легче ртути, то оказалось бы, что нормальное атмосферное давление равно давлению водяного столба высотой 10,33 м, а техническая атмосфера равна давлению водяного столба высотой 10 м.

Давление воздуха, окружающего землю, измеряют специальными приборами — барометрами. Простейший из них изображен на фиг. 18; по принципу действия он ничем не отличается от показанного на фиг. 17. Атмосферное давление называют также барометрическим.



Фиг. 17. Определение барометрического давления.

12. 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.

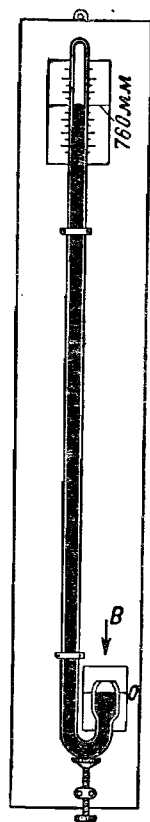
Состояние газа характеризуется рядом величин. Эти величины носят название параметров состояния. Давление газа есть одна из величин, характеризующих его состояние, т. е. один из параметров состояния газа.

Пусть в сосуде (фиг. 19) 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 расположена 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. Разность уровней в обоих коленях трубки показывает, что давление газа в сосуде больше,

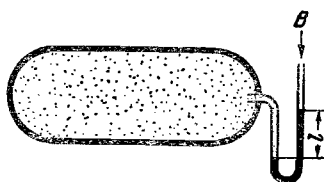
чем атмосферное, на величину давления столба жидкости высотой l . Иначе говоря, давление, измеряемое высотой столба жидкости l , представляет собой избыток давления газа в сосуде над давлением атмосферы,

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:

$$p_{абс} = p_{изб} + B. \quad (24)$$



Фиг. 18.
Ртутный
барометр.



Фиг. 19. Измерение избыточного давления в сосуде.

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 11 ат.

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

Манометр на фиг. 19, измеряющий давление, 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. 20, 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 уравновешивает 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 вакуумом, или разрежением. Если обозначить вакуум буквой h , то на основании сказанного ранее можно написать:

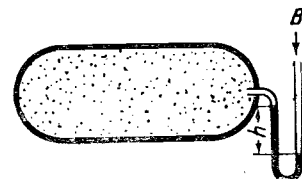
$$p_{абс} + h = B. \quad (25)$$

Иначе можно то же написать так:

$$p_{абс} = B - h. \quad (26)$$

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

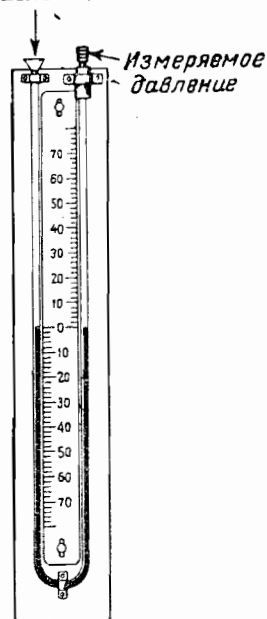
Итак, для того чтобы определить абсолютное давление газа в сосуде в том случае, если оно выше атмосферного, нужно к показанию манометра прибавить показание баро-



Фиг. 20. Измерение разрежения газа в сосуде.

метра. Если же давление газа в сосуде ниже атмосферного, то из показания барометра нужно вычесть показание вакуумметра.

Атмосферное
давление



Фиг. 21. Жидкостный манометр.

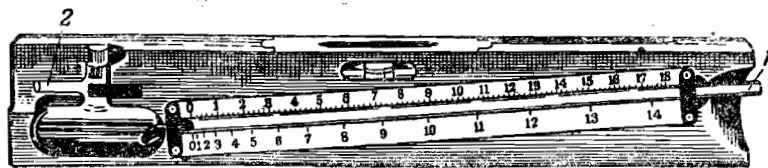
Необходимо при этом помнить, что

$$\begin{aligned} 1 \text{ ат} &= 735,6 \text{ мм рт. ст.}; \\ 1 \text{ ат} &= 10\,000 \text{ мм вод. ст.} = \\ &= 10 \text{ м вод. ст.} \end{aligned}$$

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 вакуума применяют жидкостные манометры (вакуумметры). Такой манометр (фиг. 21) 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. 19 и 20 показано



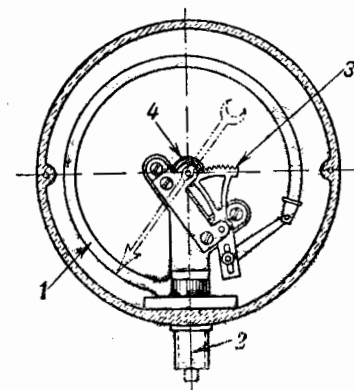
Фиг. 22. Тягомер с наклонной трубкой.

присоединение таких приборов к сосудам, в которых производится измерение давления.

Для измерения малых вакуумов с целью получения при измерениях большей точности одно из колен стеклянной трубки делают наклонным. Так большей частью поступают при изготовлении тягомеров, служащих для измерения разрежения в топках и дымоходах паровых котлов. Такие тягомеры (фиг. 22) заполняют спиртом, который подкрашивают для лучшей видимости. Трубку 1 присоединяют к измеряемому агрегату; трубка 2 открыта. Шкала, помещенная рядом с наклонной трубкой, большей частью построена так, что деления дают показания разрежения в мм вод. ст.

Если трубку 1 присоединить к месту, где давление газа меньше (разрежение в этом месте больше), а трубку 2 — 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. 23). 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 фигуре 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



Фиг. 23. Манометр с трубкой Бурдона.

давлением в котле и атмосферным, т. е. она будет находиться под действием избыточного давления. Это давление будет стремиться выпрямить трубку, 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.

Пример 9. 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 (26) находим, что абсолютное давление в конденсаторе составляет:

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

В технических атмосферах это составит:

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

Пример 10. 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 (26) составит:

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

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

$$p = 10 \text{ ата,}$$

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

$$p = 4 \text{ ати,}$$

то это значит, что избыточное давление равно 4 ат.

13. ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗА

Уже было указано, 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 (фиг. 24); движение поршня сдерживается положенным на него грузом. Начнем подводить к газу тепло; при нагревании он расширится и поднимет груз. Таким образом, при своем расширении газ совершит работу подъема груза, вследствие чего потенциальная энергия груза увеличится. Эта энергия (механическая) появилась за счет тепловой энергии, которая подводилась к газу.

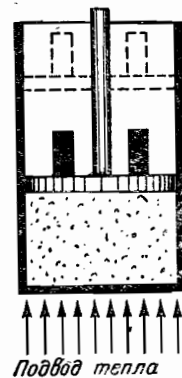
При нагревании газообразные тела дают наибольшее увеличение объема, поэтому они и являются самыми удобными рабочими телами в процессах преобразования энергии.

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 изменениями давления и удельного объема, используют так называемую *p-v*-диаграмму. Так ее называют потому, что в ней по оси

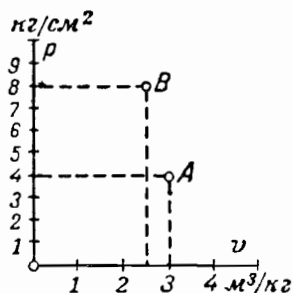


Подвод тепла

Фиг. 24. Преобразование тепловой энергии в механическую при нагревании газа в цилиндре с подвижным поршнем.

абсцисс откладывают значения удельного объема v , а по оси ординат — значения давления газа p . Покажем, как при помощи такой диаграммы изображаются состояние газа и процесс изменения состояния газа.

На фиг. 25 изображена p - v -диаграмма, что видно по буквам, стоящим около осей координат. Условимся относительно масштаба: пусть для удельных объемов отрезок



Фиг. 25. Графическое изображение состояния газообразного тела.

в 6 мм соответствует удельному объему $1 \text{ м}^3/\text{кг}$, а для давлений — отрезок в 3 мм — давлению $1 \text{ кг}/\text{см}^2$. Предположим, что состояние газа, которое мы желаем изобразить графически, характеризуется параметрами $v = 3 \text{ м}^3/\text{кг}$ и $p = 4 \text{ ат}$. На оси абсцисс находим точку, соответствующую $v = 3 \text{ м}^3/\text{кг}$, и восставляем в ней перпендикуляр; такой же перпендикуляр восставляем и к оси ординат в точке, соответствующей $p = 4 \text{ ат}$, т. е. $4 \text{ кг}/\text{см}^2$. Пересечение этих двух перпендикуляров дает

точку A , которая характеризует принадлежащими ей значениями $p = 4 \text{ ат}$ и $v = 3 \text{ м}^3/\text{кг}$ 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:

$$p = 8 \text{ ат};$$

$$v = 2,5 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

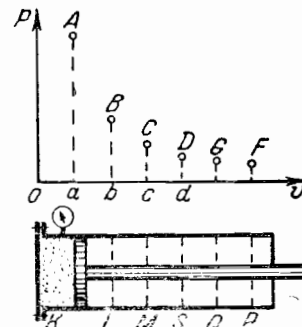
Итак, в p - v -диаграмме точка характеризует состояние газа.

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. 26). Расположим над цилиндром p - v -диаграмму. 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. 26 расположен горизонтально, так что высоту его мы считаем слева направо).

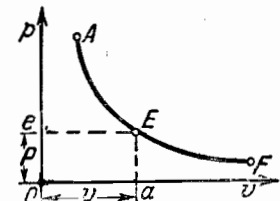
Таким образом, когда высота части цилиндра, в которой находится газ, равна, например, KL , то на диаграмме p - v объем цилиндра, а значит и удельный объем изображаются отрезком Ob ; объему с высотой KM соответствует отрезок Oc и т. д.

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. 27), и тогда линия AF будет показывать нам изменения давления при изменениях 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,



Фиг. 26. Изображение последовательных изменений состояния газа в цилиндре.

какое давление соответствует значению удельного объема, измеряемого отрезком Oa . Для этого в точке a восстанавливаем перпендикуляр aE до пересечения с кривой AF . Из точки пересечения E опускаем перпендикуляр на ось ординат; получим точку e . Теперь по числам, если они поставлены на оси ординат, мы можем определить искомое значение давления газа.



Фиг. 27. Графическое изображение изменения состояния газа.

В тех случаях, когда кривая AF должна только пояснить характер изменения параметров, а численные значения их не нужны, масштаб на осях координат не изображают; например, на фиг. 27, показана кривая, характеризующая процесс, без указания значений p и v на осях.

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

14. ПРОЦЕСС ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗА ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

Рассмотрим теперь наиболее важные процессы изменения состояния газа. В первую очередь посмотрим, что происходит с газом в том случае, когда к нему подводят или от него отводят тепло, не меняя его объема.

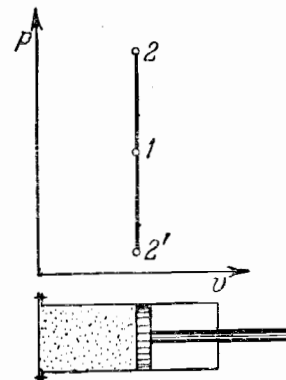
Предположим, что в цилиндре с поршнем находится газ (фиг. 28), и каким-либо образом поршень удерживается все время в одном и том же положении. Таким образом, газ как бы находится в закрытом баллоне.

Процесс нагревания или охлаждения газа в этом случае называется процессом изменения состояния при постоянном объеме; иначе он называется изохорным 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. Пока-

жем характер изменения состояния газа в диаграмме $p-v$ (фиг. 28).

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, как это делалось в § 13, то получится прямая линия, параллельная оси ординат; эта линия и будет характеризовать процесс изменения состояния газа при постоянном объеме. Она называется изохорой. В этом процессе в случае подвода тепла (нагревание) линия будет направлена вверх (в сторону увеличивающихся давлений), а в случае отвода тепла (охлаждение) — вниз. Таким образом, линия 1-2 изобразит процесс нагревания, линия же 1-2' изобразит процесс охлаждения газа при $v = \text{const}$.



Фиг. 28 Процесс изменения состояния газа при постоянном объеме ($v = \text{const}$).

Установлено, что давление при подводе или отводе тепла от газа в процессе $v = \text{const}$ изменяется прямо пропорционально абсолютной температуре, 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

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (27)$$

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 также 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 ат).

Особенность рассматриваемого процесса заключается в том, что газ при изменении 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 (такая смесь называется горючей смесью); когда такую смесь зажигают при помощи искры, 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 в этом случае происходит при $v = \text{const}$.

Количество тепла, которое тратится для нагревания или охлаждения газа в процессе с постоянным объемом, определяется по формулам, изложенным в § 7. 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 . Некоторые ее значения приведены в табл. 5 в конце книги.

Пример 11. 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 $t_1 = 350^\circ \text{C}$?

Прежде всего находим абсолютное давление в начале и конце процесса. Так как барометрическое давление точно не указано, считаем его равным 1 ат ($B = 1 \text{ ат}$). Таким образом, по формуле (24)

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

Находим начальную абсолютную температуру по формуле (9):

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

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 (27) во столько же раз должна вырасти и абсолютная температура, так что частное $\frac{T_2}{T_1}$ должно быть равно:

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

Вместо T_1 подставим его значение:

$$T_1 = 623^\circ \text{K};$$

получаем:

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

Отсюда находим T_2 :

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

Для того чтобы вычислить конечную температуру по столбчатой шкале, воспользуемся формулой (8); по ней находим:

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

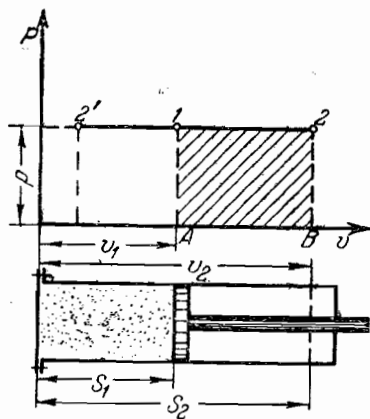
Таким образом, конечная температура газа $t_2 = 848^\circ \text{C}$.

15. ПРОЦЕСС ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

Пусть в цилиндре с поршнем находится газ, состояние которого характеризуется в диаграмме $p-v$ точкой 1 (фиг. 29). Начнем нагревать газ; при этом он будет расширяться, преодолевая давление p , под которым находится; если к штоку поршня присоединить какую-либо машину, например поршень насоса, то при расширении газ совершит работу, в данном случае — работу поднятия жидкости. При надлежащем подводе 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 изобарным процессом; обозначается он так: $p = \text{const}$. Так как давление газа в течение процесса не меняется, то в $p-v$ -диаграмме этот процесс изображается 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*.



Фиг. 29. Процесс изменения состояния газа при постоянном давлении ($p=\text{const}$).

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:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (28)$$

Зависимость (28) 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:

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (29)$$

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

$$w = p(v_2 - v_1). \quad (30)$$

Здесь буквой w (дубль вэ) 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 кг/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. 29 он изображен линией 1-2. Площадь под этой линией заштрихована; это прямоугольник 1-2-В-А-1 со сторонами: линия процесса 2-2, ось абсцисс и ординаты 1-А и 2-В, проходящие через начало (точка 1) и конец (точка 2) процесса. Площадь прямоугольника равна произведению основания на высоту. Здесь основанием прямоугольника является линия АВ; по чертежу видно, что она измеряет увеличение удельного объема газа при расширении, т. е.

$$AB = v_2 - v_1.$$

Высотой прямоугольника является отрезок, соответствующий давлению p ; таким образом, если площадь прямоугольника 1-2-В-А-1 обозначить буквой S , то

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

Сравнивая это выражение с формулой работы (30), 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 - v -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 про-

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 § 7; при этом нужно пользоваться теплоемкостью при постоянном давлении; ее обозначают c_p ; некоторые значения ее приведены в табл. 5. Укажем здесь, что всегда c_p больше c_v . Объясняется это следующим. Как уже известно, значение теплоемкости показывает, какое количество тепла нужно подвести к газу, чтобы поднять температуру 1 кг его 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 больше тепла было затрачено в первом случае и добавочное по сравнению с процессом $v = \text{const}$ тепло пошло на совершение работы. Значит, c_p больше 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 дизели, которые мы рассмотрим позднее.

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

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

Пример 12. Удельный вес газа в начальном состоянии $\gamma_1 = 0,5 \text{ кг/м}^3$, а температура $t_1 = 27^\circ \text{С}$. Вычислить, какой получится удельный вес газа γ_2 , если в процессе с постоянным давлением повысить его температуру до $t_2 = 190^\circ \text{С}$.

Вычислим абсолютную температуру газа в начальном и конечном состояниях по формуле (9):

$$T_1 = 273 + 27 = 300^\circ \text{К};$$

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

По формуле (29):

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}.$$

Подставляя сюда известные значения, получаем:

$$\frac{463}{300} = \frac{0,5}{\gamma_2}.$$

Первая дробь равна 1,54. Отсюда

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

а

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

Пример 13. Вычислить количество тепла, которое нужно подвести к 10 кг воздуха, чтобы повысить его температуру от $t_1 = 20^\circ \text{С}$ до $t_2 = 80^\circ \text{С}$ при постоянном давлении.

Искомое количество тепла найдется по формуле (12):

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

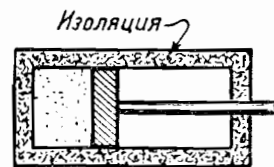
(в формуле индекс p при букве c указывает, что процесс нагревания происходит при постоянном давлении).

В табл. 5 находим для воздуха $c_p = 0,24 \text{ ккал/кг град}$. Подставляя в формулу (12) числовые значения, найдем:

$$Q = 10 \cdot 0,24 (80 - 20) = 144 \text{ ккал}.$$

16. АДИАБАТНЫЙ 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 от него не отводится тепло. Этого можно добиться, если тщательно изолировать стенки цилиндра и поршень материалами, не проводящими тепла (фиг. 30).



Фиг. 30. Расширение газа в цилиндре со стенками, покрытыми изоляцией.

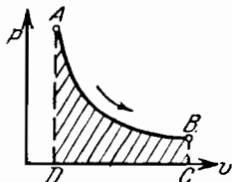
Процесс изменения состояния газа, при котором нет теплообмена между газом и внешней средой, называется адиабатным.

На фиг. 31 в $p-v$ -диаграмме кривая AB показывает, как изменяется давление газа при увеличении объема (расширение газа), если к газу при расширении не подводится и от него не отводится тепло. Иначе говоря, кривая AB ха-

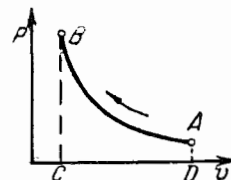
характеризует адиабатный процесс изменения состояния газа в p - v -диаграмме; она называется адиабатой. На фиг. 32 представлен обратный случай — адиабатный процесс сжатия газа.

При адиабатном 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 мы



Фиг. 31. Адиабатное расширение газа.



Фиг. 32. Адиабатное сжатие газа.

обнаружим такое превращение. Молекулы газа, заключенного в цилиндре, находятся в непрерывном движении. При расширении поршень цилиндра движется слева направо (фиг. 30). Движущиеся в том же направлении молекулы настигают поршень и при столкновении с ним отдают ему часть своей энергии; поэтому они отлетают от него после удара с меньшей скоростью. Энергия движения молекул составляет так называемую внутреннюю тепловую энергию газа. При понижении скорости молекул, происходящем вследствие отдачи молекулами их 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 адиабатном

процессе во время расширения газа понижается скорость молекул, то это значит, что температура его падает.

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

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

Работа газа здесь, как и в изобарном процессе, измеряется площадью под кривой, изображающей рассматриваемый процесс изменения состояния газа. На фиг. 31 эта работа измеряется заштрихованной площадью $ABCD$.

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

И при адиабатном процессе изменения состояния газа есть такой параметр состояния газа, который 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.

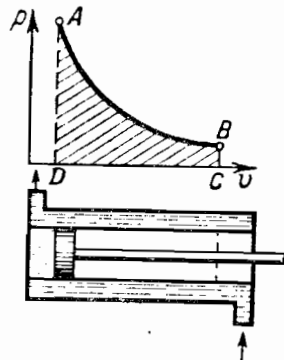
Тем не менее эта величина имеет большое значение в теплотехнике, так как она облегчает большой ряд расчетов.

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.

Адиабатный 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 к внешней среде проходит тепло, 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 адиабатными.

17. ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗА

Представим себе, что газ расширяется в цилиндре, устроенном так, что стенки его усиленно омываются водой (фиг. 33).



Фиг. 33. Изотермический процесс изменения состояния газа.

Если дать возможность газу расширяться, то он будет совершать работу; при этом, если не подводить к газу извне тепла, 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 охлаждаться и добиться, чтобы температура газа все время оставалась одинаковой, почти 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 почти равной температуре воды t . Таким образом, во время расширения тепло от воды

Если дать возможность газу расширяться, то он будет совершать работу; при этом, если не подводить к газу извне тепла, 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 охлаждаться и добиться, чтобы температура газа все время оставалась одинаковой, почти равной температуре воды. При этом от воды к газу будет передаваться тепло. При обратном движении поршня, т. е.

будет идти к газу, а во время сжатия, наоборот, — от газа к воде, хотя как во время расширения, 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 уменьшаться (фиг. 33), 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 удельный объем. И, наоборот, при изотермическом сжатии абсолютное давление газа увеличивается во столько раз, во сколько раз уменьшается его удельный объем; математически обе зависимости можно записать так:

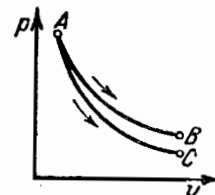
$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (31)$$

В этом соотношении буквами p_1 и v_1 обозначены значения давления и удельного объема в начальном состоянии, а p_2 и v_2 — значения давления и удельного объема в конце процесса.

Указанная здесь зависимость между изменениями давления и удельного объема носит название закона Бойля-Мариотта.

Если сравнить изменения давления в изотермическом и адиабатном процессах, то можно убедиться в том, что при адиабатном процессе давление падает быстрее, так как при нем тепло не подводится.

Если из точки A (фиг. 34) в p - v -диаграмме провести две линии, из которых одна (AB) характеризует падение давления в изотермическом процессе, а другая (AC) — в адиабатном, то адиабата AC пойдет ниже.



Фиг. 34. Относительное расположение изотермы и адиабаты (расширение).

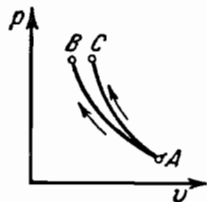
Это видно из следующей таблицы:

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
Адиабатный 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 .

Наоборот, при сжатии давление газа в адиабатном процессе растет быстрее, чем в изотермическом. Это видно из фиг. 35, где AC — адиабата, а 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. 33), то заштрихованная площадь $ABCD$ измеряет работу, совершенную газом. Эту площадь можно вычислить при помощи особых формул или измерить прибором, носящим название планиметра.



Фиг. 35. Относительное расположение изотермы и адиабаты (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 меньшей работы.

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

Пример 14. В компрессоре воздух изотермически сжимают таким образом, что объем его в конце становится равным одной трети первоначального объема; начальное абсолютное давление газа $p_1 = 0,98$ атм. Найти конечное давление газа p_2 .

Согласно формуле (31) и заданному условию

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{1}{3}.$$

Подставив сюда заданное значение $p_1 = 0,98$ атм, получим:

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

Из этого уравнения находим неизвестное значение делителя:

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

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

16. Как в p - v -диаграмме изображаются состояние газа и процесс изменения состояния газа?
17. Укажите отличительные признаки процесса при постоянном объеме. Как изменяются в этом случае параметры состояния газа?
18. То же сделайте для процессов $p = \text{const}$ и $t = \text{const}$.
19. Что такое адиабатный процесс и за счет чего в нем совершается работа?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПРОРАБОТКИ

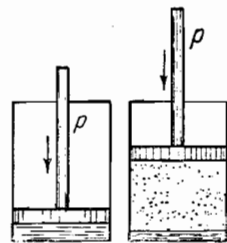
15. Избыточное давление в котле составляет 920 мм рт. ст. Выразить его в атм.
Ответ: 1,25 атм.
16. Разрежение в конденсаторе $h = 72$ см. Определить абсолютное давление в атм, если показание барометра $B = 780$ мм рт. ст.
Ответ: 0,0815 атм.
17. Показание манометра на паровом котле $p = 13$ атм. Определить абсолютное давление пара в котле.
Ответ: 14 атм.
18. 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 $p_1 = 0,5$ атм?
Ответ: $p_2 = 1,16$ атм.
19. 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 $G = 2,7$ кг.
Ответ: 109 ккал.
20. В воздушный подогреватель поступает в секунду $v = 20$ м³ 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 $p = \text{const}$.
Ответ: 39,5 м³.
21. 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.

22. Через воздушный подогреватель проходит за час $G = 3000$ 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 $p = \text{const}$.

18. 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.



Фиг. 36. Процесс парообразования.

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 и при меньших и при значительно больших, чем атмосферное, давлениях.

Пусть в цилиндре под поршнем находится 1 кг воды; поршень оказывает на воду давление p (фиг. 36). 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;

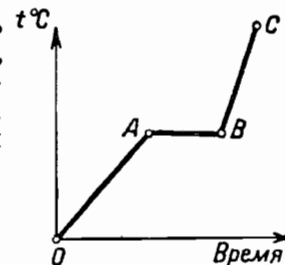
температура пара в это время будет такой же, как и в начале кипения.

Состояние пара под поршнем в присутствии кипящей воды характеризуется следующим: в занимаемом паром объеме при взятом давлении нельзя поместить ни больше, ни меньшее количество пара. И, действительно, если бы при этом давлении мы взяли несколько больший объем с большим количеством пара и попытались при постоянной температуре сжать этот объем до первоначального, то давление не увеличилось бы, как это наблюдается у идеального газа, а часть пара превратилась бы в жидкость, и мы пришли бы к первоначальному количеству пара в объеме. С другой стороны, если бы при том же давлении мы взяли немного меньший объем с меньшим количеством пара и при неизменной температуре увеличили объем до первоначального, то давление не уменьшилось бы, как это бывает у идеального газа, а часть воды превратилась бы в пар, и мы вновь пришли бы к первоначальному количеству пара в этом объеме. Если во взятом объеме при определенной температуре нельзя ни увеличить, ни уменьшить количество пара, то говорят, что пар «насыщает» то пространство, в котором он находится, а самый 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 **темпе-**



Фиг. 37. Ход изменения температуры по времени в процессе парообразования.

ратурой кипения, или температурой насыщения. Она обозначена буквой t с индексом n , т. е. t_n .

Температура кипения (насыщения) зависит от давления, под которым находится жидкость: чем выше давление, тем выше и температура насыщения. В табл. 8 в конце книги 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 представить в диаграмме, как с течением времени изменяются температуры при кипячении, то получится график, изображенный на фиг. 37. 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 § 31). 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 производстве (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 1 ккал 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*¹; измеряется оно в ккал/кг . На основании сказанного можно установить, что теплосодержание воды при какой-либо температуре численно равно этой температуре, т. е.

$$i = t. \quad (32)$$

Если, например, вода имеет температуру 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_n , обозначают буквой i со штрихом ($'$), т. е. i' . Следовательно,

$$i' = t_n. \quad (33)$$

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. 8, где в пятой вертикальной колонке можно найти значения теплосодержаний жидкости, нагретой до температур кипения, указанных во второй вертикальной колонке 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 , 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

$$q_p = i_2 - i_1. \quad (34)$$

¹ Иногда эту величину называют *энтальпией* — от греческого слова — нагревать.

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 на основании следующих соображений. Мы уже говорили, что для получения сухого насыщенного пара нужно нагреть воду до температуры кипения; после этого дальнейший подвод тепла не вызывает повышения температуры, а идет на превращение воды в пар той же температуры, что и получившаяся кипящая вода; при этом приходится подвести, как это было показано в § 9, 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 довести ее 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

$$i'' = i' + r. \quad (35)$$

Значения r для получения пара различных давлений приведены в табл. 8; в этой же таблице приведены 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/кг 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

$$i = i' + rx \text{ ккал/кг.} \quad (36)$$

Чтобы получить перегретый пар, необходимо, как это было ранее показано, подвести к сухому насыщенному пару дополнительное количество тепла; нетрудно подсчитать это количество, если известны теплоемкость пара и количество градусов, на которое этот пар перегрет. Проще, однако, определить теплосодержание перегретого пара по графикам или специальным таблицам. Об этом будет сказано в следующем параграфе.

19. ДИАГРАММА is ДЛЯ ВОДЯНОГО ПАРА

В § 16 было указано, что среди параметров состояния газа имеется параметр энтропия, значение которой в адиабатном процессе, т. е. при отсутствии теплообмена газ с внешней средой, остается постоянным. Если к газу подводят тепло, то энтропия его растет, а если тепло отнимают, энтропия газа уменьшается.

При помощи этой величины (энтропии) строится так называемая is -диаграмма, которая очень облегчает производство теплотехнических расчетов, особенно с водяным паром. Построение ее сводится к следующему. Берут две прямоугольные оси, как это делалось при построении pv -диаграммы. По оси абсцисс, т. е. на горизонтальной прямой, откладывают в определенном масштабе значения энтропии s (фиг. 38), а по оси ординат, т. е. на вертикальной прямой, — 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. Так же 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. 39), нужно знать величину вертикального отрезка AB ; соответствующие значения

iS-диаграмма для водяного пара
 Масштаб: $4 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} = 1 \text{ мм}$

Температура $t, ^\circ\text{C}$

Энтальпия $i, \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$

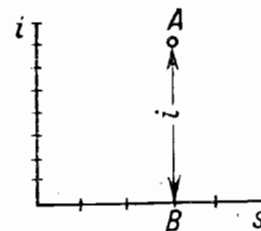
Энтропия $S, \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$

Давление $p, \text{атм}$

Качество x

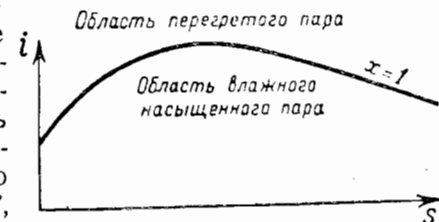
шем масштабе). В приводимой диаграмме имеются не все возможные состояния, а только те, которые наиболее часто применяют в теплотехнике, поэтому значения теплосодер-

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



The graph shows the current i versus voltage v for a diode. The curve is zero for $v < 0.7$ V and linear for $v > 0.7$ V. Points A, B, and C are marked on the linear portion of the curve. Point C is labeled 10mA.

Обратим прежде всего внимание на ряд сплошных линий, идущих по диаграмме из левого нижнего угла вправо вверх. Это — *изобары*, т. е. линии, каждая из которых изображает процесс изменения состояния при постоянном давлении. Каждая изобара имеет свое значение давления, которое на диаграмме написано в нескольких местах вдоль линии. На фиг. 40 изображена изобара 10 *ата*. Это значит, что точки *A, B, C*, как и другие точки той же линии, характеризуют пар, абсолютное давление которого составляет $p = 10 \text{ ата}$, но для каждой из этих точек значение теплосодержания разное.

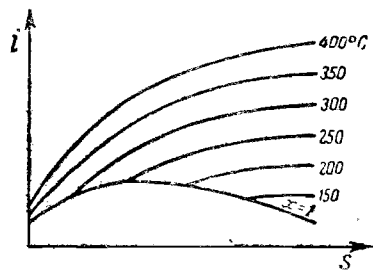


Фиг. 41. Верхняя пограничная кривая.

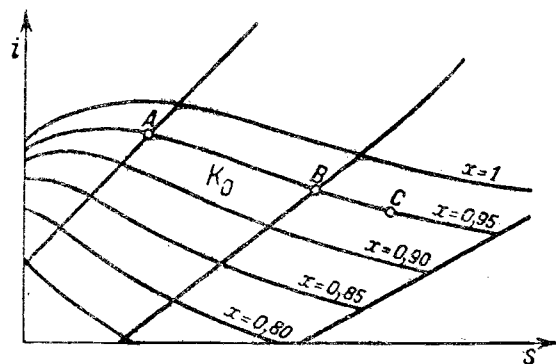
Далее, обратим внимание на жирную кривую линию, идущую приблизительно посредине диаграммы слева направо; около этой линии справа написано: $x = 1$. Отдельно на эскизе is -диаграммы эта линия приведена на фиг. 41. Каждая точка на этой кривой изображает состояние сухого насыщенного пара. Эта кривая называется верхней по-

граничной кривой. Уже ранее было сказано, что если нагревать сухой насыщенный пар, то он становится перегретым. Отсюда всякая точка, лежащая на i -диаграмме выше верхней пограничной кривой, изображает перегретый пар; всякая точка, лежащая 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 i -диаграммы имеются линии одинаковой температуры — *изотермы*. Они идут слева направо. Значения температур, соответствующих каждой изотерме, помечены около них. На эскизе i -диаграммы (фиг. 42) приведено несколько таких изотерм с принадлежащими им значениями температур.



Фиг. 42. Изотермы в i -диаграмме.



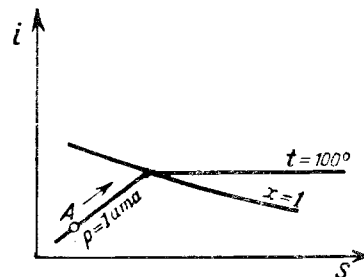
Фиг. 43. Линии одинаковой степени сухости.

В области влажного насыщенного пара имеется ряд изгибающихся кривых, проходящих слева направо. Некоторые из них показаны на эскизе (фиг. 43). Это — линии, характеризующие пар одной и той же степени сухости; значения степени сухости на некоторых из этих кривых написаны справа. Таким образом, если взять, например, точки

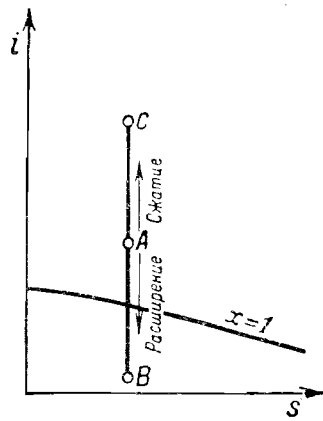
A , B , C , то каждая из них характеризует пар одной и той же степени сухости $x = 0,95$.

Для тех линий, для которых не указано значение x , его 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;



Фиг. 44. Определение температуры влажного пара в i -диаграмме.

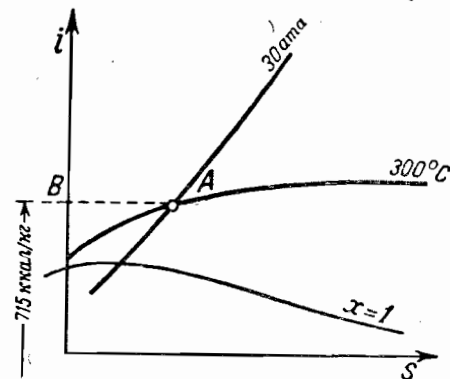


Фиг. 45. Адиабатный процесс в i -диаграмме.

поэтому если в процессе изменения состояния насыщенного пара не меняется давление, то не будет меняться и температура. Значит, если в области насыщенного пара в i -диаграмме задана какая-либо точка, например A (фиг. 44), и нужно найти значение температуры пара, характеризующего этой точкой, то следует 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: $t = 100^\circ \text{С}$.

Наконец, в i -диаграмме имеются *адиабаты*, т. е. линии, характеризующие процесс изменения состояния пара без подвода и отвода тепла. Ранее было сказано, что в адиабатном процессе энтропия остается постоянной, поэтому для того чтобы в i -диаграмме изобразить адиабатный процесс из какой-либо точки A (фиг. 45), 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 адиабатное сжатие, а от точки *A* до точки *B* вниз — адиабатное расширение, так как в первом случае давление все время возрастает, а во втором — уменьшается.



Фиг. 46. Определение параметров перегретого пара по *is*-диаграмме.

Адиабатный процесс (т. е. процесс $s = \text{const}$) имеет очень большое распространение в теплотехнических расчетах. Легкость изображения этого процесса в *is*-диаграмме (в виде прямой линии) показывает удобство применения понятия энтропии в этих расчетах.

Иногда на *is*-диаграмме бывают нанесены и *изохоры*, т. е. линии характеризующие процесс при постоянном объеме. Если таких линий нет, как на фиг. 38, то удельный объем влажного пара вычисляют по формуле

$$v = v'' x \quad (37)$$

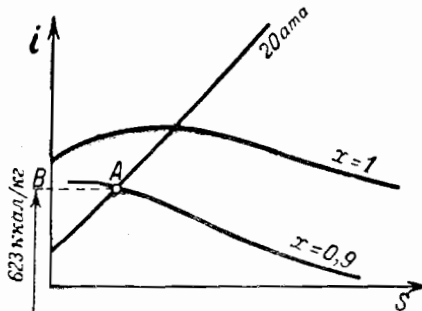
(значения v'' берут из табл. 8). В этой формуле v — искомый удельный объем влажного пара; v'' — удельный объем сухого насыщенного пара того же давления, что и искомый, а x — заданная степень сухости пара.

Значения удельных объемов перегретого пара берут из специальных таблиц.

Определим теперь при помощи *is*-диаграммы теплосодержание пара, характеризуемого следующими данными: давление $p = 30 \text{ атм}$ и температура $t = 300^\circ \text{C}$. Для этого найдем точку, которая характеризует заданное состояние в *is*-диаграмме. Она, очевидно, должна лежать на пересечении изобары 30 атм и изотермы 300°C (фиг. 46). Обозначим эту точку буквой *A*. Точка *A* лежит выше кривой сухого насыщенного пара, и это говорит о том, что пар в задан-

ном нам состоянии — перегретый. Для того чтобы определить его теплосодержание, надо опустить перпендикуляр на ось ординат, на которой отложены теплосодержания, т. е. провести пунктирную линию *AB* и узнать, какому значению теплосодержания соответствует точка *B*. По *is*-диаграмме определяем, что точке *B* соответствует теплосодержание 715 ккал/кг.

Рассмотрим далее вычисление параметров влажного насыщенного пара. Пусть требуется найти теплосодержание пара, характеризуемого параметрами $p = 20 \text{ атм}$ и $x = 0,9$. Для этого ищем на диаграмме точку, характеризующую этот пар; она лежит на пересечении изобары 20 атм и линии $x = 0,9$. На диаграмме это будет точка *A* (фиг. 47). Очевидно, она и характеризует состояние заданного пара, так как она одновременно лежит и на изобаре 20 атм и на 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.



Фиг. 47. Вычисление параметров состояния влажного пара по *is*-диаграмме.

Для вычисления удельного объема пользуемся формулой (37):

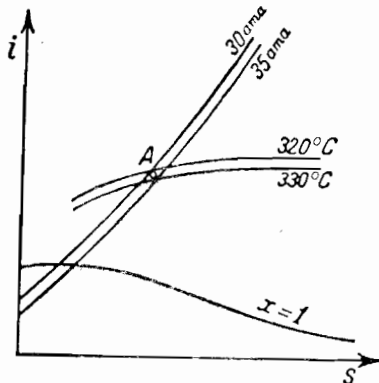
$$v = v'' x.$$

Из табл. 8 находим для заданного случая: $v'' = 0,198 \text{ м}^3/\text{кг}$. Подставляем в формулу (37) 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 атм; такой изобары на *is*-диаграмме нет. В этом случае нужно соответствующую линию мысленно провести приблизительно посредине между изобарами 20 и 25 атм. Далее, например, может быть задана температура

пара 345°C . Такой изотермы на i -с-диаграмме тоже нет; ее мысленно нужно провести на определенном расстоянии между изотермами 340 и 360°C . Если, например, задано состояние пара $p = 32 \text{ атa}$ и $t = 325^\circ\text{C}$, то точка на i -с-диаграмме будет лежать между изобарами 30 и 35 атa и изотермами 320 и 330°C . Очевидно, это будет точка A на фиг. 48.



Фиг. 48. Нахождение состояния пара при отсутствии в i -с-диаграмме кривых заданных параметров.

требуется знать физические свойства водяного пара высоких и сверхвысоких параметров. Решением этих научных проблем в СССР занимается ряд институтов и в первую очередь Всесоюзный теплотехнический институт имени Ф. Э. Дзержинского (ВТИ) и Московский энергетический институт имени В. М. Молотова (МЭИ).

В результате теоретических и экспериментальных работ обоими институтами выпущены таблицы термодинамических свойств водяного пара. Таблицы в той области, в которой пар используется в технике, мало расходятся между собой. Таблицы ВТИ основаны на результатах собственных многолетних экспериментальных работ по теплоемкостям и удельным объемам пара; таким образом, впервые в мировой науке в СССР получены надежные экспериментальные данные о свойствах водяного пара (ВТИ — Д. Л. Тимрот, Н. Б. Варгафтик; МЭИ — В. А. Кириллин, А. Е. Шейндлин) и изданы таблицы, а также i -с-диаграмма, охватывающие область высоких и сверхвысоких параметров, по пути использования которых развивается советская энергетика.

Пример 15. В подогреватель питательной воды поступает насыщенный пар при $p = 3 \text{ атa}$ и $x = 0,98$; отдавая свое тепло питательной воде, он из подогревателя выходит в виде воды при том же давлении и температуре $t = 80^\circ\text{C}$. 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 § 18 [формула (34)] 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 $p = 3 \text{ атa}$ и $x = 0,98$ и воды при $t = 80^\circ\text{C}$.

По i -с-диаграмме находим теплосодержание пара при $p = 3 \text{ атa}$ и $x = 0,98$. Оно равно $i_1 = 640 \text{ ккал/кг}$. Теплосодержание воды при 80°C 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 (2000 кг/час) отдает питательной воде

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

Пример 15а. Из барабана котла в перегреватель поступает пар при $p = 40 \text{ атa}$ и $x = 0,97$, а выходит из перегревателя пар при $p = 40 \text{ атa}$ и $t = 400^\circ\text{C}$. 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 § 18, количество тепла, которое пар получает в перегревателе, равно разности теплосодержаний. Найдём по i -с-диаграмме i_1 — теплосодержание пара при выходе из перегревателя. Оно составит:

$$i_1 = 769 \text{ ккал/кг.}$$

Далее, находим в i -с-диаграмме, что теплосодержание пара при поступлении в перегреватель, т. е. при $p = 40 \text{ атa}$ 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. Каково свойство насыщенного пара в отношении его температуры и давления? Какой пар называется насыщенным и какой перегретым?

21. Что измеряет степень сухости?

22. Какой пар называется сухим насыщенным и какой влажным насыщенным?

23. Что называется теплосодержанием пара?

24. На какие области состояний водяного пара делит верхняя пограничная кривая диаграмму is ?

25. Как найти в is -диаграмме температуру влажного насыщенного пара, состояние которого задано точкой?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПРОРАБОТКИ

23. Вода, находящаяся под давлением 20 *атм*, нагрета до 212° С. Наступило ли парообразование?

Ответ: Нет.

24. В цилиндре под поршнем находится вода. На поршень положен груз, который вместе с поршнем весит 150 *кг*. Площадь поршня 10 *см*². От внешнего источника к воде подводится тепло. Определить, при какой температуре начнется парообразование?

Ответ: $t = 200,4^\circ \text{С}$.

25. На паропроводе насыщенного пара манометр показывает 9 *атм*. Какова температура пара?

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

27. Найти теплосодержание пара с параметрами:

а) $p = 4 \text{ атм}$; $x = 0,95$;

б) $p = 20 \text{ атм}$; $t = 220^\circ \text{С}$.

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

$$p = 10 \text{ атм}; t = 240^\circ \text{С}.$$

29. Из перегревателя котла выходит пар при $p = 120 \text{ атм}$, $t = 500^\circ \text{С}$. Подсчитать количество тепла, которое получает 1 *кг* пара в перегревателе, если из барабана котла в перегреватель поступает пар при $x = 0,99$.

20. ПЕРВЫЙ ЗАКОН 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 природных запасов энергии в настоящее время больше всего используется химическая энергия топлива, которая в результате процесса горения превращается в тепловую энергию.

Механическая энергия получается в теплосиловых установках за счет тепловой энергии. 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 в. В России И. И. Ползунов в 1763 г. построил паровую машину, пригодную 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 явлений преобразования тепловой энергии в механическую и механической в тепловую были установлены два закона термодинамики, которым подчиняются эти явления. Наука о тепловой энергии и преобразовании ее в другие виды энергии носит название **термодинамики**; в этой книге будет идти речь о преобразованиях тепловой энергии в механическую в тепловых двигателях; теоретическая часть науки о таких преобразованиях называется **технической термодинамикой**.

Закон сохранения и превращения энергии устанавливает количественные соотношения между энергиями различных качеств. Выраженный в математическом виде, т. е. в виде уравнения, он называется **первым законом термодинамики**. Таким образом, по существу первый закон термодинамики — это иное название закона сохранения и превращения энергии.

Уже было установлено, что 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**; он обозначается буквой *E*. Таким образом,

$$E = 427 \text{ кгм/ккал}.$$

Обратно, если исчезает 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 по отношению к тепловой и механической энергии можно выразить так: *при взаимных превращениях определенному 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 16. Станок, потребляющий мощность 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 17. 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 совершено работы

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

Как видно из приведенного примера 17, в тех случаях когда к газу подводят тепло, оно частично идет на нагре-

вание 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 самым разнообразным. 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 U_2 . Тогда количество тепла, пошедшее на изменение внутренней энергии, будет $U_2 - U_1$; эту разность обозначают ΔU (здесь Δ — греческая буква «дельта»); таким образом,

$$U_2 - U_1 = \Delta U. \quad (38)$$

Обозначим количество работы, совершенной газом, буквой W ; для того чтобы сложить количества тепла, пошедшие на изменение внутренней энергии и совершение работы, надо обе величины выразить в одних и тех же единицах измерения. Изменение внутренней энергии обычно измеряют в килокалориях, а работу — в кгм; 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:

$$Q = \Delta U + AW. \quad (39)$$

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 (12), т. е.

$$\Delta U = Gc_n(t_2 - t_1). \quad (40)$$

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

21. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

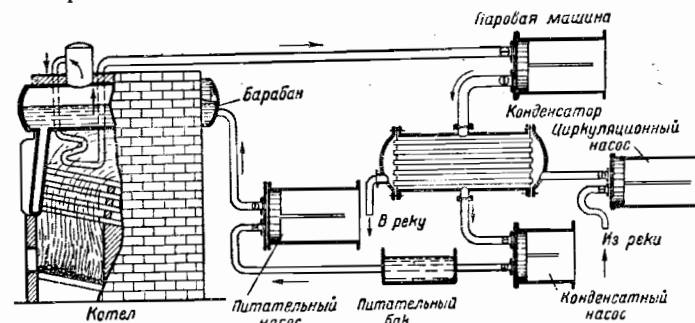
Первый закон термодинамики устанавливает только соотношения между количествами энергии разных видов при их взаимных превращениях; он ничего не говорит о том, каким путем можно добиться такого превращения и всегда ли это возможно. Эти вопросы решаются вторым законом термодинамики.

Наблюдения показывают, что между превращениями 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 трансмиссии или электродвигателя (механическая энергия вращения вала электродвигателя получается за счет электрической энергии, поступающей из сети в его обмотки). За счет большей части получаемой механической энергии станок 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 паровыми 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. 49. За счет сжигания топлива в котле получается водяной пар; по трубопроводу водяной пар направляется в цилиндр двигателя. В отличие от схемы, показанной на

фиг. 2, здесь двигателем служит паровая машина (см. дальше § 38).

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 по-



Фиг. 49. Схема паросиловой установки.

ложения в крайнее левое и выталкивает пар в конденсатор; здесь, охлаждая пар холодной водой, отнимают от него значительную долю тепла, и он превращается в воду (конденсат), которую при помощи насоса направляют сначала в питательный бак, а из него, тоже насосом, в паровой котел. Одновременно новая порция пара поступает в цилиндр паровой машины.

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 рабочее тело, выйдя из начального состояния, снова возвращается в это же состояние. При работе паровой машины происходит повторение таких циклов, вследствие чего она называется периодически действующей машиной. Это название надо понимать в том смысле, что машина работает по периодам (циклам), которые могут повторяться так долго, как это требуется, что и является важнейшим качеством такой

машины. Рассмотренная в § 1 схема теплосиловой установки отличается от изложенной здесь тем, что там двигатель был иной конструкции, а именно турбинного типа; однако и там выполняются основные условия работы двигателя — непрерывность действия и периодическое возвращение рабочего тела в первоначальное состояние. Вследствие этого, несмотря на конструктивное различие, двигатель турбинного типа также принадлежит к числу периодически действующих машин.

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 — горячие газы в котле); его называют теплоотдатчиком, а иногда верхним, или горячим, источником тепла. Пусть за некоторый промежуток времени рабочее тело получило Q_1 ккал тепла. 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. Тело, которому передано тепло Q_2 (в нашем случае — холодная вода в конденсаторе), называется теплоприемником, а иногда 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. Не вся эта энергия может быть получена с вала двигателя и использована; часть ее теряется. Здесь, однако, мы рассматриваем двигатель, не имеющий потерь механической энергии; такой двигатель называется *идеальным двигателем*.

Пусть, например, за один цикл рабочее тело получает из верхнего источника 100 ккал тепла, а 80 ккал отдает низшему источнику. Таким образом, исчезает в виде тепла 20 ккал. Согласно первому закону, если 1 ккал тепла преобразуется в механическую энергию, то за ее счет совер-

шается 427 кгм работы. Общее количество полученной механической энергии составит:

$$20 \cdot 427 = 8540 \text{ кгм.}$$

Естественно возникает вопрос, нельзя ли обойтись без передачи тепла холодному источнику, а вернуть рабочее тепло к первоначальному состоянию каким-либо другим путем, например, сжав отработавший пар до необходимого давления в компрессоре — машине, служащей для сжатия газообразных тел. Оказывается, что нельзя, так как на это пришлось бы затратить работы во всяком случае не меньше, чем ее было получено в двигателе, и в результате никакой полезной работы совершенно не было бы. Отнятие тепла в конденсаторе, при котором пар превращается в воду, приводит к тому, что расход энергии на возвращение рабочего тела в паровой котел становится минимальным, так как перекачка жидких тел насосом требует значительно меньшей работы.

Итак, *в периодически действующем двигателе 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 паровой 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 оно отдает его, источники должны иметь различные температуры; таким образом, *второй закон термодинамики устанавливает необходимость иметь перепад температур для преобразования тепловой энергии в механическую в периодически действующем двигателе*.

Зная количество тепла, подведенного к рабочему телу из верхнего источника (Q_1), и количество тепла, превращенного в механическую энергию ($Q_1 - Q_2$), можно оце-

нить 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“) с индексом t , т. е. η_t . Итак,

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (41)$$

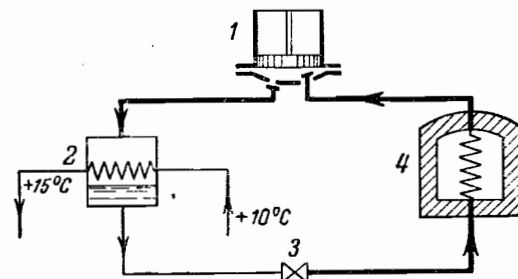
Таким образом, термический к. п. д. показывает долю тепла, перешедшего в механическую энергию в идеальном двигателе, из того количества, которое к рабочему телу было подведено от верхнего источника.

Второй закон термодинамики, установленный из наблюдений над работой теплосиловых установок, может быть обнаружен и на ряде других явлений. Среди них нужно отметить прежде всего широко применяемые в технике и быту холодильные установки; они служат для поддержания в помещениях или каких-либо устройствах температур ниже температуры окружающей нас среды. О таких установках говорят, что они служат для производства холода. В качестве рабочего тела чаще всего в них используются легко кипящие жидкости. Так они называются потому, что температура кипения их при атмосферном давлении ниже температуры окружающей среды. К числу таких жидкостей относятся аммиак, углекислый газ, фреон и т. д. Широко распространен среди них аммиак, который под атмосферным давлением кипит уже при температуре -35°C . С повышением давления, как известно, температура кипения повышается, и при давлении около 3 *ата* температура кипения аммиака -10°C , а при ~ 9 *ата* составляет 20°C . Из сравнения этих температур с температурами кипения воды можно убедиться, что для аммиака они значительно меньше.

Рассмотрим работу холодильной установки (фиг. 50) с рабочим телом аммиаком и выясним, в чем выражается в приложении к ней второй закон термодинамики.

Пусть в помещении 4 установлена температура воздуха -5°C , она в данном случае значительно ниже температуры окружающей среды. Для того чтобы поддерживать эту температуру в помещении, нужно от него непрерывно отводить тепло, которое через стены поступает в него из окружающей среды. Отвод этого тепла осуществляется следующим образом. Сухой насыщенный пар аммиака при давлении около 3 *ата* и соответствующей этому давлению температуре -10°C поступает в компрессор 1. Так называется машина, служащая для сжатия газообразных тел. Сжатие в компрессоре происходит за счет получаемой из электрической сети энергии, для чего вал компрессора

соединяется с валом электродвигателя. При ходе поршня вверх всасывающий (правый) клапан открывается и пары аммиака поступают в цилиндр компрессора. Когда поршень доходит до крайнего верхнего положения, всасывающий клапан закрывается, поршень же возвращается обратно и сжимает аммиак; давление и температура последнего повышаются; при этом получается перегретый пар аммиака. Когда давление доходит до заданного значения (в нашем случае около 9 *ата*) открывается выхлопной клапан и пары аммиака выходят из цилиндра компрессора; после этого выхлопной клапан закрывается, и цикл повторяется вновь. Выходящий из компрессора пар поступает в охлажда-



Фиг. 50. Схема холодильной установки.

датель (конденсатор) 2. Здесь змеевик, внутри которого проходит аммиак, омывается водой, взятой из какого-либо естественного источника — пруда, озера, реки, так что температура воды равна температуре окружающей среды. В охладителе температура аммиака падает до температуры насыщения при давлении 9 *ата*, т. е. до 20°C , а затем, при дальнейшем отнятии тепла, начинается конденсация аммиака. В результате получается жидкий аммиак ($x=0$) при давлении 9 *ата* и соответствующей этому давлению температуре кипения; в таком состоянии аммиак выходит из холодильника и поступает в редукционный вентиль 3. Здесь аммиак проходит через суженное отверстие; при этом происходит падение давления (в нашем случае до ~ 3 *ата*) и температуры, которая при давлении 3 *ата* составляет -10°C . Вследствие того что теплосодержание жидкого аммиака при 3 *ата* ниже, чем при 9 *ата*, выделившееся тепло идет на частичное испарение аммиака и из редукционного вентиля выходит жидкий аммиак с некоторой долей пара, при степени сухости около 0,1—0,12. В таком состоянии влажный насыщенный пар аммиака поступает в охлаждаемое помещение. Так как температура воздуха в этом помещении выше, чем температура аммиака ($-5 > -10$), то тепло от воздуха передается аммиаку; за счет этого тепла происходит испарение аммиака, и степень сухости его повышается (в нашем случае до $x=1$). В результате аммиак становится сухим насыщенным и в таком виде он поступает в компрессор; затем цикл повторяется. Так, тепло, поступающее в охлаждаемое помещение через стены, передается аммиаку, и температура в охлажденном помещении не будет повышаться.

Анализируя работу холодильной установки, мы устанавливаем, что в ней тепло, полученное аммиаком в охлаждаемом помещении при низкой температуре (-10°C), в дальнейшем передается в охладителе воде, имеющей более высокую температуру ($10-15^{\circ}\text{C}$). Из повседневного опыта мы знаем, что тепло „само по себе“, иначе говоря самопроизвольным (естественным) процессом, не может переходить от холодного тела к горячему, но то, что происходит в холодильной установке, не противоречит нашему повседневному опыту, так как здесь тепло переходит от тела с низкой температурой к телу с высокой температурой не самопроизвольным процессом, а благодаря работе компрессора, потребляющего механическую энергию. Таким образом, из повседневных наблюдений, подтверждаемых работой холодильной установки, можно установить: *теплота сама по себе не может переходить от тела с низкой температурой к телу с высокой температурой*. Это и есть другая формулировка второго закона термодинамики.

Установим общность двух приведенных формулировок.

Как и холодильная установка, периодически действующий двигатель предназначен для того, чтобы осуществлять процесс, который сам по себе, т. е. естественным путем, не может быть осуществлен. И, действительно, из повседневного опыта мы знаем, что механическая энергия путем трения переходит в тепловую. Этот процесс, как и переход тепла от горячего тела к холодному, — естественный, или самопроизвольный, процесс. А обратный процесс — переход тепловой энергии в механическую, осуществляемый в периодическом действующем двигателе, сам по себе не происходит; для его осуществления требуется часть тепла, и довольно значительную, передать холодному источнику, и только благодаря этому осуществляется в тепловой установке несамопроизвольный процесс перехода тепла в механическую энергию. Таким образом, второй закон термодинамики, хотя и выведенный из работы различных установок, в обоих случаях говорит о том, какие условия нужно соблюсти, чтобы получилась возможность проведения несамопроизвольных процессов, иначе говоря второй закон термодинамики утверждает, что естественные процессы сами по себе в обратном направлении идти не могут. Кратко эту мысль выражают так: *естественные процессы несобратимы*. Последнее утверждение и есть обобщающая формулировка второго закона термодинамики.

Говоря о двух рассмотренных установках, следует отметить, что происходящие в них процессы прямо противоположны друг к другу, так что холодильную установку можно рассматривать как обращенную теплосиловую установку.

И, действительно, в теплосиловой установке создается механическая энергия и это сопровождается переходом тепла от источника с высокой температурой к источнику с низкой температурой; в холодильной установке, наоборот, происходит переход тепла q_2 от источника с низкой температурой к источнику с высокой температурой и это сопровождается затратой механической энергии.

Итак, второй закон термодинамики устанавливает, что ряд явлений не может протекать самопроизвольно. Он вытекает из наблюдений над явлениями, происходящими в непосредственно окружающей нас природе, и только к таким явлениям закономерно его относить.

Реакционеры и служители религиозного культа, стоящие на позициях идеалистического мировоззрения, пытаются использовать второй закон термодинамики для „научного“ обоснования своих взглядов. течение мирового процесса (явлений во вселенной).

По их представлениям некий „дух“, как его называют — бог, в отдаленную эпоху „сотворил“ вселенную, а в дальнейшем, может быть не так скоро, будет „конец“ мира, т. е. смерть всей вселенной. Этим представлениям они пытаются обосновать вторым законом термодинамики. Их рассуждения сводятся к следующему. Все процессы во вселенной, говорят они, происходят так, что теплота сама по себе переходит от тел горячих к телам холодным, и температуры тел при этом выравниваются. Будет, значит, момент, когда все температуры в результате тепловых процессов сравняются и течение тепловых процессов прекратится. Это состояние вселенной они называют „тепловой смертью“ вселенной; по утверждению религии это и будет „конец“ мира. Очевидно, утверждают они, был когда-то момент, когда разность температур была максимальной; этот момент они называют „началом“ мира.

Эти пессимистические выводы о протекании мирового процесса (т. е. жизни вселенной) в одном направлении до сих пор используются идеалистической наукой капиталистических стран для утверждения своей реакционной идеологии. Материалистическая наука опровергает их рассмотрением явлений с точки зрения строения вещества.

Развитая рядом ученых, начиная с М. В. Ломоносова, молекулярно-кинетическая теория вещества показывает, что в изложенной формулировке второй закон термодинамики относится к телам, состоящим из громадного числа молекул, т. е. к таким, которые находятся в непосредственно окружающей нас природе, и не может быть распространена на всю вселенную, атмосфера в которой сильно разрежена, а температуры низки. Экспериментами и теоретическим путем доказано, что в телах, состоящих из небольшого числа молекул, возможно самопроизвольное протекание процессов, которые в телах с громадным числом молекул сами по себе не протекают. Таким образом, распространение второго закона термодинамики на всю вселенную незаконно.

Фридрих Энгельс по поводу утверждений о „тепловой смерти“ говорит: „Мы приходим, таким образом, к выводу, что излученная мировое пространство теплота должна иметь возможность каким-то путем, — путем, установление которого будет когда-то в будущем задачей естествознания, — превратиться в другую форму движения, в которой она может снова сосредоточиться и начать активно функционировать“¹.

Некоторые открытия последних лет дают основание полагать, что в далеких пространствах вселенной найдены явления, протекание которых не таково, как в окружающих нас телах, состоящих из громадного числа молекул. Таким образом, второй закон термодинамики имеет ограниченное распространение и не имеет, как говорят, абсолютного характера.

Что же касается утверждений о том, что мир якобы был когда-то „сотворен“, то они опровергаются советской космогонией — наукой изучающей происхождение и развитие небесных тел и их систем. Рук

¹ Ф. Энгельс, Диалектика природы, 1948, стр. 20.

водствуясь методами диалектического материализма, советские ученые на основании теоретических соображений и прямых наблюдений показали, что процессы звездообразования всегда имели место и продолжают в нашу эпоху. Таким образом, процессы во вселенной идут не от „начала“ к „концу“, а происходят и будут происходить вечно. Этими работами опровергаются утверждения ряда зарубежных ученых, проповедующих теорию одновременного возникновения звезд в определенную эпоху.

Возвращаясь к утверждению о неабсолютности второго закона термодинамики, надо тем не менее подчеркнуть, что в отношении явлений с телами, состоящими из громадного числа молекул, т. е. с такими, с которыми нам приходится иметь дело в быту и технике, достоверность его не подлежит сомнению; поэтому бесплодны всякие попытки построить машину, противоречащую второму закону термодинамики.

22. ЦИКЛ КАРНО

Когда не был еще широко известен закон сохранения и превращения энергии (первый закон термодинамики), делалось много попыток построить такой двигатель, который производил бы энергию «из ничего», т. е. двигатель, который вырабатывал бы механическую энергию, не потребляя при этом сам топлива или какой-либо другой энергии. Этот двигатель получил название вечный двигатель («перпетуум мобиле»). Когда закон сохранения и превращения энергии был окончательно утвержден, стало ясно, что вечный двигатель построен быть не может.

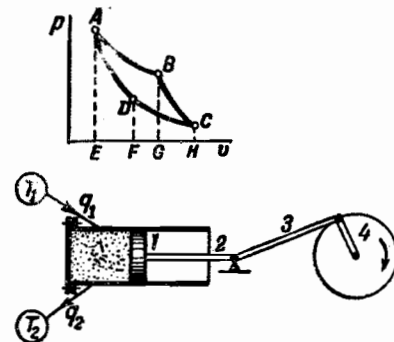
Были попытки и другого рода — создать такой двигатель, который превращал бы в механическую энергию все тепло, которое получено им из какого-либо источника, не отдавая при этом тепла другому источнику более низкой температуры. Такой двигатель позволил бы использовать огромные запасы тепловой энергии, например 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, а 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 энер-

гии. 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 Садн 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 максимальным; вместе с тем он показал, как определить термический к. п. д. такого цикла.

Цикл Карно состоит в следующем (фиг. 51). Пусть в цилиндре идеального двигателя под поршнем находится 1 кг рабочего тела. Верхний и нижний источники на фиг. 51 обозначены кружками. Пусть абсолютная температура верхнего источника будет T_1 , а нижнего T_2 . Сначала рабочее тело получает из верхнего источника тепло, так что температура газа все время остается равной температуре источника тепла T_1 ; иначе говоря, рабочее тело расширяется изотермически. Для наглядности представим изменение состояния рабочего тела в pV -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. Нужно предположить, что цилиндр в это время хорошо изолирован от обоих источников тепла и внешней среды и не обменивается с ними теплом. Линия BC в pV -диаграмме изображает адиабатное расширение рабочего тела: она идет вниз круче, чем AB . На этом расширение рабочего тела заканчивается. За время всего расширения — изотермического и адиабатного — рабочее тело совершило работу, измеряемую площадкой $ABCH$. Эта работа при помощи поршня 1, штока 2, шатуна 3 и кривошипа 4 передается на вал машины и приводит его во вращение. Для того чтобы



Фиг. 51. Цикл Карно

можно было повторить снова расширение рабочего тела, поршень нужно вернуть в прежнее положение. Теперь уже вал, вращаясь за счет работы, совершенной перед этим рабочим телом, будет через передачу 4, 3, 2 двигать поршень влево. При этом будет происходить 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 адиабатно (линия DA), для чего вал совершает 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 $ABCHAE$, а на сжатие затрачено валом количество работы, измеряемое меньшей площадью $ADCHEA$. Разность этих площадей равна площади $ABCD$, которая и представляет собой 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 (41). Однако это не обязательно. Как показал Карно, численное значение термического к. п. д. для предложенного им цикла можно подсчитать по абсолютным температурам источников, участвующих в цикле. А именно, значение термического к. п. д. цикла Карно можно получить по формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}; \quad (42)$$

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 име-

ла 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, $T_2 = 30 + 273 = 303^\circ \text{K}$.

Наибольшая температура рабочего тела (водяного пара), которая в настоящее время применяется, составляет около 550°C , т. е. для современных паросиловых установок можно считать $T_1 = 550 + 273 = 823^\circ \text{K}$. Если теперь подставить найденные значения в формулу (42), получим для цикла Карно в условиях паросиловых установок:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{303}{823} = 0,63.$$

Из приведенного расчета видно, что максимальная доля тепла, которая может быть превращена в работу в цикле Карно, для заданных температур составляет всего 63%.

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. больший, 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 рабочее тело выбрано — 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 адиабатные процессы. Кроме того, при работе двигатель имеет ряд неизбежных тепловых потерь — на излучение, пропуски пара, трение, которые также уменьшают долю тепла, могущую быть превращенной в работу. Поэтому к. п. д. в паросиловых установках, в которых вы-

рабатывается электрическая энергия, в действительности значительно, ниже, чем подсчитанный нами.

В дальнейшем будет показано, какие мероприятия проводят в советской теплоэнергетике для того, чтобы повысить использование тепла топлива.

23. 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 служит 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 телами помещается твердая стенка, хорошо проводящая тепло.

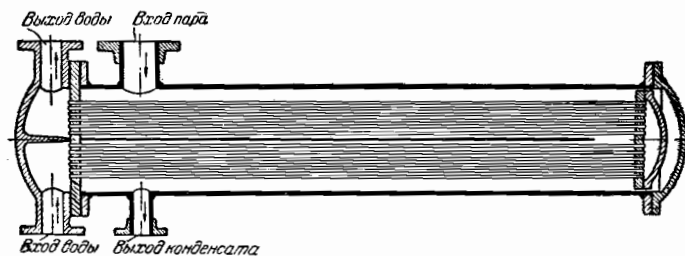
Иногда, наоборот, стремятся к тому, чтобы нагретое тело не отдавало своего тепла окружающей среде; так, трубы, по которым движется водяной пар, покрывают изоляцией из материалов, плохо проводящих тепло.

Аппараты, в которых производится нагревание одних тел другими через разделительную стенку, называются теплообменными аппаратами. Так, паровой котел — это сложный теплообменный аппарат, в котором тепло, выделяемое при сжигании топлива, передается воде и пару. 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, о котором говорилось при описании схем паросиловой и холодильной установок.

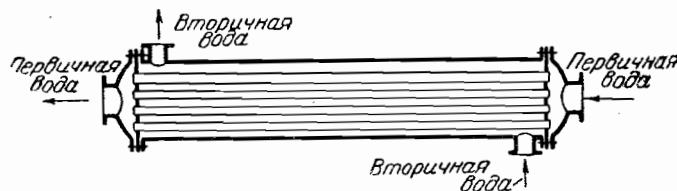
На фиг. 52 изображен подогреватель, служащий для нагревания воды паром. Вода поступает в нижнюю половину левой крышки и из нее в нижние ряды трубок. Дойдя

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. Греющий пар поступает в верхнюю часть аппарата и омывает трубки. Отдавая свое тепло



Фиг. 52. Пароводяной подогреватель.

ло 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



Фиг. 53. Водоводяной подогреватель.

греющим телом служит пар. Похожую конструкцию применяют и как водоводяной подогреватель, т. е. для тех случаев, когда греющим телом служит вода, а нагреваемым также вода.

Другой тип водоводяного подогревателя представлен на фиг. 53. Здесь первичная, т. е. греющая, вода движется внутри трубок, а вторичная (нагреваемая) — снаружи трубок. Направление и той и другой воды может быть изменено на обратное.

Простейшая конструкция теплообменного аппарата изображена на фиг. 54. Здесь одна труба расположена внутри другой. Вход и выход греющего и нагреваемого тел показаны на чертеже стрелками.

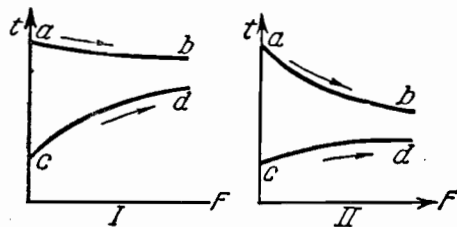
Направление движения греющего и нагреваемого тел имеет существенное значение; так, в теплообменном аппа-



Фиг. 54. Теплообменный аппарат („труба в трубе“) с параллельным током.

рате, изображенном на фиг. 54, греющее и нагреваемое тела движутся в одном направлении. Такой аппарат называется аппаратом с параллельным током, или с прямотоком.

Изобразим графически изменение температур греющей и нагреваемой жидкостей, например воды. По оси абсцисс

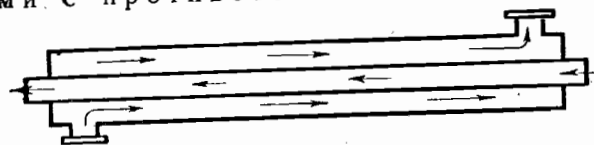


Фиг. 55. Ход изменения температур в теплообменном аппарате с параллельным током.

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. 55, 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 различаются случаи I и II на фиг. 55), но они всегда расположатся так, что нижняя кривая никогда не сольется с верхней, т. е. никогда в теплообменном аппарате с параллельным током температура вы-

ходящей нагреваемой воды не станет равной температуре выходящей греющей воды.

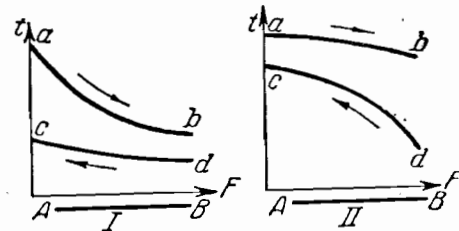
Чаще строятся такие теплообменные аппараты, греющая и нагреваемая жидкости которых движутся в противоположных направлениях. Такие аппараты называются аппаратами с противотоком. Если в теплообменном



Фиг. 56. Теплообменный аппарат с противотоком.

аппарате, изображенном на фиг. 54, поменять местами вход и выход нагреваемой воды, то получится теплообменный аппарат с противотоком, показанный на фиг. 56. Изобразим на графике изменения температур греющей и нагреваемой жидкостей. Попрежнему по оси абсцисс будем откладывать расстояния, пройденные водой, от входа в аппарат (фиг. 57). 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



Фиг. 57. Ход изменения температур в теплообменном аппарате с противотоком.

представит линиями ab и dc . Линия ab представляет собой падение температуры греющей воды, а линия dc — нагреваемой. Меняя количества той и другой воды, можно изменять в известных пределах температуры выходящей греющей и выходящей нагреваемой воды (этим и различаются случаи I и II на фиг. 57).

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 греющая жидкость, чего в аппарате с параллельным током получить нельзя.

Понять причину этого можно из рассмотрения фиг. 57. В аппарате с противотоком нагреваемая жидкость движется навстречу греющей; при этом она встречает по пути своего движения греющее тело все более и более высокой температуры. 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.

24. СПОСОБЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА

Рассмотрим подробнее процесс распространения тепла. Возьмем твердое тело и начнем его нагревать с одного конца (фиг. 58). Температура его в этом месте увеличится. Это будет означать, что молекулы в той части тела, где происходит нагревание, пришли в более энергичное колебание, чем в остальной. Сталкиваясь с соседними, молекулы нагреваемого конца твердого тела будут передавать им часть своей энергии.

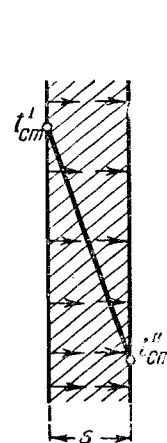
Фиг. 58. Распространение тепла в твердом теле (теплопроводность).

Так будет происходить передача тепловой энергии от более нагретой части тела к менее нагретой. Этот способ распространения тепла называется теплопроводностью. Он — единственный возможный способ распространения тепла в твердых телах.

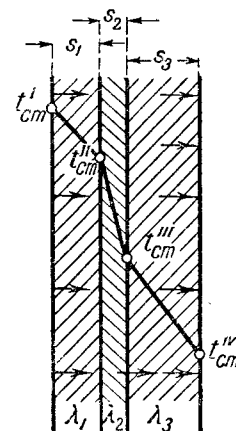
Количество тепла, которое передается в 1 час через поверхность 1 м² и толщиной 1 м при разности температур на крайних поверхностях этой стенки 1°C, называется коэффициентом теплопроводности. Он обозначается λ (греческая буква „лямбда“). Как показывает опыт, количество тепла Q , проходящее через стенку, будет прямо пропорционально времени τ , поверхности F стенки, разности крайних температур стенки $t_{cm}^I - t_{cm}^{II}$ (фиг. 59), обратно пропорционально толщине s

стенки и зависит от свойств материала стенки, что учитывается коэффициентом λ . Поэтому подсчитать количество тепла Q можно по формуле

$$Q = \lambda \frac{t_{cm}^I - t_{cm}^{II}}{s} F \tau \text{ ккал.} \quad (43)$$



Фиг. 59. Тепловой поток через однослойную плоскую стенку.



Фиг. 60. Тепловой поток через многослойную плоскую стенку.

Обычно расчет ведут на поверхность 1 м² за время 1 час. Получающееся при этом количество тепла q называют тепловым потоком и записывают так:

$$q = \frac{t_{cm}^I - t_{cm}^{II}}{\frac{s}{\lambda}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час.} \quad (43')$$

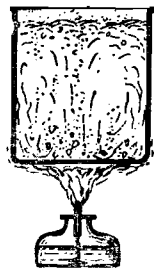
Стоящая в знаменателе дробь $\frac{s}{\lambda}$ называется термическим сопротивлением теплопроводности.

Если стенка многослойна, как показано на фиг. 60, то формула (43') сохраняет свой вид; термическое же сопротивление такой стенки вычисляется как сумма тер-

мических сопротивлений теплопроводности отдельных слоев, и формула принимает такой вид:

$$q = \frac{t_{cm}^I - t_{cm}^{II}}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час.} \quad (43'')$$

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 или слоями, без каких-либо завихрений. Такое движение называется параллельно-струйным, или ламинарным. Оно встречается 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.



Фиг. 61. Естественная конвекция в жидкости.

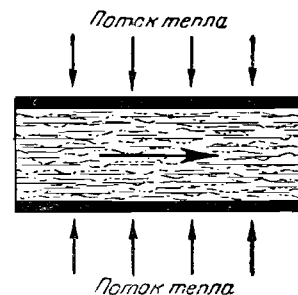
Пусть в сосуде находится вода и нагревание ее производится снизу (фиг. 61). Когда нижние слои воды нагреются, заключающаяся в них вода расширится и станет легче, чем вода в верхних слоях, температура которых ниже. Вследствие этого более тяжелые верхние слои начнут двигаться вниз, а более легкие — вверх. 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 батареи, 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. 62). 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 к средней части 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 ламинарное, 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 одних молекул к другим, т. е. в этом случае передача теплоты будет происходить, как и в твердых телах, теплопроводностью. Такая передача тепла гораздо слабее, чем при наличии конвекции.

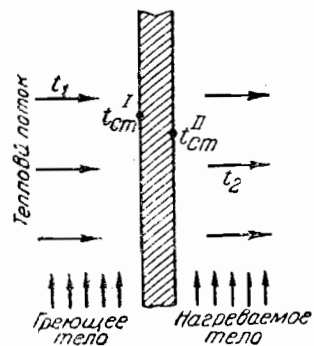


Фиг. 62. Вынужденная конвекция в жидкости.

25. ОСНОВНЫЕ СЛУЧАИ ТЕПЛООБМЕНА

Рассмотрим подробнее процесс передачи тепла от одного тела к другому через разделительную стенку. Такой случай представлен на фиг. 63. 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_{cm}^I , температуру поверхности стенки справа t_{cm}^{II} . Очевидно, что t_{cm}^I больше t_{cm}^{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 турбулентным, у самой стенки образуется очень незначительной толщины слой,



Фиг. 63. Теплопередача (теплообмен через разделительную стенку).

в котором жидкость движется ламинарно. Этот слой называется пограничным слоем жидкости. Вследствие перемешивания струек в центральной части потока температура здесь будет всюду почти одинакова; в пограничном же слое, где перемешивание отсутствует, падение температуры будет значительным.

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 1 час через поверхность, равную 1 м², при разности температур между греющим телом и стенкой 1° С.

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 1 час через поверхность, равную 1 м², при разности температур между греющим и нагреваемым телами 1° С.

Если общая поверхность, через которую передается тепло, есть F , средняя температура греющего тела t_1 , а средняя температура нагреваемого тела t_2 , то количество тепла, которое передается от греющего тела к нагреваемому, определится по формуле

$$Q = kF(t_1 - t_2) \text{ ккал/час.} \quad (44)$$

Когда требуется определить поверхность теплообменного аппарата для передачи определенного количества тепла, то пользуются формулой

$$F = \frac{Q}{k(t_1 - t_2)}. \quad (45)$$

При расчетах вместо $t_1 - t_2$ подставляют так называемую среднюю разность температур Δt_{cp} .

В случаях, когда температура той и другой жидкостей изменяется незначительно, для каждой жидкости можно взять среднюю арифметическую температуру; тогда

$$\Delta t_{cp} = \frac{t_1' + t_2'}{2} - \frac{t_1'' + t_2''}{2}; \quad (46)$$

здесь ' — значок, относящийся к первой жидкости, а '' — ко второй; значок 1 — начальная температура; 2 — конечная температура. Полученное значение Δt_{cp} называют средней арифметической разностью температур.

Если температура той или другой жидкости меняется значительно (точнее: если отношение большей разности температур жидкостей на концах теплообменного аппарата к меньшей больше двух), пользоваться формулой (46) не рекомендуется. В этом случае Δt_{cp} находится для теплообменных аппаратов с параллельным током и противотоком

по несколько более сложной формуле или по специальному графику. Найденное так значение $\Delta t_{ср}$ называется средней логарифмической разностью температур.

Подсчеты показывают, что для теплообменных аппаратов, работающих по принципу противотока, $\Delta t_{ср}$ 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 важно знать коэффициент теплопередачи.

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 s — толщину ее, то коэффициент теплопередачи k для плоской стенки определится по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ ккал/м}^2 \text{ час град.} \quad (47)$$

Для неплоской стенки (например, трубы) формула несколько сложнее, но часто и в этих случаях пользуются формулой (47), так как получающаяся разница невелика.

Значения коэффициента k для различных аппаратов в зависимости главным образом от того, какие рабочие тела применяются, сильно отличаются друг от друга. Например, для отопительной батареи, находящейся в помещении и служащей для нагрева воздуха в условиях естественной конвекции, $k = 5 \div 9 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}$; для пароводяного теплообменного аппарата, изображенного на фиг. 52, $k = 1000 \div 4000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}$. В кипятиль-

ных трубах паровых котлов низкого давления $k = 20 \div 60 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$.

Как видно из формулы (47), 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 и α_2 . Здесь недостаточно знать только свойства материалов, между которыми происходит теплообмен соприкосновением. Значения α зависят не только от этих свойств, но также от размеров и формы твердого тела и 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 (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 самыми различными. Это можно видеть по следующим приближительным значениям пределов α в $\text{ккал/м}^2 \text{ час град}$

для газов	5—200
• жидкостей	100—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.

При исследовании теплоотдачи большую помощь оказывает так называемая теория подобия, которая позволяет единичный опыт распространить на большую груп-

пу 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 здесь имеют дело в действительности, сложны и велики и постройка их для производства 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 эта теория достигла в XX в. Советская школа ученых, возглавляемая акад. 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 занимаются Энергетический институт Академии наук имени Г. М. Кржижановского, Всесоюзный теплотехнический институт имени Ф. Э. Дзержинского, Центральный котлотурбинный институт имени И. И. Ползунова и ряд других институтов и организаций.

Пример 18. 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 $\lambda = 35 \text{ ккал/м}^\circ \text{C}$; трубки имеют внутренний диаметр $d_1 = 18 \text{ мм}$, наружный диаметр $d_2 = 20 \text{ мм}$. Вычислить количество тепла, передаваемого нагреваемой воде, если коэффициент теплоотдачи от греющей воды к стенке можно принять $3000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}^\circ \text{C}$, а от стенки к нагреваемой жидкости $4000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}^\circ \text{C}$.

Вычислим предварительно коэффициент теплопередачи от греющей жидкости к нагреваемой. Рассчитываем поверхность нагрева как плоскую стенку. По формуле (47) имеем:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

В этой формуле $\alpha_1 = 3000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}^\circ \text{C}$;

$$\alpha_2 = 4000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}^\circ \text{C}.$$

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 (47):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{3000} + \frac{0,001}{35} + \frac{1}{4000}} = 1635 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}^\circ \text{C}.$$

Теперь можно найти и количество тепла Q . Для этого воспользуемся формулой (44):

$$Q = kF(t_1 - t_2).$$

Подставляя сюда значения величин, находим:

$$Q = 1635 \cdot 1,2 (120 - 80) = 78400 \text{ ккал/час}.$$

26. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ

Из изложенного в § 24 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 топki, 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 топki, 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.

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:

$$Q = CF \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ ккал/час.} \quad (48)$$

В этой формуле F — поверхность тела, измеренная в м^2 , а C — так называемый коэффициент излучения тела.

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 $0,1\text{--}0,3 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}^4$. Напротив, тела с шероховатой поверхностью (стальные трубы в котле, кирпичная кладка) сильно излу-

чают энергию; их коэффициент излучения $4 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}^4$ и выше, а для таких тел, бумага, некоторые краски, коэффициент излучения дает почти наибольшей возможной величины $4,9$, 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 м^2 кирпичной кладки при температуре $t = 727^\circ \text{C}$. По формуле (48) 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 вы-

ше, 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

26. Для чего применяют теплообменные аппараты? Назовите несколько примеров теплообменных аппаратов.

27. Какие типы теплообменных аппаратов различают по направлению движения греющей и нагреваемой жидкостей?

28. Какое различие существует между теплообменными аппаратами с параллельным током и противотоком по максимальной температуре, до которой можно нагреть жидкость в каждом из них?

29. Как распространяется тепло внутри тела?

30. Какое отличие в распространении тепла в твердом теле от распространения тепла в жидком и газообразном телах?

31. Опишите своими словами явления, носящие названия теплоотдача и теплопередача.

32. Что измеряет коэффициент теплоотдачи и коэффициент теплопередачи?

33. Какое движение называется ламинарным и турбулентным?

34. В чем сущность передачи тепла излучением?

35. Каким способом передается тепло от продуктов сгорания топлива к стенке котла?

36. Изложите своими словами содержание первого и второго законов термодинамики.

37. Какие машины называются „перпетуум мобиле первого и второго рода“ и почему их нельзя построить?

38. Как происходит изменение состояния рабочего тела в цикле Карно?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПРОРАБОТКИ

30. 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 и $\alpha_2 = 20$ ккал/м² час град; для стали $\lambda = 40$ ккал/м час град.

Ответ: 9,7 ккал/м² час град.

31. Для предыдущей задачи определить коэффициент теплопередачи, если по другую сторону стенки находится не воздух, а также вода, коэффициент теплоотдачи которой $\alpha_2 = 2000$ ккал/м² час град.

Ответ: 833 ккал/м² час град.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

КОТЕЛЬНЫЙ АГРЕГАТ

27. КОТЕЛЬНОЕ ТОПЛИВО И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Топливо — исходный продукт для получения электрической энергии на тепловых электрических станциях. Химическая реакция соединения горючих элементов топлива с кислородом воздуха сопровождается выделением тепла. При этом получаются газообразные продукты сгорания, которые и усваивают большую часть выделившегося при сгорании тепла. В дальнейшем это тепло подвергается последовательным преобразованиям с получением конечного продукта — электрической энергии.

Топливо может быть в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. На крупных электрических станциях в подавляющем числе случаев используются твердые топлива.

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 прежде всего знать его элементарный состав, т. е. знать, из каких элементов и в каком количестве состоит топливо. Элементарный состав топлива определяют в лаборатории. Приблизительные средние данные об элементарном составе топлив разных месторождений можно найти в таблицах, которые приводятся в справочниках.

Топливо, которое поступает в топку котла для сжигания, называют рабочим топливом.

Рабочее топливо состоит из следующих элементов: углерода (C), водорода (H), азота (N) и кислорода (O). Кроме этих элементов, образующих основную или, как говорят, органическую массу топлива, в него входят нежелательные примеси; к их числу относят-

ся сера (S), зола (A) и вода или 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 сверху ставят русскую букву *р*. Таким образом, состав рабочего топлива в процентах принято записывать так:

$$C^p + H^p + N^p + O^p + S^p + A^p + W^p = 100\%. \quad (49)$$

Горючими элементами в топливе являются углерод, водород и отчасти сера. От содержания углерода и водорода главным образом и зависит количество тепла, выделяющееся при сгорании 1 кг топлива.

W^p определяет общую влажность топлива; она делится на устойчивую (гигроскопическую) и неустойчивую. Неустойчивая влажность — это влажность, которая теряется топливом при естественной сушке на воздухе; остающаяся при этом в топливе вода определяет его устойчивую влажность. Общая влажность в топливе достигает иногда 60%. Для рационального сжигания топлива с большой влажностью применяют топки специальных конструкций.

Количество влаги в топливе зависит в сильной степени от условий хранения; поэтому часто состав сухого топлива также задают в процентах. В этом случае около названия каждого элемента ставят букву *с* и получают:

$$C^c + H^c + N^c + O^c + S^c + A^c = 100\%. \quad (50)$$

Если известен рабочий состав, то нетрудно определить и состав сухого топлива; для каждого элемента, например для углерода, пересчет производится по следующей простой формуле:

$$C^c = C^p \frac{100}{100 - W^p}. \quad (51)$$

Минеральные негорючие примеси в топливе (глинозем, известь и др.) образуют при горении золу, причем спекшиеся куски ее называются шлаком. Свойство золы плавиться, т. е. переходить в жидкое состояние при той или иной температуре, составляет важнейшую характеристику топлива, и с этим свойством считаются при проектировании топок и котлов. В зависимости от температуры плавления

золы определяют и тепловой режим в топке при горении топлива. Советские топлива, используемые на электростанциях, обладают сравнительно низкими температурами плавления золы, и это обстоятельство создавало большие трудности в процессе освоения этих топлив. Минеральные примеси в топливе иногда составляют до 50% на сухую массу.

Часто задают состав топлива без учета золы и влаги. Условно этот состав называют горючей массой, хотя входящие в этот состав кислород и азот не являются горючими элементами. Состав топлива на горючую массу обозначают буквой *г*. Этот состав записывают так:

$$C^g + H^g + N^g + O^g + S^g = 100\%. \quad (52)$$

Горючими элементами в топливе являются C, H и отчасти S.

Влага и зола нежелательны в топливе и составляют его балласт; к балласту относят и серу; большая часть серы топлива не участвует в горении. Образующийся при горении остальной части серы сернистый газ SO_2 вреден для металла котла и зеленых насаждений окружающей станцию местности.

Содержание углерода на горючую массу составляет в различных твердых топливах 50—95%, водорода 1—6%, серы 0—8%.

Если нагревать топливо без доступа воздуха, то из него выделяются газы и пары; они называются летучими составными частями топлива; после их выделения остается твердое вещество — кокс. Количество летучих определяют (без водяного пара) в процентах от веса на горючую массу и обозначают V^g . Количество летучих имеет существенное значение при проектировании топочных устройств и служит поэтому важной характеристикой топлива.

Характер кокса имеет существенное значение при решении вопроса, каким предприятиям направить тот или иной вид топлива.

Если топливо дает плотный спекающийся кокс, оно называется коксующимся топливом. Кокс требуется для выработки чугуна, и потому это топливо предоставляется только коксовым заводам для получения из них кокса. Электрическим станциям для сжигания под котлами выделяется преимущественно такое топливо, которое

в других предприятиях или технологических процессах не может быть использовано. Такое топливо называется энергетическим топливом. В громадном большинстве случаев это низкосортное топливо.

Важнейшей характеристикой топлива служит его теплота сгорания, или теплотворность¹, под которой разумеют количество тепла, которое выделяет 1 кг топлива при полном сгорании, т. е. при таком сгорании, при котором в продуктах сгорания не остается горючих элементов.

При сгорании топлива содержащаяся в нем вода 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 теплоту сгорания 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 выделившееся в результате горения количество тепла составляет высшую теплоту сгорания топлива. Если же продукты горения топлива имеют в своем составе водяной пар — газообразное тело, образовавшееся при горении за счет тепла, отнятого влагой, то выделившееся в результате горения тепло составляет низшую теплоту сгорания топлива. Очевидно, разница между высшей и низшей теплотой сгорания 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 теплоту сгорания. Для рабочего топлива ее обозначают Q_n^p .

¹ Иногда эта величина называется теплотворной способностью топлива.

В табл. 9 приведены данные о теплоте сгорания некоторых топлив.

Теплота сгорания определяется в лаборатории на основании опытных данных, полученных при помощи прибора, который называется калориметрической бомбой. Однако теплоту сгорания можно также вычислить. Формула для определения теплоты сгорания составлена крупнейшим русским химиком Д. И. Менделеевым на основании тщательного изучения различных топлив. Для определения низшей теплоты сгорания рабочего топлива нужно знать состав его. Формула имеет следующий вид:

$$Q_n^p = 81 C^p + 246 H^p - 26(O^p - S^p) - 6W^p \text{ ккал/кг.} \quad (53)$$

Ранее было сказано, что влажность топлива зависит от условий хранения его и при одном и том же составе сухого топлива может быть различной. В зависимости от этого будет меняться и теплота сгорания рабочего топлива. Иногда теплота сгорания задается для сухого топлива. В этом случае для рабочего топлива при той или иной влажности теплота сгорания определяется по следующей формуле:

$$Q_n^p = Q_n^c \frac{100 - W^p}{100} - 6W^p \text{ ккал/кг.} \quad (54)$$

К твердым топливам относятся древесина, торф, бурый уголь, каменный уголь, антрацит. Эти виды топлива связаны между собой тем, что в основе их лежит одно и то же вещество — клетчатка¹ (растительность). Превращение одного вида топлива в другой происходило в результате химических процессов в течение многих веков, так что перечисленные виды топлив различаются, как говорят, своим геологическим возрастом. Наиболее молодое топливо в перечисленном виде — древесина, наиболее старое — антрацит. В нижеследующей таблице приведена характеристика топлив с указанием наиболее характерных качеств их. Как видно, в течение геологического старения топлив уменьшался процент летучих. С другой стороны, антрацит — наиболее старое топливо — содержит

¹ К твердым топливам относятся и сланцы, однако по происхождению они не входят в перечисленные виды твердых топлив.

наибольший процент углерода; таким образом, процесс старения топлива сопровождается его обуглероживанием.

Род топлива	V^2	Характеристика кокса	A^c	W^p	Q_n^p ккал/кг
Древесина . .	85	Рыхлый	1	40	2 450
Торф	70	Порошкообразный	11	40÷50	2 000—2 600
Бурый уголь .	30—60	То же	15—35	20÷40	2 500—4 200
Каменный уголь	8÷50	Разнообразный	10—25	5÷12	5 000—6 800
Антрацит . . .	3÷7	Порошкообразный	15—20	6÷7	5 000—6 000

Здесь перечислены только виды твердого топлива; в качестве топлива в редких случаях используют также жидкое топливо, например мазут — остаточный продукт переработки нефти и газообразное топливо — естественный газ и газ, получающийся в качестве отхода какого-либо производства.

Работу отдельных агрегатов или тепловых электрических станций часто оценивают расходом топлива на единицу продукции агрегата или станции; например, для характеристики работы котла указывают расход топлива на производство 1 т пара, для работы станции — расход топлива на 1 квтч. Однако такие показатели не могут быть использованы для сравнения между собой работы агрегатов и станций, если теплота сгорания потребляемых ими топлив разная. Для возможности такого сравнения вводится понятие условного топлива, под которым понимают топливо с теплотой сгорания 7 000 ккал/кг, и все показатели выражают расходом такого условного топлива на единицу продукции.

Расход условного топлива по известному расходу действительного топлива и его теплоте сгорания можно получить по формуле

$$B_{усл} = \frac{B_d Q_n^p}{7\,000}; \quad (55)$$

здесь B_d — расход действительного топлива;

$B_{усл}$ — расход условного топлива.

В числителе, очевидно, стоит количество тепла, выделившееся при горении B_d кг топлива; при делении на 7 000 получается количество условного топлива, соответствующее количеству сожженного топлива B_d .

28. ТОПЛИВНАЯ ПОЛИТИКА И ТОПЛИВНЫЕ РЕСУРСЫ СССР

С точки зрения интересов народного хозяйства важно разделять топлива на местные и дальнепривозные.

К местным топливам относят топлива, которые экономически невыгодно или нецелесообразно перевозить на дальние расстояния. К числу таких топлив относятся в первую очередь низкосортные топлива, обладающие значительным балластом и низкой теплотой сгорания, и во вторую очередь — такие, запасы которых ограничены и их достаточно только для удовлетворения местных нужд промышленности.

Наряду с этим для тех или иных отраслей промышленности используются и дальнепривозные топлива, добываемые в крупных угольных бассейнах и доставляемые на большие расстояния к месту потребления железнодорожным и водным путями.

Местное топливо имеется во всех районах Советского Союза, например: в Белоруссии, Литве, Латвии, на севере РСФСР, в Сибири и в центральной части РСФСР — залежи бурых углей, в Ленинградской области, на Волге, в Эстонии — залежи сланцев.

Развитие добычи и использования местных топлив имеет громадное народнохозяйственное значение, так как освобождает железные дороги от перевозок топлива на большие расстояния и способствует экономическому развитию района добычи топлива. Вместе с тем развитие добычи местных топлив имеет оборонное значение. Царская Россия крайне медленно развивала добычу местных топлив, а электростанции работали целиком на привозном высококалорийном топливе — нефти, донецком и импортном угле; при этом сжигание высокосортных углей определялось не какими-либо экономическими соображениями, выгодами для народного хозяйства страны, а политикой владевших донецким углем и кавказской нефтью монополистических

объединений, акции которых по большей части находились в иностранных руках.

Топливная политика СССР в корне отличается от топливной политики дореволюционной России и капиталистических стран. Уже в самых первых указаниях по экономическому развитию страны делался упор на использование «непервоклассных» сортов топлив (см. § 2). Эта установка была положена в основание плана ГОЭЛРО. Эта же задача использования местных топлив занимает видное место в директивах партии и правительства по всем пятилетним планам развития народного хозяйства страны.

В 1948 г. только 18% электроэнергии было выработано на дальнепривозном топливе; вся остальная электроэнергия была выработана на гидростанциях (17%) и тепловых электростанциях за счет использования местных топлив (бурый уголь, торф, антрацитовый штыб — мелкий уголь, получающийся в процессе добычи антрацита — и др.).

Оборонное значение развития добычи местных топлив особенно сказалось во время Великой Отечественной войны, когда донецкий угольный бассейн был временно оккупирован врагом, а связь с местами добычи нефти на Кавказе оказалась затрудненной, электростанции не оказались без топлива, так как работали на местных топливах; потребители же дальнепривозного угля были переведены на снабжение другими угольными бассейнами.

Задача развития добычи и использования местных топлив остается основным содержанием топливной политики и в настоящее время. В директивах по пятому пятилетнему плану СССР на 1951—1955 гг. говорится:

«Обеспечить рост за пятилетие добычи торфа на 27 процентов, а также предусмотреть дальнейшее развитие добычи местных углей...»

Политика угольных и нефтяных объединений царской России, сводившаяся к использованию только высокоценных видов топлива, привела к тому, что, несмотря на наличие громадных залежей топлива, страна не выходила из тисков угольного голода и ввозила уголь из-за границы во все возрастающих количествах. Известно, что Петербург снабжался кардифским углем (Англия). При этом распространялось утверждение, что Россия бедна топливом.

Проведенные при Советской власти работы по разведке топливных месторождений в корне опровергли утверждение о недостаточности топливных ресурсов страны. Советский Союз обладает громадными топливными ресурсами, которые могут обеспечить бурное развитие промышленности, и результаты индустриализации страны в годы уже выполненных пятилетних планов развития страны это доказали самым убедительным образом. По данным Международного геологического конгресса 1937 г. Советский Союз занимал 2-е место в мире по запасам ископаемых углей, а по запасам нефти и торфа и количеству лесов — 1-е место.

В последующие годы разведывательные работы продолжались, и в стране обнаружены новые месторождения всех видов топлива (угля, нефти, газа).

В 1913 г. ископаемых углей было добыто по всем районам России 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.

Уже в годы первой пятилетки Советский Союз вышел на 1-е место в мире по добыче торфа, использованию его на электростанциях, технике его сжигания и добычи. Уже тогда получил широкое развитие гидравлический метод массовой добычи торфа, разработанный Р. Э. Классоном, по имени которого названа первая крупная торфяная электростанция «Электропередача». В 1928 г. вводится новый метод механизации добычи торфа, предложенный советским инженером М. Н. Карелиным — фрезерный способ, заключающийся в том, что залежь торфа вспахивается особыми фрезами на глубину около 100 мм. Фрезы передвигаются тракторами.

Темпы роста промышленного производства и потребления топлива показаны на фиг. 64.

Пятый пятилетний план развития народного хозяйства страны на 1951—1955 гг. ставит новые почетные задачи развития угледобычи: по отношению к 1950 г. добыча угля в 1955 г. должна возрасти на 43%, нефти — на 85%. При этом качество угля должно быть улучшено.

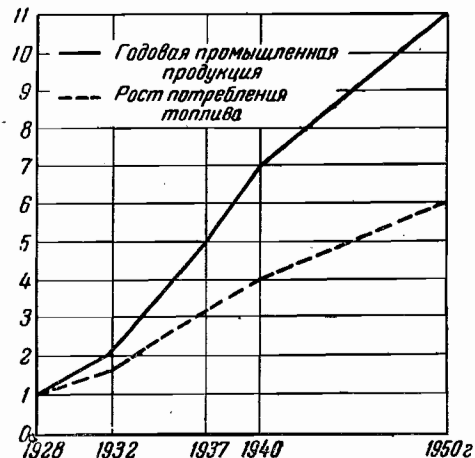
В речи на предвыборном собрании избирателей Сталинского избирательного округа в феврале 1946 г.

И. В. Сталин, ставя задачи на длительный период, сказал¹:

«Нам нужно добиться того, чтобы наша промышленность могла производить ежегодно... до 500 миллионов тонн угля, до 60 миллионов тонн нефти».

В 1953 г. добыча угля достигла 320 млн. т, нефти — 52 млн. т.

Царская Россия имела одну топливную базу — Донецкий каменноугольный бассейн. В настоящее время Совет-



Фиг. 64. Темпы роста промышленного производства и потребления топлива.

ский Союз обладает, кроме Донецкого, рядом мощно развитых угольных бассейнов, приобретших в силу своего развития значение общесоюзных и межрайонных. Сюда относятся Кузнецкий (в Сибири), Карагандинский (в Казахстане), Печорский (на севере РСФСР) и Черемховский (в Сибири) каменноугольные бассейны.

Одновременно с развитием добычи и использования местных топлив в СССР ставится и решается задача развития добычи и использования дальнепривозных топлив

¹ И. В. Сталин, Речи на предвыборных собраниях избирателей Сталинского избирательного округа г. Москвы, Госполитиздат, 1953, стр. 22—23.

с баз межрайонного и союзного значения. Эта задача обусловлена тем, что местное топливо, во-первых, часто не удовлетворяет потребностей в топливе данного района и, во-вторых, местные топлива, большей частью низкосортные, не могут удовлетворить ряда потребителей, предъявляющих требования на высокосортные угли и угли, обладающие специальными качествами. Сюда относятся железные дороги как потребитель топлива, металлургия, газовая промышленность, коммунальные потребители. Таким образом, плановое социалистическое хозяйство страны базируется на топливной политике, которая исходит из необходимости развития добычи как местного, так и дальнепривозного топлива.

В последнее десятилетие сильно возросла добыча естественного газа, большие запасы которого имеются в районе Средней Волги и на Западной Украине, а также развилось получение газа из твердого топлива.

Газообразное топливо имеет существенные преимущества перед другими. Его легко транспортировать по трубам, 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 выгодной 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. приступили 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 Кокшетау — Ленинград, в 1952 г. — газопровод Кокшетау — Таллин. Последние два газопровода базируются на переработке сланцев в газ. Имеются данные о наличии залежей газа и в других местах Советского Союза.

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 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 угля. 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. по решению партии и правительства приступили к реализации этой идеи. Великий смысл ее, как указывали Д. И. Менделеев и В. И. Ленин, 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.

Газ в первую очередь рассматривается как топливо для удовлетворения бытовых нужд, так как использование его в этом направлении представляет большие удобства и является одним из мощных рычагов улучшения быта трудящихся.

Нефть — ценное сырье для получения самых разнообразных продуктов. В сыром виде нефть в СССР не сжигается, а отправляется на нефтеперерабатывающие заводы. Так как нефть служит исходным сырьем для получения жидких топлив, используемых в авиации, она имеет весьма большое оборонное значение и представляет собой важное стратегическое сырье. Как было отмечено, по запасам нефти СССР стоит на первом месте в мире. Старые месторождения нефти находятся преимущественно на Кавказе; в годы Советской власти открыты громадные залежи нефти и в других местах Советского Союза и главным образом на громадном пространстве между Уралом и Волгой, которые по своему значению приравниваются к месторождениям на Кавказе и потому получили название «Второе Баку». Богатые залежи нефти имеются в Западной Украине, на Сахалине и в Средней Азии.

В последние годы найден способ эффективного получения искусственного жидкого топлива из твердого; в пятилетия эта отрасль химической промышленности получает дальнейшее свое развитие. Техника получения искусственного бензина добилась выхода 50 ÷ 55% по весу на горючую массу. Как сырье используют разнообразные сорта угля, широко используются с этой целью и сланцы. Получаемый искусственным путем бензин высокого качества особенно важен для нужд авиации и в этом отношении он часто превосходит по своим свойствам естественный бензин, т. е. получаемый из нефти.

Пример 19. Элементарный состав подмосковного угля следующий:

$$C^P = 29,4; H^P = 2,2; O^P = 9,1; N^P = 0,6; S^P = 2,6; A^P = 23,6;$$

$$W^P = 32,5.$$

Определить низшую теплоту сгорания рабочего топлива на сухую массу. Определить состав сухой массы топлива. Определить теплоту сгорания рабочего топлива при $W^P = 28\%$.

По формуле (53) находим:

$$\begin{aligned} Q_n^P &= 81C^P + 246H^P - 26(O^P - S^P) - 6W^P = \\ &= 81 \cdot 29,4 + 246 \cdot 2,2 - 26(9,1 - 2,6) - 6 \cdot 32,5 = 2557 \text{ ккал/кг.} \end{aligned}$$

Из формулы (54) находим:

$$Q_n^P + 6W^P = Q_n^C \frac{100 - W^P}{100},$$

откуда

$$Q_n^C = (Q_n^P + 6W^P) \frac{100}{100 - W^P};$$

$$Q_n^C = (2557 + 6 \cdot 32,5) \frac{100}{100 - 32,5} = 4070 \text{ ккал/кг.}$$

Состав на сухую массу. По формуле (51) имеем:

$$C^C = C^P \frac{100}{100 - W^P} = 29,4 \frac{100}{100 - 32,5} = 43,5\%.$$

Аналогично находим:

$$H^C = 3,26\%; O^C = 13,5\%; A = 35\% \text{ и т. д.}$$

Теплота сгорания рабочего топлива при $W^P = 28\%$ составит по формуле (54):

$$Q_n^P = Q_n^c \frac{100 - 6W^P}{100} - 6W^P;$$

$$Q_n^P = 4070 \frac{100 - 28}{100} - 6 \cdot 28;$$

$$Q_n^P = 2762 \text{ ккал/кг.}$$

29. ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

При горении топлива получают продукты горения — газовая смесь, в основном состоящая из углекислого газа, азота, кислорода, водяного пара.

Кислород в природе встречается в газообразном виде; химическая формула его O_2 . Это бесцветный и не имеющий запаха газ; удельный вес его несколько выше удельного веса воздуха.

Кислород энергично соединяется с рядом веществ (углеродом, водородом и др.); происходящие при этом реакции сопровождаются выделением тепла.

Химическая формула азота N_2 — это газ без цвета, вкуса и запаха. Азот лишь с трудом можно заставить соединяться с другими веществами.

Углекислый газ (химическая формула CO_2) и водяной пар (H_2O) получают при горении как результат химических реакций соединения горючих элементов топлива с кислородом воздуха, подводимого в топку. Рассмотрим важнейшие из этих реакций.

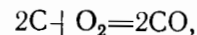
Процесс соединения веществ с кислородом называется окислением, а получающиеся вещества — окислами. Горение веществ — это и есть окисление, происходящее при высокой температуре.

Углерод, встречающийся в неживой природе как составная часть углей различного рода, при горении соединяется с кислородом, образуя углекислый газ, который уже неспособен к горению; реакцию записывают так:



Это означает, что при соединении атома углерода с молекулой кислорода получается молекула углекислого газа;

реакция сопровождается выделением значительного количества тепла. Горение по этой формуле называется полным горением. При неполном сгорании получается не углекислый газ, а окись углерода. В этом случае реакция происходит так:



т. е. два атома углерода и молекула кислорода (состоящая тоже из двух атомов) образуют две молекулы окиси углерода CO . Эта реакция также сопровождается выделением тепла, но уже в меньшем количестве.

Окись углерода — бесцветный, не имеющий запаха ядовитый газ; при вдыхании его человеком в большом количестве он вызывает смерть.

Окись углерода — горючий газ. При соединении с кислородом образуется продукт полного сгорания — углекислый газ — по реакции



Из реакций горения других веществ укажем на реакцию горения водорода и серы.

Реакция горения водорода происходит по формуле



из которой видно, что две молекулы водорода и молекула кислорода дают две молекулы воды.

Горение серы идет по формуле

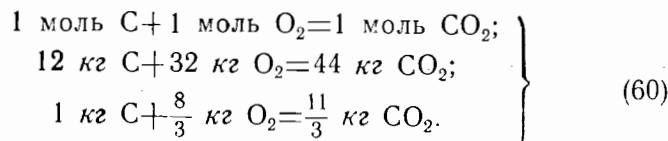


т. е. атом серы и молекула кислорода образуют при горении молекулу сернистого газа SO_2 . Три последние реакции также сопровождаются выделением тепла.

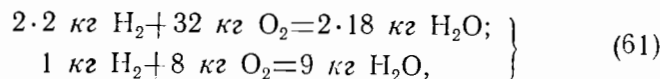
Как было указано, в теплотехнических расчетах пользуются особой единицей измерения количества вещества — молекул.

Удобство пользования этой единицей измерения происходит оттого, что моли разных веществ состоят из одинакового количества молекул, поэтому химические формулы по количеству участвующих веществ относятся и к отдельным молекулам и к молям. Например, формулу (56) можно читать так: 1 моль углерода и 1 моль кислорода дают

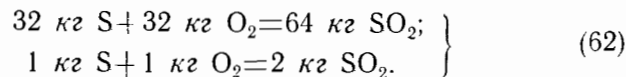
1 моль углекислого газа; выразим это же в килограммах: так как согласно табл. 3 1 моль углерода содержит 12 кг, 1 моль кислорода содержит 32 кг, а 1 моль углекислого газа 44 кг, то формулу (56) можно читать так: 12 кг окиси углерода и 32 кг кислорода дают 44 кг углекислого газа. Если мы для реакции горения возьмем не 12 кг, а 1 кг, то, очевидно, кислорода потребуется в 12 раз меньше и углекислого газа получится в 12 раз меньше; таким образом, 1 кг углерода потребует $\frac{32}{12} = \frac{8}{3}$ кг кислорода и реакция даст $\frac{44}{12} = \frac{11}{3}$ кг углекислого газа. Сказанное можно записать так:



Если так же рассмотреть реакцию горения водорода, то, пользуясь табл. 3, можно установить следующие весовые соотношения:



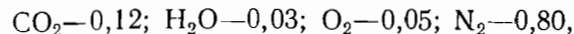
т. е. 1 кг водорода требует для своего горения 8 кг кислорода, и реакция дает 9 кг водяного пара. Горение серы дает следующие весовые соотношения:



Из последней формулы видно, что горение 1 кг серы требует 1 кг кислорода и реакция между этими количествами дает 2 кг сернистого газа.

Формулы (60)—(62) позволяют по заданному составу топлива подсчитать, сколько кислорода требуется подвести к 1 кг топлива, чтобы осуществить его горение, и сколько и каких газов получится при горении. Таким образом, состав продуктов сгорания зависит от состава сжигаемого топлива и количества воздуха, подводимого для сгорания,

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



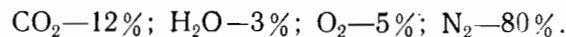
то это значит, что, например, на 1 кг продуктов сгорания приходится 0,12 кг углекислого газа, 0,03 кг водяного пара, 0,05 кг кислорода и 0,80 кг азота. Если сложить весовые доли газа, то получится единица:

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

Таким образом, весовая доля каждого газа, входящего в смесь, представляет собой отношение веса каждого газа в смеси ко всему весу смеси.

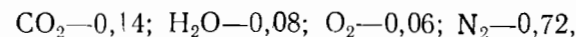
Заданный так состав газа называется относительным весовым составом.

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

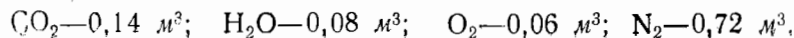


Чаше состав газовой смеси задают на 1 м³; тогда значения каждого газа показывают его объемную долю в 1 м³. Состав смеси, заданный таким образом, называется относительным объемным составом. Этот состав следует понимать так. Возьмем несколько разных газов, имеющих одни и те же давление и температуру. Если теперь эти газы смешать в их суммарном объеме, т. е. в объеме, равном сумме объемов, ранее занятых каждым газом в отдельности, то получится смесь того же давления и той же температуры, что каждый из газов имел до смешения. Частное от деления объема каждого газа до смешения на суммарный объем после смешения представляет собой объемную долю этого газа в смеси.

Если, например, задан относительный объемный состав смеси:



то это значит, что на 1 м³ газа приходится



Такой объем занимали бы эти газы, если бы удалось отделить их друг от друга перегородками; при этом каждый из отдельных газов имел бы давление и температуру, которые имела смесь.

В сумме объемные доли этих газов составляют единицу:

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

Если объемный состав задан на 100 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 м³ приходится 14 м³ CO₂, 8 м³ H₂O, 6 м³ O₂ и 72 м³ N₂.

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

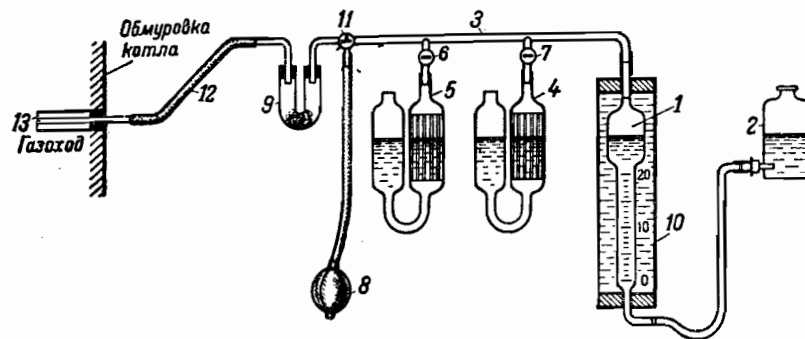
По закону Дальтона давление газовой смеси равно сумме парциальных давлений газов, из которых составлена смесь.

Для любой газовой смеси определенному относительно-му весовому составу соответствует вполне определенный относительный объемный состав, и наоборот; отсюда, зная какой-либо один состав (например, весовой), можно определить другой (в этом случае — объемный) состав. Для таких расчетов имеются соответствующие формулы; они приводятся в подробных курсах теплотехники.

Подсчет количества тепла на нагревание и охлаждение газовой смеси производят по тем же формулам, которые указаны были ранее в § 7. Нужно только вместо с подставить значение теплоемкости для смеси. Это значение находят так: теплоемкость каждого газа, входящего в смесь, умножают на его долю в смеси; полученные произведения складывают; эта сумма и есть теплоемкость смеси.

По составу газов можно судить о том, насколько правильно идет процесс горения топлива в топке парового котла, и следовательно, установить, не происходит ли пережога топлива. Для определения состава газа существуют приборы — газоанализаторы; среди них большое распространение имеет ручной газоанализатор

Орса (фиг. 65). 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; цилиндра с водой 10 и трехходового крана 11. Склянка 2 соединена с измерительной бюреткой 1 при помощи гибкой резиновой трубки. В склянке находится вода; поднимая склянку, из нее перегоняют воду в измерительную бюретку, опуская, — вновь направ-



Фиг. 65. Ручной газоанализатор.

1 — измерительная бюретка; 2 — склянка; 3 — гребенка; 4 и 5 — поглотительные сосуды; 6 и 7 — краны; 8 — резиновая груша; 9 — фильтр; 10 — цилиндр с водой; 11 — трехходовой кран; 12 — резиновая трубка; 13 — металлическая трубка.

ляют в склянку. Поглотительные сосуды заполнены химическими реактивами: в сосуде 4 — раствор едкого кали, поглощающий углекислый газ CO₂, в сосуде 5 — раствор пирогалловой кислоты, поглощающий кислород. Трехходовой 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 помещается 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 замеряют в измерительной бюретке при том же (атмосферном) давлении, при котором была засосана вся подвергавшаяся 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, который 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 замеряют 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 газоанализаторами, которые непрерывно производят анализ газов и записывают его на ленту. Ленту ежесуточно снимают, и по записям на ней судят о правильности режима горения топлива.

Горение топлива под котлом — сложный химический процесс, который требуется правильно организовать. Прежде всего необходимо подвести потребное количество воздуха.

Формула химической реакции позволяет подсчитать количества веществ, вступающих в химическое взаимодействие между собой, и количества получающихся продуктов. На основании формул горения, приведенных в § 29, можно подсчитать количество воздуха, необходимое 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 мет-

рах на 1 кг топлива, введенного в топку; таким образом, единицей измерения будет $\text{нм}^3/\text{кг}$ (буква н ставится для того, чтобы отметить, что объем воздуха считают при нормальных условиях, т. е. при $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$ и $t = 0^\circ \text{C}$).

Если в топку ввести теоретически необходимое количество воздуха, то трудно будет обеспечить полное соединение его кислорода с горючими составными 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 сгорания — окись углерода и часть кислорода, не использованного при горении. Чтобы избежать неполного сгорания, в топку приходится вводить воздух с некоторым избытком; такое количество воздуха называют действительным количеством воздуха и обозначают его V_d . Единицей его измерения также служит $\text{нм}^3/\text{кг}$.

Если теперь разделить действительное 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,

$$\frac{V_d}{V_0} = \alpha, \quad (63)$$

откуда имеем:

$$V_d = \alpha V_0. \quad (64)$$

Есть простая формула, которая дает возможность приближенно подсчитать теоретически необходимый объем воздуха в $\text{нм}^3/\text{кг}$ для горения топлива той или иной низшей теплоты сгорания. Эта формула имеет вид:

$$V_0 = \frac{1,12 Q_p}{1000} \text{ нм}^3/\text{кг}. \quad (65)$$

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 уходящими газами. Эта потеря так и называется — потеря с уходящими газами. Итак, надо дать такой избыток воздуха, чтобы при отсутствии потери от химической неполноты сгорания 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 (65) V_0 , можно по формуле (64) вычислить и V_d .

При правильном подводе воздуха в топку получается определенное количество углекислого газа CO_2 как продукта полного сгорания и полное (почти) отсутствие окиси углерода CO . Наличие окиси углерода CO , указывающее на неполноту сгорания, тоже может быть определено газоанализатором более сложной конструкции.

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. 10. С достаточной степенью точности отношение количеств воздуха действительного и теоретического равно отношению CO_2 максимального и действительно имеющегося в продуктах горения, т. е.

$$\frac{V_d}{V_0} = \frac{\text{CO}_{2\text{макс}}}{\text{CO}_2} \quad (66)$$

Но первое отношение дает значение коэффициента избытка воздуха; значит, и второе отношение также характеризует избыток воздуха в топке; таким образом,

$$\frac{\text{CO}_{2\text{макс}}}{\text{CO}_2} = \alpha, \quad (67)$$

или

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_{2\text{макс}}}{\alpha} \quad (68)$$

Если топливо содержит в значительном количестве серу, то формула (68) служит для измерения суммы углекислого газа и сернистого газа. Эту сумму обозна-

чают RO_2 ; таким образом, $\text{SO}_2 + \text{CO}_2 = \text{RO}_2$; следовательно,

$$\frac{\text{RO}_{2\text{макс}}}{\text{RO}_2} = \alpha. \quad (67')$$

Числитель дроби (67') может быть определен для данного топлива из табл. 10, знаменатель — газоанализатором. Таким образом, по формуле (67') можно вычислить для работающего котла α , а вместе с тем V_d и 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, а сам нагревается и увеличивает потери с уходящими газами.

Пример 20. В одной котельной сжигают под котлом дрова $Q_H^P = 2500$ 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 с $\alpha = 1,4$.

По формулам (65) и (64) находим теоретически необходимый и действительный объемы воздуха для горения.

Для дров

$$V_0 = \frac{1,12 \cdot Q_H^P}{1000} = \frac{1,12 \cdot 2500}{1000} = 2,8 \text{ нм}^3/\text{кг};$$

$$V_d = \alpha V_0 = 1,35 \cdot 2,8 = 3,8 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Для антрацита

$$V_0 = \frac{1,12 \cdot Q_H^P}{1000} = \frac{1,12 \cdot 6800}{1000} = 7,6 \text{ нм}^3/\text{кг};$$

$$V_d = \alpha V_0 = 1,4 \cdot 7,6 = 10,6 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Процентное содержание CO_2 при полном горении найдем так. Из табл. 10 находим содержание CO_2 при полном сгорании 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 сгорании 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

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_{2\text{ макс}}}{\alpha} = \frac{20,0}{1,4} = 14,3\%.$$

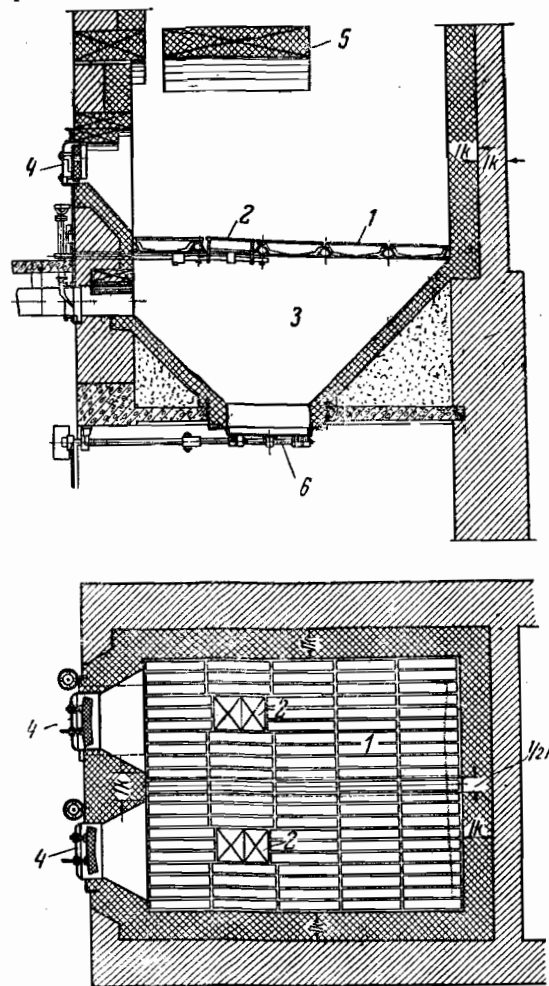
30. ТОПОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА

Одним из ответственных элементов котельной установки является топка, в которой происходит сгорание топлива.

При горении топлива можно различить три периода, переходящие один в другой; их называют стадиями процесса. Поступая в топку, топливо проходит стадию зажигания; в этот период топливо нагревается и при этом разлагается на твердую часть — кокс — и летучие вещества. Когда летучие приобретают температуру воспламенения ($600\text{—}750^\circ\text{C}$), они зажигаются, и начинается второй период — стадия горения, однако процесс выделения летучих продолжается (до 1000°C); в этой стадии происходит и горение кокса. В отличие от первой стадии процесса, которая может протекать без доступа воздуха, вторая стадия требует наибольшего количества воздуха, в особенности вначале, когда происходит бурное выделение летучих. По мере выгорания горючих элементов как в газообразной, так и в твердой частях остаются негорючие элементы: в газообразной — азот, углекислый газ и др., а в твердой части — зола. Горение переходит в свою завершающую стадию — стадию догорания; в этот период потребность в воздухе значительно уменьшается.

Различают топки слоевые и камерные. В слоевых топках топливо расположено слоем на решетке. Их в свою очередь разделяют на топки с неподвижной и подвижной решеткой (механическая топка). На фиг. 66 дан чертеж широко распространенной топки для бурого угля с неподвижной решеткой; решетка составлена из металлических брусьев — колосников, между которыми имеются каналы или щели для прохода воздуха. В других случаях колосники выполняются в виде дырчатых плит разнообразной формы. Некоторые колосники осуществляются поворотными. Такой колосник время от времени поворачивают и через отверстие, закрываемое им,

удаляют накопившийся шлак. Загрузка топлива производится через загрузочные дверцы вручную; зола из золowego бункера поступает в золовой подвал, откуда она периодически убирается также вручную.



Фиг. 66. Ручная колосниковая решетка для бурого угля.

1 — балочные колосники; 2 — поворотные колосники для сброса шлака; 3 — бункер для золы и шлака; 4 — загрузочные дверцы; 5 — свод, перекрывающий слой топлива; 6 — заслонка.

В топке имеется кирпичный свод, перекрывающий ее по всей ширине; назначение свода — уменьшить излучение от горящего слоя на трубки котла и в свою очередь посылать лучистое тепло на слой топлива. И то и другое обстоятельство способствует повышению температуры в топке и тем самым более интенсивному протеканию процесса горения.

Особенность такой топки — периодичность загрузки топлива, вследствие чего стадии процесса горения протекают также периодически, одна за другой. Как было указано, разные стадии требуют разного количества воздуха, но в этой топке невозможно осуществить такой подвод воздуха, чтобы каждая стадия получала столько воздуха, сколько его требуется. Вследствие этого в некоторые периоды воздуха не хватает, а в другие он подается с чрезмерным избытком. И то и другое вызывает потери тепла.

Топка с неподвижной решеткой требует шуровки — периодического ворошения топлива, лежащего на решетке, с целью его лучшего выгорания. В описанной топке это производится вручную.

Рассмотренная топка устанавливается под котлами небольшой производительности. Основное ее достоинство — простота и дешевизна устройства, недостатки — неэкономичность вследствие периодичности процесса горения и необходимость затраты большого физического труда, так как основные процессы — загрузка топлива, удаление шлака и шуровка — производятся вручную.

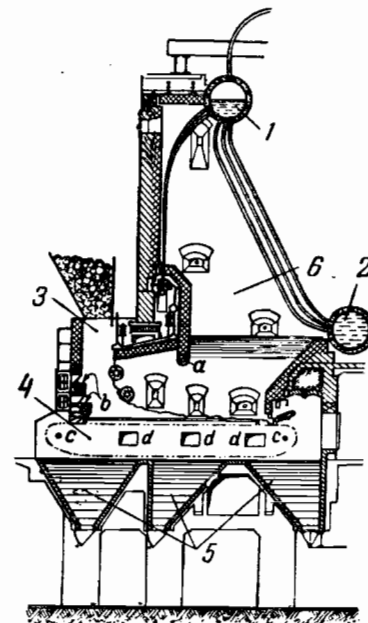
В последние годы появился ряд новых конструкций топки с неподвижной решеткой. Основное стремление при конструировании новых топок — механизировать процессы, требующие ручного труда. Среди этих топок следует отметить топку с шнуровой планкой, снабженную той или иной конструкции забрасывателем топлива и устройством для удаления шлаков. В такой топке все процессы механизированы.

Однако топка с неподвижной решеткой, даже оборудованная приспособлениями для механизации всего процесса горения, не подходит для сжигания топлива под крупными котлами на центральных электрических станциях. На этих станциях используются другие топки — большей производительности. Из слоевых топок для крупных котлов электростанций рассмотрим топку для торфа.

На фиг. 67 изображена такая топка, носящая имя проф. Т. Ф. Макарьева, разработавшего ее конструкцию. Топка установлена под котлом, два барабана 1 и 2 которого и три ряда передних труб видны на чертеже. Топка состоит из шахты 3, цепной решетки 4, золовых бункеров 5 и топочного пространства 6. Под одним котлом обычно располагают две решетки шириной 4,4 м каждая.

Шахта 3 (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 *c*, одна из которых является ведущей; вал, на котором она сидит, приводится во вращение электродвигателем.

Поступая на решетку, топливо проходит через первую стадию — выделение летучих, которая начинается еще в шахте; летучие вещества поступают в топочное пространство, и здесь их горючая часть сгорает. Твердая часть топ-



Фиг. 67. Топка проф. Т. Ф. Макарьева для фрезерного топлива. 1 и 2 — барабаны котла; 3 — шахта; 4 — цепная решетка; 5 — золовые бункеры; 6 — топочное пространство; *a* — балка; *b* — ступени; *c* — звездочки; *d* — короба для воздуха.

лива — кокс — горит на решетке при ее движении. В правой части расположен шлакоосниматель, или шлаковый подпор. 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.

Как видно, в этой топке все три стадии горения происходят одновременно, но в различных местах топки; нет периодичности ни процесса поступления топлива, ни периодичности стадий горения.

Техника сжигания торфа в дальнейшем получила свое развитие. Фрезерный торф успешно сжигается во взвешенном состоянии в топках системы А. А. Шершнева и так называемых шахтно-мельничных топках (см. фиг. 70).

Топки с механической решеткой применяются и для сжигания бурых углей, однако не очень зольных и не очень влажных; в последнем случае топки не нуждаются в шахте.

При добыче угля часть его получается в виде мелочи. Мелкий уголь с нужной производительностью сжигать в слоевых топках трудно, поэтому для сжигания мелкого угля прибегают к другому способу сжигания — камерному. Крупные куски, попадающиеся среди мелкого угля, подвергают дроблению в специальных машинах — дробилках.

Бурые угли и антрацитовый штыб сжигают в камерных топках. Сущность такого сжигания заключается в следующем. Мелкое топливо в специальных машинах — мельницах — доводят до состояния тончайшего порошка — угольной пыли. Угольную пыль при помощи воздуха через особые приспособления — форсунок — вдувают в большую топочную камеру, где она загорается и горит на лету в виде факела. Отсюда этот способ и получил название камерного.

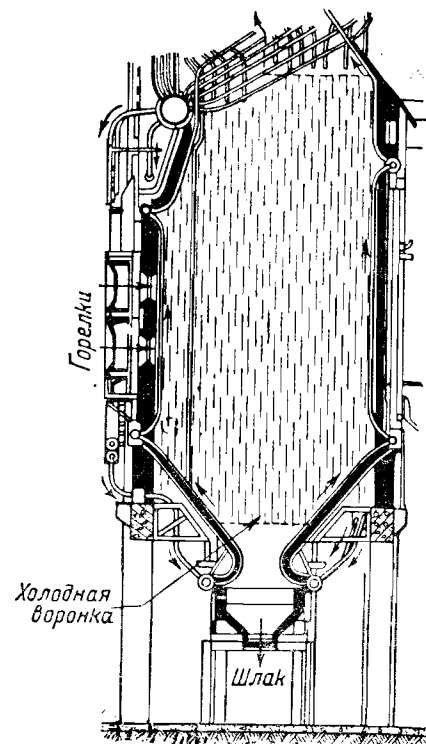
Такая топка представлена на фиг. 68. Как видим, она

представляет собой камеру, образованную кирпичными стенками; вдоль стенок расположены трубки, по которым движется вода; это сделано для охлаждения кирпичной кладки от разрушающего действия пламени. Вверху камеру пересекают трубы котла, не показанные на чертеже; трубы образуют его поверхность нагрева; все охлаждающие трубы, идущие вдоль стен камеры, также составляют поверхность нагрева котла и питаются водой из нижнего барабана котла. Нижняя часть камеры представляет собой шлаковую шахту, образованную покатыми стенками, также охлаждаемыми водяными трубами. Это так называемая холодная воронка. Здесь охлаждаются и превращаются в твердые кусочки расплавленные жидкие капли шлака, который собирается в нижней части шахты.

Слева в стенке расположено (одна за другой) несколько горелок (форсунок).

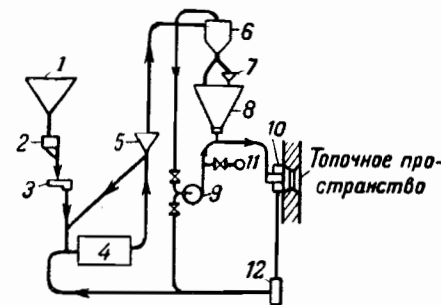
Кроме топок с описанным гранулированным шлакоудалением, в последние годы получили развитие камерные топки с жидким шлакоудалением. В этом случае вместо шлаковой воронки в нижней части топки специальным расположением форсунок создают зону с высокой температурой, при которой шлак находится в жидком состоянии. Жидкий шлак стекает вниз в особую шлаковую ванну, откуда через специальную летку он поступает в шлаковый бункер, заполненный водой; отсюда — уже в затвердевшем виде — шлак удаляется.

Есть несколько способов приготовления пыли, каждый



Фиг. 68. Пылеугольная топка.

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. 69. Здесь уголь с определенным размером кусков из бункера 1 самотеком поступает на 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. Размолченный здесь уголь струей воздуха уносится 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, как указано стрелкой, вниз и снова поступают в мельницу. Готовая пыль поступает в циклон 6; здесь происходит отделение воздуха от пыли; пыль самотеком спускается по рукаву и при помощи шнека 7 подается в пылевой бункер 8. Вентилятор 9, забирающий воздух из циклона, нагнетает его в форсунку 10. Сюда же подаются пыль из бункера и из короба 12 воздух, нагретый в воздухоподогревателе. Образовавшаяся смесь — аэропыль — поступает через форсунки в топочное пространство котла, где она и сгорает.



Фиг. 69. Схема пылеприготовления.

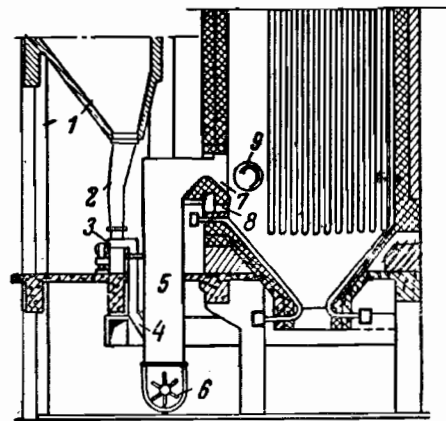
1 — бункер сырого угля; 2 — автоматические весы; 3 — тарельчатый питатель; 4 — мельница; 5 — сепаратор; 6 — циклон; 7 — шнек; 8 — пылевой бункер; 9 — вентилятор; 10 — форсунка; 11 — взрывной клапан; 12 — воздух из экономайзера.

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 для сжигания применяют влажный уголь и в мельнице нельзя получить достаточной его подсушки, перед мельницей устанавливают трубу-сушилку, при движе-

нии 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 топki (фиг. 70), в которых также осуществляется камерный метод сжигания. Эти топki отличаются 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 подает ее в топку через амбразуру (окно) 7. Отвеивание готовой пыли происходит в шахте 5. В таких топках советские теплотехники с большим успехом научились сжигать фрезерный торф, что обеспечивает широкое развитие этому наиболее механизированному и экономичному способу добычи торфа.



Фиг. 70. Шахтно-мельничная топка.

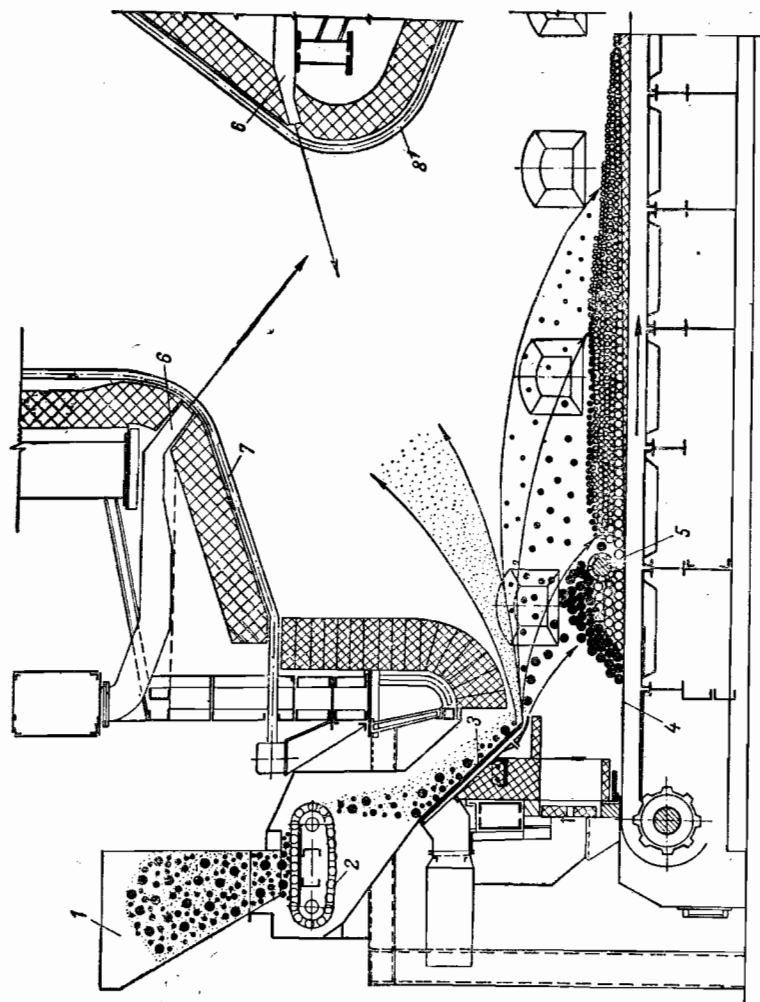
1 — бункер сырого топлива; 2 — рукав для подачи сырого топлива; 3 — питатель сырого топлива; 4 — течка для подачи топлива к мельнице; 5 — шахта; 6 — шахтная мельница; 7 — амбразура; 8 — подача вторичного воздуха; 9 — растопочное устройство.

Топки с механическими решетками менее производительны, чем камерные топki. Работа над ними шла по линии увеличения производительности и возможности подачи в них несортированного угля. И то и другое достигается в факельно-слоевой топке ВТИ; в ней сочетаются слоевой и камерный способы горения. На фиг. 71 показана такая топка, широко испытанная в последние годы на практике.

Топливо забрасывается пневморазбрасывателем — особой машиной, в которой рабочим телом для

Фиг. 71. Двух-ступенчатая факельно-слоевая топка ВТИ.

1 — приемная воронка; 2 — скребковый питатель; 3 — разгонные плиты; 4 — цепная решетка; 5 — зажигающая балка; 6 — сошла вторичного дутья; 7 — фронтальный экран; 8 — задний экран.



сообщения кускам угля движения служит сжатый воздух; при забрасывании угля в топку происходит его сортировка: наиболее мелкое топливо поступает непосредственно в топку и сгорает на лету, а куски ложатся на решетку и располагаются на ней по крупности, как показано на чертеже. В передней части помещается зажигающая балка, охлаждаемая водой. Она задерживает загоревшееся топливо; на него накладывается свежее топливо, так что создается наиболее интенсивный метод зажигания — нижнее зажигание. Топливо более мелкое, поступающее на среднюю и заднюю части решетки, ложится на горящий слой и также имеет нижнее зажигание. Под решетку подается не весь нужный для горения воздух, так что на решетке происходит неполное горение топлива; догорание происходит в камере, куда подается «вторичный» воздух. Описанная факельно-слоевая топка дает двойную производительность по сравнению с обычными топками с цепной решеткой.

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 имени Г. М. Кржижановского, Всесоюзный теплотехнический институт имени Ф. Э. Дзержинского и Центральный котлотурбинный институт имени И. И. Ползунова.

Работа этих институтов и ряда отраслевых институтов, занимающихся вопросами промышленной теплоэнергетики, равно как и многочисленного коллектива инженеров-теплотехников промышленности и электростанций, была направлена на разработку топок для сжигания низкосортных топлив. В результате совместных усилий проблема сжигания низкосортных топлив была в основном решена уже в первые годы строительства крупных электростанций, т. е. в восстановительный период 1920—1927 гг. Сжигание подмосковного угля под крупными котлами получило свое разрешение на Каширской ГЭС в 1926 г., сжигание торфа — на Шатурской ГЭС и сжигание антрацитового штыба — на Штеровской ГЭС в 1927 г. Решение этих проблем послужило основанием для сооружения в дальнейшем ряда крупных станций на указанных видах топлива.

В области топок для промышленной энергетики усилия

советских теплотехников были направлены не только на решение вопроса с точки зрения техники и экономики горения, но в соответствии с принципиальным направлением советской техники на устранение тяжелого физического труда, обеспечение механизации процессов загрузки топлива, шуровки его и удаления шлаков, т. е. на организацию в этих котлах той же системы механизации, которая имеется на котлах крупной мощности. В настоящее время промышленная теплотехника обладает рядом топок, в которых эти задачи успешно разрешены.

31. ПАРОВЫЕ КОТЛЫ

В паровых котлах происходит приготовление рабочего тела — водяного пара; паровые котлы относят к основному оборудованию тепловых электрических станций.

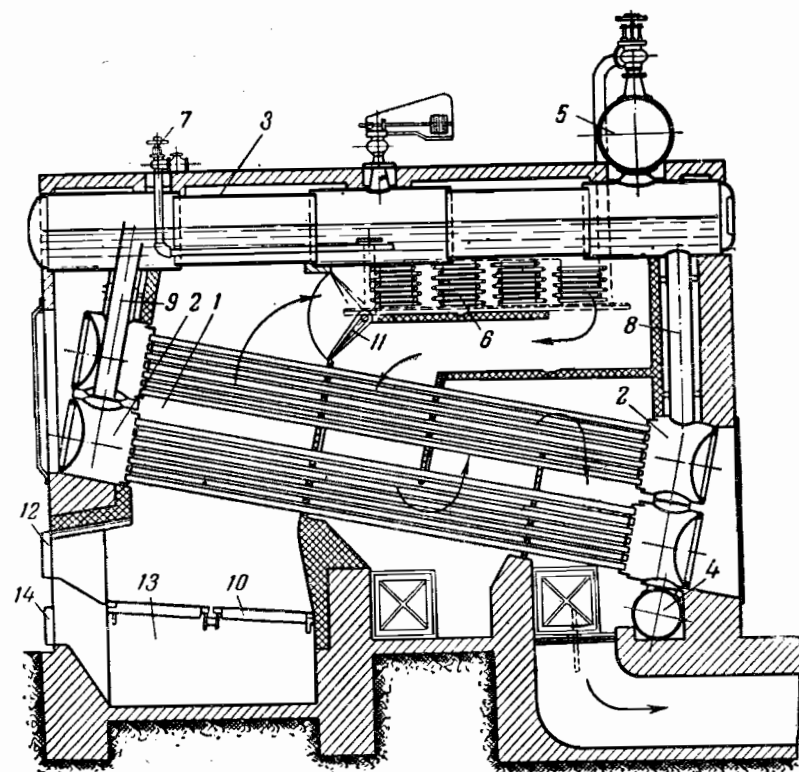
Познакомимся кратко с устройством этих агрегатов, чтобы в дальнейшем рассмотреть работу электрической станции в целом. Подробное рассмотрение паровых котлов и машин-двигателей производится в специальной литературе.

Из строящихся типов паровых котлов на электростанциях используется так называемый 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 конструкций такого котла небольшой производительности, а именно котел Шухова (фиг. 72).

Основными частями его являются кипяtilьные трубы 1, цилиндрические головки, или коробки, 2, барабан 3, грязевик 4, сухопарник 5, пароперегреватель 6.

В кипяtilьных трубах происходит процесс парообразования. Трубы расположены пучками. Передние и задние концы труб каждого пучка ввальцованы в головки 2, представляющие собой небольшие барабаны. Головки соединены с барабаном 3: передние при помощи горловины 9, задние при помощи труб 8. В самой нижней части котла имеется коллектор-грязевик 4, в котором оседает грязь, попадающая с водой; отсюда она удаляется через продувочный вентиль. В верхней части помещен сухопарник 5, в котором происходит отделение от пара увлеченных им капелек воды. Питательная вода поступает в котел через

вентиль 7 в переднюю часть барабана и, смешавшись с котловой водой, направляется через трубы 8 в задние головки. Образующийся в трубах пар вместе с кипящей водой поступает в передние головки, а оттуда в барабан, где пар



Фиг. 72. Разрез по котлу Шухова.

1—кипяtilьные трубы; 2—секционные головки, или коробки; 3—барабан; 4—коллектор-грязевик; 5—сухопарник; 6—пароперегреватель; 7—вентиль; 8—трубы; 9—горловина; 10—колосниковая решетка; 11—заслонка; 12 и 14—двери; 13—поддувало.

собирается в верхней части над водой. Из барабана пар через сухопарник, в котором происходит отделение капелек воды от пара, проходит по соединительной трубе в пароперегреватель 6. Здесь пар получает дополнительное количество тепла, причем давление его не изменяется, а температура

повышается; таким образом, здесь он становится перегретым паром.

Изображенный на фиг. 72 котел небольшой производительности оборудован ручной топкой с неподвижной колосниковой решеткой.

Воздух для горения подается через дверцу 14 и поддувало 13; через слой топлива, лежащий на колосниках 10, 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 11. В положении, показанном на чертеже, все газы проходят через перегреватель. При другом крайнем положении, указанном на чертеже пунктиром, газы вовсе не пойдут через перегреватель. 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. 73 показан внешний вид котла Шухова, состоящего из трех секций, в обмуровке.

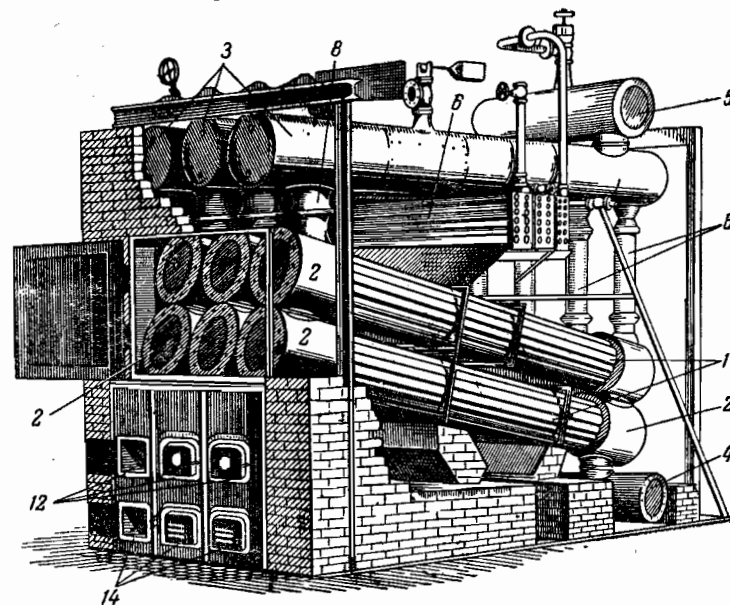
Как видно, конструкция котла позволяет числом набираемых по его ширине секций изменять поверхность нагрева, а следовательно, и производительность.

Котлы Шухова устанавливались на электрических станциях малой мощности (порядка 3 000—5 000 квт), преимущественно на фабрично-заводских станциях, а также в случаях, когда производство для своего технологического процесса нуждается в паре.

Достоинства котлов Шухова — легкость их транспортировки и монтажа, удобство эксплуатации — обеспечили им широкое распространение; в производстве они сохранялись около 50 лет. В настоящее время котлы Шухова не строятся, однако на предприятиях Советского Союза имеется и действует громадное количество таких котлов.

Советские котлостроители в последние годы разработали ряд новых конструкций котлов небольшой производительности. Один такой котел показан на фиг. 74. В нем два барабана расположены поперек оси котла. Перегородки для организации движения газов расположены так, что га-

зы движутся поперек труб, и это способствует хорошей теплопередаче. В отличие от котла Шухова, в котором трубки ввальцованы в секции, здесь они присоединены непосредственно к барабанам. Котлы с небольшим наклоном трубок к горизонту, как в котле Шухова, называют горизонтально-водотрубными котлами; котлы с боль-

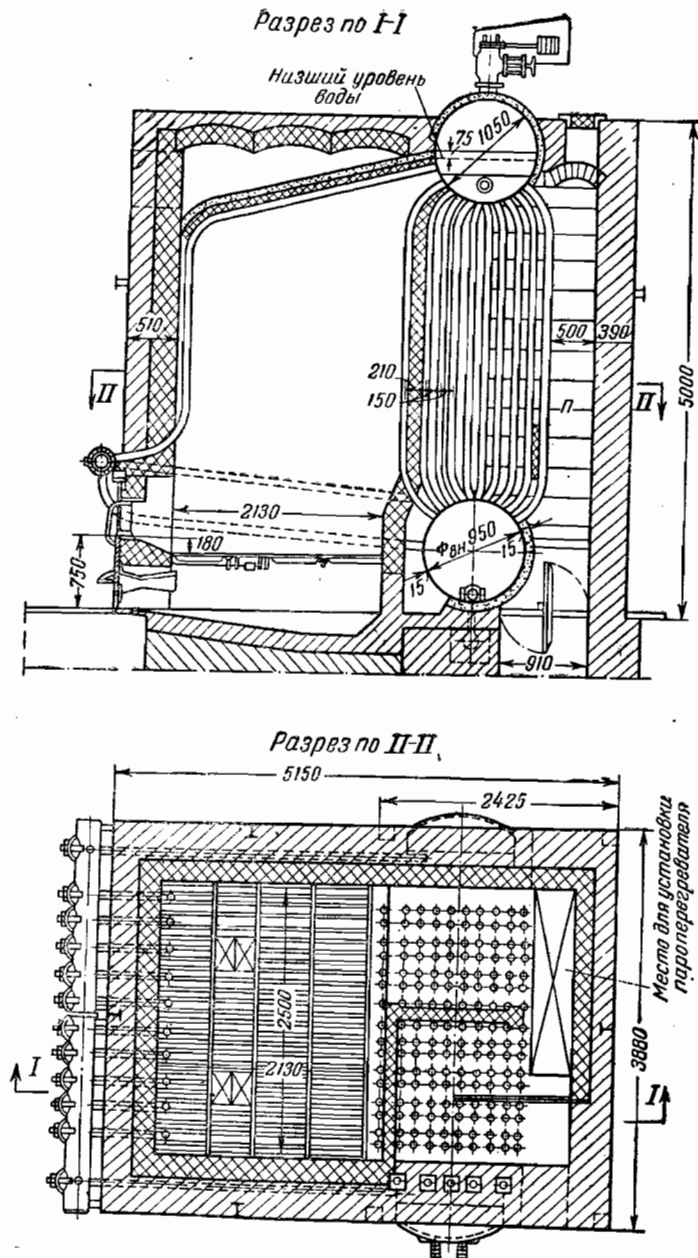


Фиг. 73. Котел Шухова в обмуровке (см. фиг. 72).

шим наклоном трубок к горизонту или с вертикально расположенными трубками, как у описываемого котла, называют вертикально-водотрубными котлами. Описываемый котел значителен под маркой ВВД (вертикально-водотрубный Добрина). Производительность таких котлов в зависимости от длины барабанов и поверхности нагрева труб составляет 2—6 т/час.

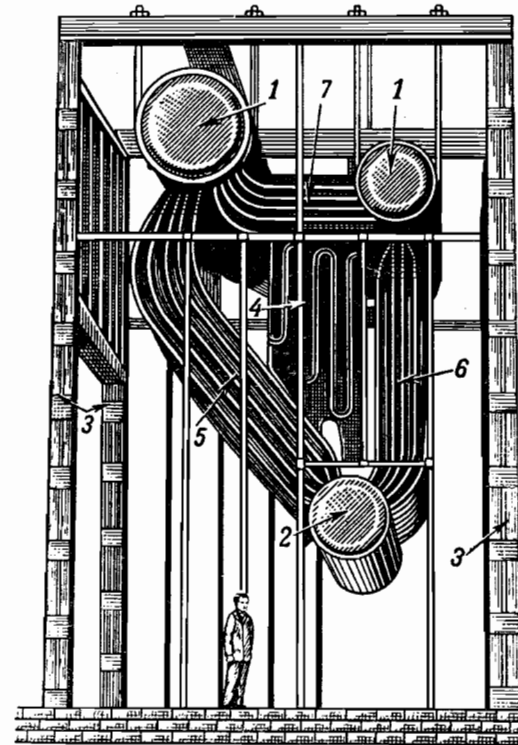
На больших электрических станциях устанавливают мощные котлы. На электростанциях постройки 1925—1935 гг. ставили многобарабанные котлы с тремя или четырьмя барабанами.

На фиг. 75 представлен трехбарабанный котел типа Стерлинга без обмуровки и без топки, но в каркасе. Водой



Фиг. 74. Вертикально-водотрубный котел системы ВВД.

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 верх-



Фиг. 75. Трехбарабанный котел типа Стерлинга.

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.

них 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.

Так осуществляется циркуляция рабочего тела в котле. 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.

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 вертикально-водотрубный котел Подольского завода представлен на фиг. 76.

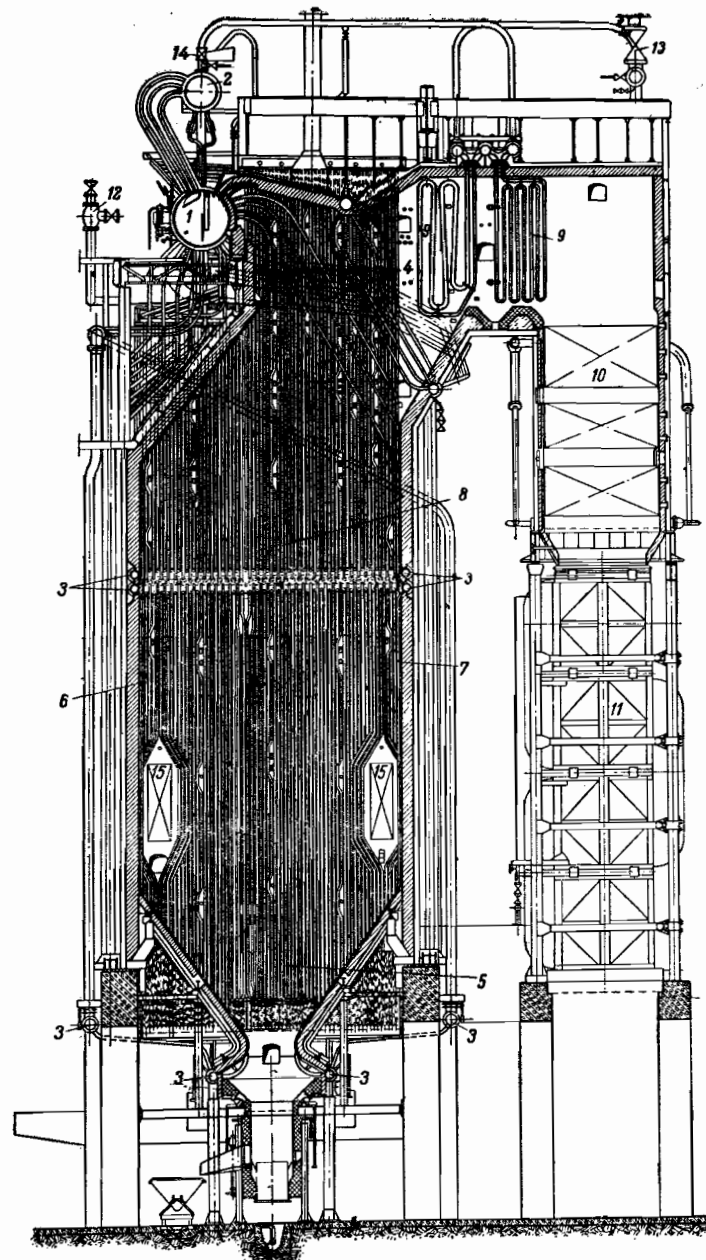
В основном его поверхность нагрева образована трубками, которые расположены вдоль стен топки; они образуют так называемые экраны (6, 7 и 8); в них происходит парообразование и вместе с тем эти трубы защищают кирпичную кладку стенок от разрушающего действия пламени. Вода поступает из водяного экономайзера 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 ее в барабан 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 ата). Он выпускался заводом перед Великой Отечественной войной и установлен на ряде станций. В послевоенный период в свя-



Фиг. 76.

Фиг. 76. Однобарабанный котел среднего давления
Подольского завода имени С. Орджоникидзе.

1 — барабан котла; 2 — сухопарник; 3 — коллекторы; 4 — котельный пучок; 5 — холодная воронка; 6, 7 и 8 — экраны; 9 — перегреватель; 10 — водяной экономайзер; 11 — воздушный подогреватель; 12 — питательный вентиль; 13 — задвижка перегретого пара; 14 — предохранительный клапан; 15 — форсунки.

зи с переходом широким фронтом на строительство станций высокого давления Подольский завод выпустил котел ПК-10 для давления 100 ат и температуры 510°C производительностью 200—230 т/час. На такие же параметры строит котлы и Таганрогский завод. На фиг. 77 показан котел этого завода типа ТП-230.

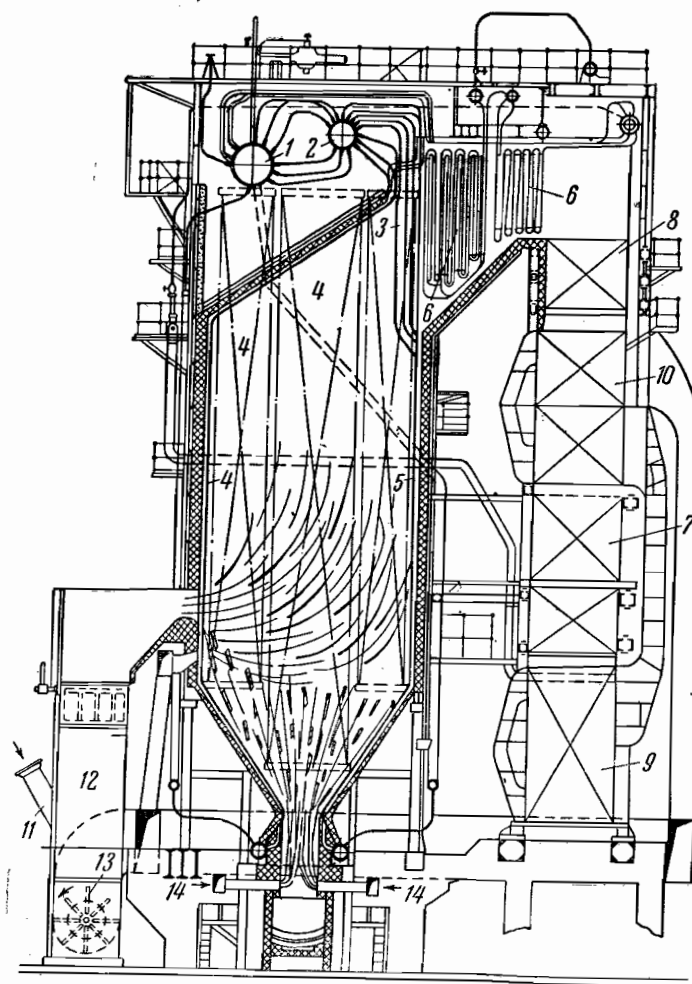
В отличие от котла, представленного на фиг. 76, в этом котле имеется небольшой предвключенный барабан 2, куда поступает пароводяная смесь из кипяtilльных трубок; здесь происходит в основном отделение пара от воды. После этого пар по верхним трубам отводится в паровое пространство, а вода по нижним трубам — в водяное пространство основного барабана 1. Вследствие этого вода в основном барабане находится в относительно спокойном состоянии.

В послевоенные годы советская теплотехника разрабатывала проблему использования на электрических станциях сверхвысоких параметров пара до 300 ат и 600°C .

Общим для всех барабанных котлов является способ организации 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. Первый такой котел системы проф. Л. К. Рамзина введен в работу в 1933 г. и надежно работает в настоящее время. Котел работает на давлении 130 ат и имеет производительность 200 т/час. Поверхность нагрева прямоточного котла состоит из длинных трубок, выполненных в виде горизонтально расположенных змеевиков.

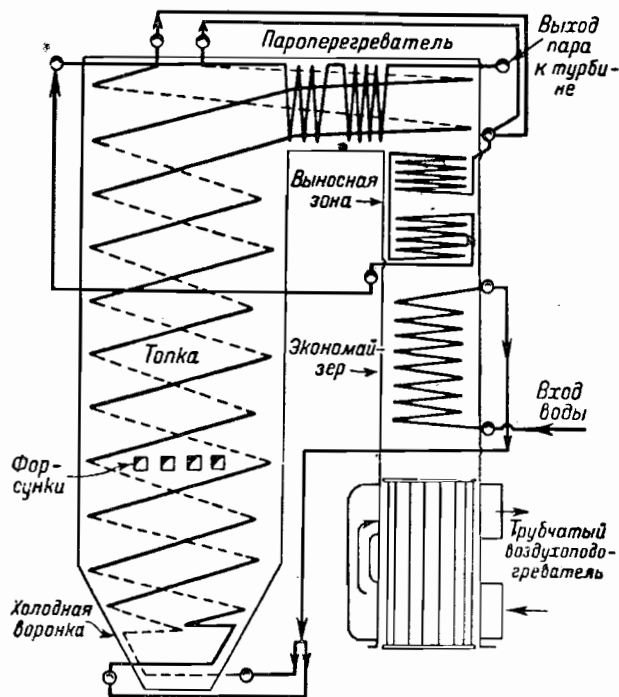
Вода подается в змеевики котла насосом. Проходя через поверхность нагрева котла, она полностью испаряется; пар перегревается до требующейся температуры и таким образом в готовом виде выходит из змеевиков. Здесь уже естественной циркуляции нет, и движение рабочего тела осуществляется принудительно при помощи насоса.



Фиг. 77. Однобарабанный котел высокого давления ТП-230 Таганрогского завода с шахтно-мельничной топкой для сжигания фрезерного торфа и бурого угля.

1 — основной барабан; 2 — предвключенный барабан; 3 — отводящие трубы заднего экрана; 4 и 5 — экраны; 6 — перегреватель; 7 и 8 — первая и вторая ступени экономайзера; 9 и 10 — первая и вторая ступени воздушного подогревателя; 11 — сырой уголь; 12 — шахта; 13 — мельница; 14 — подача воздуха.

На фиг. 78 показана схема прямоточного котла Рамзина. Газоходы выполнены в виде буквы П. Топка размещается в левой половине котла, где газы имеют наиболее высокую температуру. Здесь расположены трубки собственно котла, в которых происходит нагревание и испарение



Фиг. 78. Схема прямоточного котла-агрегата Рамзина производительностью 230 т/час пара.

воды. Место перехода последних долей воды в пар является наиболее опасным для трубок, так как здесь происходит выделение из воды растворенных в ней солей, которые откладываются на трубках котла. Так как при высоких температурах отложившиеся соли могут стать причиной повреждения трубок, то 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*.

Несмотря на эту предосторожность, проникновение солей в прямоточный котел считается недопустимым вследствие невозможности удалять их так, как это делается в барабанных котлах, в которых из тех мест барабана, где скапливается вода с наибольшей концентрацией солей, эту воду удаляют через особые отводы с вентилями; это называется *продувкой котла*. Поэтому прямоточные котлы не должны питаться добавочной водой, даже химически очищенной, а только конденсатом. Если на станции имеются барабанные и прямоточные котлы, то питание их осуществляется таким образом, что прямоточные котлы питаются только конденсатом, а вся добавочная химически очищенная вода поступает в барабанные котлы.

Движение рабочего тела — воды и пара — происходит в прямоточном котле следующим образом. Вода поступает в экономайзер и, нагревшись, подходит к коллекторам левой половины котла. На схеме изображены два коллектора. Разделившись на две ветви, вода поднимается по трубкам 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 П-образного газохода, 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 Великой Отечественной войны были использованы на ряде станций Урала. Простота устройства позволила организовать их производство на строительных площадках станций. Вследствие этого и сравнительной легкости монтажа удалось в короткий срок включить в работу ряд крупных турбогенераторов для снабжения электроэнергией оборонных заводов.

В послевоенные годы продолжалась работа над усовершенствованием прямоточных котлов. Поскольку прямоточные котлы не имеют естественной циркуляции и не нуждаются в устройствах для отделения воды от пара (сепарации), они наиболее приспособлены к работе при сверхвысо-

ком давлении пара (выше 150 *ата*), когда разность удельных весов пара и воды мала. Для пара при давлении выше критического (225 *ата*), прямоточный принцип является единственно возможным. В послевоенные годы построен опытный котел на 300 *ата* и 600° С и спроектированы крупные прямоточные котлы для станций на сверхвысокие параметры водяного пара.

Строительство котлов различными заводами СССР стандартизовано. По ГОСТ 3619-47 все заводы строят котлы четырех типов, различающиеся рабочим давлением, а именно 8, 13, 39 и 100 *ати*. Котлы первого типа вырабатывают насыщенный пар и строятся на производительность 0,2—2 *т/час*; котлы второго типа дают насыщенный или перегретый пар и имеют производительность 4—10 *т/час*; третий и четвертый типы котлов предназначаются для выработки перегретого пара и строятся на производительность 12—110 *т/час* (третий тип) и 75—230 *т/час* (четвертый тип). Котлы более высоких давлений строятся вне этого стандарта.

Таким образом, в Советском Союзе строятся котлы разнообразных типов для удовлетворения потребностей коммунальных и промышленных предприятий, а также электростанций. Особенность советского котлостроения, отличающая его от котлостроения капиталистических стран, заключается в создании котлов для сжигания низкосортных топлив с большим содержанием влаги и золы с низкой температурой плавления. Это направление советского котлостроения естественно вытекает из топливной политики СССР, рассчитанной на широкое использование на электростанциях этих топлив. После ряда лет упорной работы в этом направлении задача построения котлов для работы на низкосортном топливе и эксплуатации их с успехом была решена; в этом отношении советская теплотехника опередила теплотехнику капиталистических стран.

Другая характерная черта советского крупного котлостроения, также отличающая его от котлостроения капиталистического мира, состоит в создании котлов, допускающих после несложных, заранее предусмотренных переделок возможность работы на разных топливах. Такие, как их называют у н и ф и ц и р о в а н н ы е по топливу, стандартизованные котлы высокого давления строятся в настоящее время для центральных электрических станций.

Важнейшая сторона работы парового котла — его экономичность — выражается обычно тепловым балансом; в нем показаны отдельные статьи расхода всего тепла, выделяющегося при горении. Только часть этого тепла, называемая полезным теплом, передается рабочему телу и используется на парообразование. Остальную часть составляют потери; это — тепло, которое не удалось той или иной причине передать воде и водяному пару.

Полезное тепло можно легко вычислить из следующих соображений.

Процесс подвода тепла к рабочему телу происходит при постоянном давлении; отсюда согласно формуле (34) количество тепла, передаваемое 1 *кг* рабочего тела, равно разности между теплосодержанием i_n пара, выходящего из котла, и теплосодержанием $i_{n.с}$ питательной воды, поступающей в котел. Если количество пара, выдаваемого котлом, составляет D *кг/час*, то количество полезного тепла Q_1 составит:

$$Q_1 = D(i_n - i_{n.с}) \text{ ккал/час.} \quad (69)$$

Это количество тепла получается от горящего топлива. Если расходуется B *кг/час* топлива при низшей теплоте сгорания Q_n^p , то общее количество тепла, которое может выделяться при горении, составит BQ_n^p *ккал/час*. Однако не все это тепло передается рабочему телу, так как в котельной установке имеются разнообразные потери тепла.

Из них наибольшей обычно бывает потеря тепла с уходящими газами. Дело в том, что горячие газы, получающиеся при горении, омывая поверхности нагрева, покидают котел при достаточно еще высокой температуре, обычно около 140 ÷ 160° С на крупных электростанциях. Уменьшать эту температуру дальше путем увеличения поверхностей нагрева котла, которые расположены в последнем газохоме (их называют хвостовыми поверхностями), считается невыгодным, так как при небольших разностях температур между греющим и нагреваемым телами это чрезмерно повысило бы расход металла на котел. Поэтому тепло, которое можно было бы получить, если бы охладили газы от температуры их на выходе до темпера-

туры окружающего воздуха, является потерянным. Оно и называется потерей с уходящими газами; его обозначают Q_2 . Для крупных котлов электростанций потеря тепла с уходящими газами составляет 7—9% общего количества тепла, которое может выделяться при горении топлива.

Потери тепла происходят также в топке при горении топлива. Реакция горения может идти так, что в продуктах горения остаются несгоревшими горючие газы, например окись углерода CO. Происходит это вследствие недовосгорания в топке воздуха или вследствие плохого его перемешивания с горючими элементами. Не выделившееся по этой причине тепло называют потерей от химической неполноты сгорания и обозначают Q_3 .

Неполнота горения происходит и потому, что несгоревшие частички топлива проваливаются через отверстия в решетке и уносятся из котла газами, увлекаются шлаком. Происходящая по этим причинам потеря тепла называется потерей от механической неполноты сгорания; обозначается она Q_4 . Для крупных котлов электростанций в зависимости от сорта топлива и способа его сжигания Q_3 составляет 0—1,5%, а Q_4 — 1 ÷ 3%.

Потеря тепла вызывается, наконец, тем, что температура наружной поверхности котла выше температуры окружающей среды, а потому он отдает тепло как конвекцией, так и лучеиспусканием. Эта потеря обозначается Q_5 и называется потерей в окружающую среду. Для крупных котлов электростанций эта потеря при полной нагрузке составляет 0,3—0,8%.

Очевидно, при сделанных обозначениях баланс котла можно представить таким уравнением:

$$BQ_n^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \text{ ккал.} \quad (70)$$

Если обозначить буквой $\eta_{к.у}$ коэффициент полезного действия (к. п. д.) котельной установки, под которым понимают долю полезно использованного тепла, то количество тепла Q_1 , переданное рабочему телу в котле, можно представить и так:

$$Q_1 = BQ_n^p \eta_{к.у}. \quad (71)$$

Сравнивая формулы (69) и (71), можно написать:

$$D(i_n - i_{н.с}) = BQ_n^p \eta_{к.у}. \quad (72)$$

Уравнение (72) представляет собой основное тепловое уравнение котельной установки. Для работающего котла по нему подсчитывают $\eta_{к.у}$, если испытанием определены расход топлива B и количество пара D , выдаваемого котлом; для проектируемого же котла по нему подсчитывают расход топлива, если задан расход пара и известен по опытным данным его $\eta_{к.у}$.

Для определения к. п. д. котельной установки из уравнения (72) получаем формулу:

$$\eta_{к.у} = \frac{D(i_n - i_{н.с})}{BQ_n^p}. \quad (73)$$

Эксплуатация котлов на советских электростанциях достигла большого совершенства. Коэффициент полезного действия котельной установки составляет на хороших станциях 88—92%.

Для сравнения работы котлов между собой в том случае, если сравниваемые котлы выдают пар одних и тех же параметров и используют одно и то же топливо, можно пользоваться более простым показателем, чем к. п. д., а именно испарительностью топлива I :

$$I = \frac{D}{B} \frac{\text{кг пара}}{\text{кг топлива}}. \quad (74)$$

Эта величина показывает, какое количество пара получается при сгорании в топке котла 1 кг топлива.

Если котлы используют разное топливо и дают пар неодинаковых параметров, то расход топлива приводят к условному топливу, пользуясь формулой (55), а количество пара, выданного котлом, — к так называемому нормальному пару, под которым понимают пар, имеющий теплосодержание 640 ккал/кг. Для этого подсчитывают количество тепла, подведенное к рабочему телу в котле, по формуле (69), делят его на 640 и получают D_n — производительность котла по нормальному пару:

$$D_n = \frac{D(i_n - i_{н.с})}{640} \text{ кг/час.} \quad (75)$$

Испарительность по нормальному пару на 1 кг действительного топлива составит:

$$I_{н.д} = \frac{D_n}{B_d} = \frac{D(i_n - i_{н.с})}{640 B_d}. \quad (76)$$

Испарительность по нормальному пару на 1 кг условного топлива определяется по формуле

$$I_{н.у} = \frac{D_n}{B_y} = \frac{D(i_n - i_{н.с})}{640 B_y}. \quad (77)$$

Если котлы пользуются одним и тем же топливом, но выдают пар различных параметров, то испарительность можно определять для действительного топлива.

Пример 21. Котельная установка работает на подмосковном угле и производит $D^I = 230$ т/час пара при давлении $p = 110$ атм и $t = 500^\circ\text{C}$ и температуре питательной воды $t_{н.с} = 215^\circ\text{C}$. Расход топлива составляет $B_d^I = 60$ т/час при $Q_n^p = 2540$ ккал/кг. Другая котельная работает на торфе при $Q_n^p = 2250$ ккал/кг и производит пар 29 атм, $t_1 = 400^\circ\text{C}$ в количестве $D^{II} = 160$ т/час при температуре питательной воды $t_{н.с} = 125^\circ\text{C}$. Коэффициент полезного действия второй котельной установки $\eta_{к.у}^{II} = 0,84$.

Сравнить для обеих котельных к. п. д. и испарительности топлива. Для первой котельной находим испарительность топлива на 1 кг условного топлива по нормальному пару. Для этого сначала узнаем расход условного топлива. По формуле (55) имеем:

$$B_y^I = \frac{B_d^I Q_n^p}{7000}.$$

Подставляя сюда числовые значения, находим расход условного топлива:

$$B_y^I = \frac{60000 \cdot 2540}{7000} = 21800 \text{ кг/час.}$$

Из условия задачи имеем: $D^I = 230000$ кг/час; по i_s -диаграмме находим теплосодержание пара для заданных параметров: $i_n = 803$ ккал/кг; теплосодержание питательной воды по табл. 8 водяного пара составляет 219,8 ккал/кг. Подставляя числовые значения в формулу (77), находим:

$$I_{н.у}^I = \frac{230000(803 - 219,8)}{640 \cdot 21800} = 9,6 \text{ кг пара/кг топлива.}$$

Для первой котельной находим к. п. д. котельной установки по формуле (73):

$$\eta_{к.у}^I = \frac{D^I(i_n - i_{н.с})}{B^I Q_n^p}.$$

Здесь в числителе — количество тепла, полезно переданное горячими газами рабочему телу; в знаменателе — количество тепла, которое может выделяться в топке; следовательно, дробь справа — доля тепла, полезно переданного рабочему телу, т. е. к. п. д. котельного агрегата. После подстановки значений величин находим:

$$\eta_{к.у}^I = \frac{230000(803 - 219,8)}{60000 \cdot 2540} = 0,88.$$

Для второй котельной вычисляем расход топлива; по формуле (72) находим:

$$B^{II} = \frac{D^{II}(i_n - i_{н.с})}{Q_n^p \eta_{к.у}^{II}}.$$

Здесь в числителе — количество тепла, полезно переданное во второй котельной горячими газами рабочему телу; в знаменателе — количество тепла, полезно передаваемое рабочему телу при сгорании 1 кг топлива; следовательно, дробь справа — количество килограммов топлива, которое необходимо сжечь, чтобы получить заданное количество рабочего тела.

По i_s -диаграмме находим для заданных условий: $p = 29$ атм и $t = 435^\circ\text{C}$, теплосодержание пара во второй котельной $i_n = 771$ ккал/кг; теплосодержание питательной воды принимаем по формуле (32) равным ее температуре, т. е. $i_{н.с} = 125$ ккал/кг; подставляя в формулу (72) числовые значения, находим:

$$B^{II} = \frac{160000(771 - 125)}{2250 \cdot 0,84} = 54600 \text{ кг/час.}$$

Приводим полученный расход натурального топлива к условному топливу; по формуле (55)

$$B_y^{II} = \frac{B^{II} Q_n^p}{7000}.$$

Подставляя числовые значения, получаем расход условного топлива:

$$B_y^{II} = \frac{54600 \cdot 2250}{7000} = 17600 \text{ кг/час.}$$

Найденное значение позволяет нам вычислить испарительность по нормальному пару на 1 кг условного топлива. По формуле (77) находим:

$$I_{н.у}^{II} = \frac{D^{II}(i_n - i_{н.с})}{640 B_y^{II}} = \frac{160000(771 - 125)}{640 \cdot 17600} = 9,2 \text{ кг/кг.}$$

Из сравнения устанавливаем, что оба показателя экономичности для второй котельной: к. п. д. установки и испарительность по нормальному пару ниже, чем для первой.

32. ВОДА И ЕЕ ОБРАБОТКА ДЛЯ ПИТАНИЯ КОТЛОВ

В рабочем цикле тепловой электростанции, как правило, вода совершает круговой процесс; таким образом, количество ее в цикле должно было бы быть постоянным. Но в действительности это не так: часть воды (2—3%) теряется с продувкой паровых котлов, в виде пара, отпускаемого на вспомогательные и хозяйственные нужды, а также через неплотности, и эту часть теряемой воды надо восполнять. Особенно большие потери воды (до 50% и выше) имеют те электростанции, которые отпускают тепло внешним потребителям для отопления и технологических процессов фабрик и заводов.

На различных участках пути качество (состав) воды различно, и в зависимости от этого вода имеет и разные названия. Взятая из источника водоснабжения (река, пруд, море) и еще не подвергнувшаяся никакой обработке, она называется исходной водой. После той или иной обработки (химической или термической), когда вода идет на восполнение потерь, она называется добавочной водой. В бак питательной воды поступают добавочная вода и конденсат от турбин и внешних потребителей. Эта смесь направляется на питание котла и называется питательной водой. В котле она смешивается с находящейся там водой и при подводе тепла испаряется. Кипящая в котле вода называется котловой водой.

В исходной или, как ее называют, природной воде имеются различные растворенные и нерастворенные (механические) примеси. Присутствие примесей выше определенных норм вызывает при нагревании и кипении воды появление на поверхности нагрева слоя накипи, плохо проводящей тепло, вспенивание воды в барабане, унос солей с паром. Металл стенок котла при наличии накипи перегревается, прочность его снижается и это влечет за собой в опасных случаях появление повреждений на трубках — отдулин и свищей. Вместе с тем это вызывает повышение температуры уходящих из котла газов, что приводит к пережогу топлива. Наличие примесей в воде неблаго-

приятно отзываться и на работе пароперегревателей котла и паровых турбин.

Увлекаемые с капельками котловой воды соли отлагаются на стенках перегревателей, вследствие чего возникают повреждения труб, а также на лопатках паровых турбин; из-за этого суживаются проходы пара и снижается мощность турбин. Наличие в воде растворенных газов (кислорода, углекислого газа и др.) вызывает коррозию металла котла и трубопроводов. Можно сказать, что половина всех аварий и неполадок на электрических станциях вызвана несоответствующим качеством питательной воды. Поэтому удаление из воды вредных примесей с целью снижения их содержания до допустимых с точки зрения эксплуатации норм — важнейшая забота персонала электростанции. Для приготовления добавочной воды на тепловых электрических станциях имеются водоподготовительные устройства.

Среди ряда показателей качества воды важнейшим служит так называемая общая жесткость воды, характеризующая наличие в ней растворенных солей кальция и магния.

Еще сравнительно недавно общая жесткость измерялась условной единицей, которую называли градусом жесткости и обозначали ($^{\circ}$). Содержание в воде 10 мг (миллиграмм = $\frac{1}{1000}$ грамма) окиси кальция (CaO) или 7,19 мг окиси магния (MgO) на 1 л воды соответствовало 1 $^{\circ}$ жесткости.

В настоящее время за единицу измерения жесткости принята такая жесткость, при которой в 1 л воды содержится 28 мг окиси кальция или 20 мг окиси магния. Каждое из этих количеств представляет собой эквивалентный вес¹ этого вещества и, будучи выражено в миллиграммах,

¹ Так называется частное от деления молекулярного веса химического соединения на его валентность (валентность определяется количеством атомов водорода, которое присоединяет данный элемент, или количеством атомов водорода, которое он заменяет в данном соединении). Так как атомный вес кальция 40, магния — 24, кислорода — 16, а валентность кальция и магния 2, то для окиси кальция

$$1 \text{ мг экв} = \frac{40 + 16}{2} = 28 \text{ мг},$$

а для окиси магния

$$1 \text{ мг экв} = \frac{24 + 16}{2} = 20 \text{ мг},$$

называется миллиграммэквивалентом. Таким образом, единицей измерения общей жесткости служит 1 миллиграммэквивалент на литр воды (обозначается 1 мгэкв/л), причем:

$$1 \text{ мгэкв/л} = 28 \text{ мг/л CaO};$$

$$1 \text{ мгэкв/л} = 20 \text{ мг/л MgO}.$$

Нетрудно установить связь новой единицы жесткости со старой. Очевидно,

$$1 \text{ мгэкв/л} = \frac{28}{10} = \frac{20}{7,19} = 2,8^\circ$$

или

$$1^\circ = \frac{10}{28} = \frac{7,19}{20} = 0,356 \text{ мгэкв/л}.$$

Для измерения малых жесткостей единицей измерения служит величина микрограммэквивалент на литр (обозначается мкгэкв/л), составляющая одну тысячную от 1 мгэкв/л. Таким образом,

$$1 \text{ мгэкв/л} = 1000 \text{ мкгэкв/л}.$$

Иногда пользуются и более крупной единицей измерения жесткости — граммэквивалент на литр (1 гэкв/л), причем

$$1 \text{ гэкв/л} = 1000 \text{ мгэкв/л}.$$

Отсюда для тонно-градуса жесткости (1 000°) имеем:

$$1 \text{ тград} = 1000^\circ = 356 \text{ мгэкв/л} = 0,356 \text{ гэкв/л};$$

$$1 \text{ гэкв/л} = 2,8 \text{ тград} = 2800^\circ.$$

Вода считается мягкой, если общая жесткость ее составляет 1,1—3,5 мгэкв/л (~4—10°), средней жесткости — при 3,5—7 мгэкв/л (10—20°) и жесткой при 7 мгэкв/л (20°) и выше.

Различные соли кальция и магния по-разному ведут себя при подводе тепла к воде. Некоторые из них (например, двууглекислые соли, или бикарбонаты) уже при нагревании распадаются; получившиеся соединения образуют накипь или выпадают в виде рыхлого илистого осадка, который называется шламом. Жесткость воды, определяемая этими солями, называется карбонатной. Другие соли кальция и магния образуют накипь при кипении; это происходит тогда, когда вследствие парообразования концентрация этих солей увеличивается, и вода становится ими насыщенной. Жесткость, определяемая такими

солями кальция и магния, называется некарбонатной жесткостью.

Сумма карбонатной и некарбонатной жесткости составляет общую жесткость воды.

Борьба с накипеобразованием в мощных барабанных котлах ведется в разных направлениях и прежде всего глубоким умягчением добавочной питательной воды. Один из широко распространенных методов умягчения состоит в фильтровании воды через особые вещества — катиониты; при этом вода отдает накипеобразующие примеси, а взамен них получает легко растворимые вещества, выпадающие в виде шлама. В качестве катионитов используется сульфуголь; так называется особым образом обработанный каменный уголь; для этих же целей используются некоторые искусственные смолы. Такими и более сложными схемами катионирования, применяемыми в особенности в котлах повышенного и высокого давления, достигается почти полное умягчение добавочной воды с доведением остаточной жесткости до 0,007—0,011 мгэкв/л, т. е. 7—11 мкгэкв/л (~0,02—0,03°).

Однако этого недостаточно. Накипеобразователи могут попасть в котел и помимо добавочной воды, а именно с охлаждающей водой через неплотности в конденсаторах и конденсатом от внешних потребителей тепла. Борьба с этими накипеобразователями ведется путем контроля за плотностью конденсаторов и добавлением в барабаны котлов фосфорнокислых солей натрия. Вступая в реакцию с проникающими в котел накипеобразующими примесями, они образуют соединения, легко удаляемые из котла (шлам). В тех же случаях, когда внешние потребители возвращают конденсат низкого качества, его подвергают умягчению.

При кипении по мере образования пара из воды содержание солей в котловой воде увеличивается; это может приводить к вспениванию воды в барабане. Пар, унося с собой небольшое количество котловой воды, уносит и часть растворенных в ней солей, а некоторые соли растворяются в паре. Вследствие этого ухудшается качество выдаваемого котлом пара. Чтобы не допустить чрезмерного накопления солей, часть воды с большим содержанием непрерывно удаляют из барабана. Как уже было указано, это называется продувкой котла. Продувка произво-

Всё процесс — умягчение —
их. для котла — катионирование

дится из мест барабана, достаточно удаленных от места ввода питательной воды через установленные для этой цели водозаборные трубы, как показано на фиг. 79. Количество продувочной воды на электростанциях составляет ~ 1%, а у некоторых котлов доходит до 5—7%. Так как температура продувочной воды велика, принимаются меры к использованию ее тепловой энергии.

Кроме непрерывной продувки, для удаления солей нужно из котла удалять и шламы. Для этого из нижней части котла и коллекторов экранированных труб производят периодическую шламовую продувку 1—2 раза в смену.



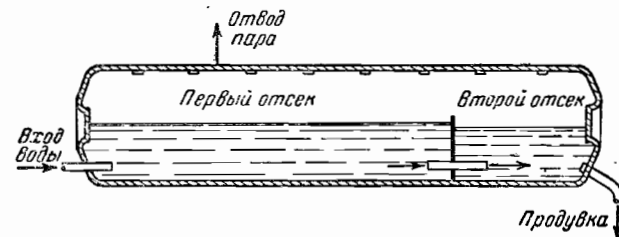
Фиг. 79. Схема водозаборных труб в барабане котла.
А — трубы, забирающие продувочную воду; В — выводные трубы.

Для борьбы с уносом солей паром, т. е. для улучшения качества пара, применяют механические сепараторы, устройства в разнообразных конструкциях, назначение которых — не допустить наличия капелек воды в паре, поступающем из барабана котла в перегреватель. Кроме того, для улучшения качества пара в СССР разработан оригинальный метод так называемого ступенчатого испарения воды в паровом котле; метод этот в принципе заключается в том, что барабан котла перегородкой делится на два отсека (фиг. 80). Питательная вода поступает в первый отсек; питание второго отсека производится из первого, получающего, таким образом, как бы интенсивную внутреннюю продувку; продувка наружу производится лишь из второго отсека. Вследствие такой организации питания котла содержание в первом отсеке уменьшается. Так как из этого же отсека производится отвод большей части пара, то качество пара по сравнению с котлом без ступенчатого испарения улучшается.

В тех случаях, когда в воде, кроме солей жесткости, присутствуют натриевые соли и соли кремниевой кислоты, на электростанциях, использующих пар высоких и сверхвысоких параметров, применяют метод так

называемого химического обессоливания с одновременным обескремниванием. Получаемая добавочная вода по своей чистоте приближается к конденсату и может быть использована для питания котлов высокого давления.

Если исходная вода содержит очень большое количество солей или если по каким-либо другим причинам нельзя допустить химической обработки питательной воды (например, в прямоточных котлах — см. § 31), прибегают



Фиг. 80. Барабан котла с перегородкой для ступенчатого испарения воды в нем.

к принципиально другим методам обработки добавочной воды. Добавочную воду испаряют в так называемых испарителях при давлении в несколько атмосфер; получающийся пар конденсируют и конденсат, уже лишенный примесей, направляют на питание котлов; соли при этом остаются в испарителе и удаляются из него при помощи продувки. Для того чтобы обеспечить надлежащую чистоту поверхности нагрева испарителя, его питают химически очищенной водой. Водоподготовительное устройство на электростанции, таким образом, не отпадает, но значительно упрощается, так как испарители предъявляют менее строгие требования к качеству питательной воды. В том случае, когда внешний потребитель использует большое количество пара и не возвращает конденсата, применяют так называемые паропреобразователи; в них готовится пар, нужный потребителю, за счет тепла конденсации пара, отбираемого из турбин электростанции. Паропреобразователи, так же как и испарители, питаются химически очищенной водой, а конденсат греющего пара полностью поступает в цикл питательной системы котла; таким образом, невозвращение конденсата от внешнего потребителя не вызывает увеличения добавочной воды.

Другая важная задача — освободить питательную воду от растворенных в ней газов, в первую очередь от кислорода и углекислого газа. Эти газы, вступая в химическое взаимодействие с металлом, разъедают его. Процессу разъедания — коррозии — подвержены все металлические поверхности основного и вспомогательного оборудования станции, соприкасающиеся с недегазированной водой или паром.

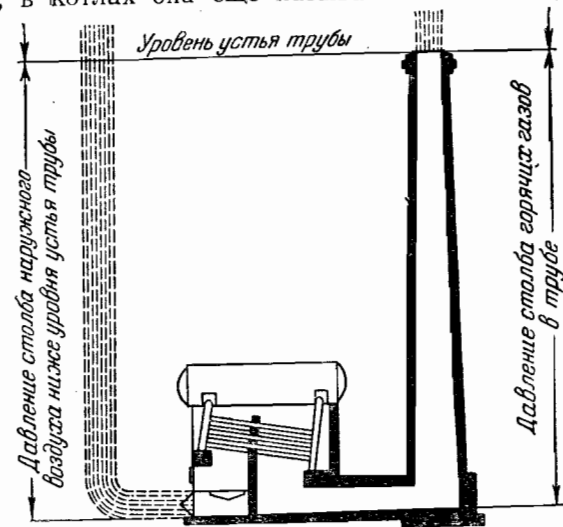
Очищенная от газов вода легко поглощает кислород из воздуха. Поэтому вся система воды на тепловых электростанциях должна быть герметически закрыта. Для удаления газов, так или иначе уже поступивших в воду, применяют деаэраторы. Термическая деаэрация заключается в доведении воды до температуры кипения; при этом растворенные в воде газы получают возможность выделиться в пространство над водой, откуда они и удаляются. На современных крупных электрических станциях применяют деаэраторы, работающие при давлении, близком к атмосферному, или 3—6 ата; в последних вода нагревается до 130—160° С. В качестве дополнительного мероприятия иногда применяют и химическое удаление кислорода при помощи специальных реагентов или пропусканием воды через фильтр, загруженный стальными стружками.

33. ТЯГОВЫЕ УСТРОЙСТВА, АРМАТУРА, КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Воздух, поступающий в топку, и продукты горения топлива при своем движении испытывают сопротивление. Наибольшее сопротивление воздуху оказывает слой топлива, через который проходит воздух при своем поступлении в топку. Для преодоления этих сопротивлений и сообщения движущимся газам определенной скорости надо создать разность давлений газов по тракту движения.

Разность давлений можно прежде всего создать дымовой трубой; это показано на фиг. 81. На уровне устья дымовой трубы давление атмосферы повсюду одинаково, а на уровне земли перед дверцей котла и внутри трубы — разное, так как давление (вес) столба холодного воздуха больше, чем давление горячих газов в трубе. Таким образом, барометрическое давление на уровне пола котельной больше, чем абсолютное давление газов в топке; разность

этих давлений, как известно, называется разрежением в топке; в котлах она еще называется тягой (фиг. 82).



Фиг. 81. Естественная тяга, создаваемая дымовой трубой.

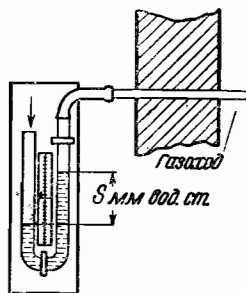
За счет тяги воздух поступает через дверцу в поддувало, преодолевает сопротивление слоя топлива и в дальнейшем в виде дымовых газов движется по газоходам к устью дымовой трубы. Очевидно, чем выше температура газов, чем ниже температура воздуха и чем выше дымовая труба, тем тяга больше. Если S — тяга, H — высота дымовой трубы в метрах, γ_v и γ_g — удельного веса воздуха и газов в кг/м^3 , то

$$S = H(\gamma_v - \gamma_g). \quad (78)$$

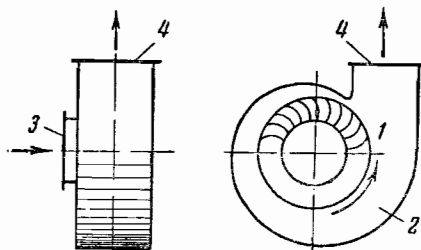
Значение S при принятых единицах измерения получается в кг/м^2 ; так как давление 1 кг/м^2 равно давлению столба воды высотой 1 мм, то полученное значение S вместе с тем измеряет и тягу в миллиметрах водяного столба.

Однако для крупных котлов электростанций при больших размерах и сопротивлениях недостаточно тяги, создаваемой трубой, и для организации движения воздуха и газов используют машины, называемые вентиляторами

(для подачи воздуха в топку) и дымососами (для удаления продуктов горения). При разных названиях устройство их в основном одинаково.



Фиг. 82. Измерение разрежения в газоходе U-образным тягомером.



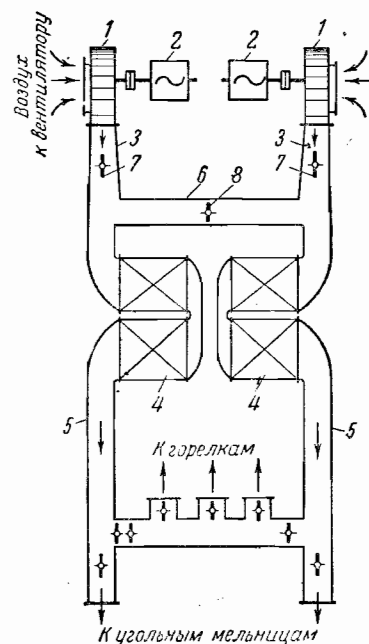
Фиг. 83. Схема центробежного вентилятора.
1—диск с лопатками; 2—кожух; 3—всасывающее отверстие; 4—нагнетательное отверстие.

Давление воздуха на выходе из вентилятора больше атмосферного, поэтому разность давлений, создаваемую вентилятором, часто называют *напором*¹; дымосос, как и дымовая труба, создает разрежение, поэтому разность давлений, создаваемую дымососом, называют *тягой*.

Вентилятор (дымосос — фиг. 83) состоит из диска 1 с насаженными на него лопатками и кожуха 2. В кожухе имеется всасывающий патрубок 3 и нагнетательный 4. Диск сидит на валу, который приводится во вращение электродвигателем за счет энергии, подводимой к нему из сети. При вращении диска во всасывающем патрубке создается разрежение, вследствие чего газы (воздух или продукты горения) извне направляются к этому патрубку и

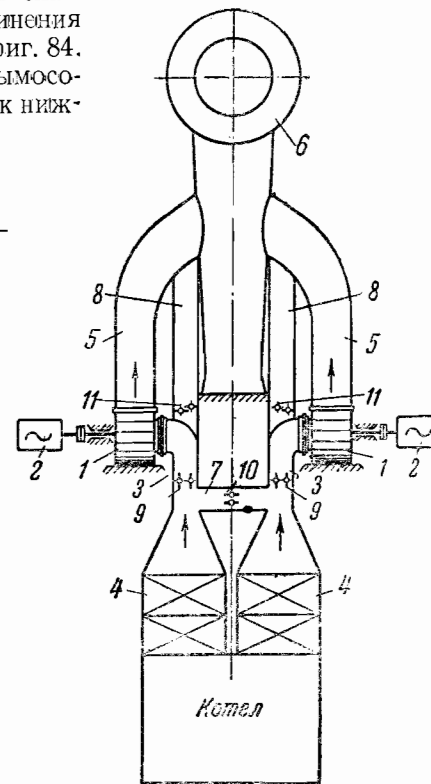
¹ Напором точнее называется энергия (удельная), расходуемая, например, насосом или вентилятором для преодоления сопротивления на пути потока жидкости. Напор, отнесенный к 1 кг вещества, измеряется в кгм/кг (или после сокращения на кг — в м), а отнесенный к 1 м^3 — в кгм/м^3 (после сокращения на м в кг/м^2 , или, что то же, в мм вод. ст.). В первом случае под напором можно понимать энергию, численно равную высоте, на которую поднимается 1 кг вещества. Во втором случае это — энергия, численно равная падению давления на рассматриваемом участке при протекании 1 м^3 вещества. Отсюда и следует, что напор в зависимости от того, к какой единице количества вещества он отнесен, измерять или в м или в мм вод. ст. (а значит и в м вод. ст.).

в дальнейшем поступают в пространство между лопатками и выходят из вентилятора через выходной патрубок. У вентилятора во всасывающий патрубок поступает воздух, а нагнетательный патрубок вентилятора через трубопроводы присоединяют к воздухоподогревателю парового котла, после которого горячий воздух поступает к горелкам, мельнице (в случае пылеугольного отопления) или под цепную решетку (при слоевом сжигании). Схема присоединения вентилятора показана на фиг. 84. Всасывающий патрубок дымососа присоединяют (фиг. 85) к ниж-



Фиг. 84. Схема вентиляторной установки котельного агрегата.

1 — вентилятор; 2 — электромоторы; 3 — воздухопроводы холодного воздуха; 4 — воздухоподогреватель; 5 — воздухопроводы горячего воздуха; 6 — воздухопровод-перемычка; 7 и 8 — дроссельные заслонки.



Фиг. 85. Схема дымососной установки котельного агрегата (с двумя дымососами).

1 — дымососы; 2 — электродвигатели; 3 — газопроводы; 4 — воздухоподогреватель; 5 — газопроводы; 6 — дымовая труба; 7 — газопровод-перемычка; 8 — прямой ход; 9, 10 и 11 — дроссельные заслонки.

ней части дымохода котла (за воздухоподогревателем), нагнетательный — к основанию дымовой трубы. Присоединение дымососа должно быть так осуществлено, чтобы в случае надобности его можно было заслонками отключить для работы котельного агрегата только на тяге, создаваемой дымовой трубой (например, при пуске котла в работу).

Мощность электродвигателя для дымососа (вентилятора) можно подсчитать по следующей формуле:

$$N = \frac{VS}{102 \cdot 3600 \eta} \text{ кВт.} \quad (79)$$

Здесь V — производительность дымососа (вентилятора), $\text{м}^3/\text{час}$; S — расчетное сопротивление, мм вод. ст. ; η — к. п. д. дымососной установки, величина которого составляет 0,5—0,65.

Пример 22. Рассчитать мощность электродвигателя дымососа производительностью $V = 180\,000 \text{ м}^3/\text{час}$ при общем сопротивлении $S = 220 \text{ кг/м}^2$ (или мм вод. ст.); принять $\eta = 0,55$.

По формуле (79) находим:

$$N = \frac{VS}{102 \cdot 3600 \eta} = \frac{180\,000 \cdot 220}{102 \cdot 3600 \cdot 0,55} = 196 \text{ кВт.}$$

Для нормальной работы парового котла и наблюдения за ним необходим ряд устройств и приборов, составляющих его арматуру.

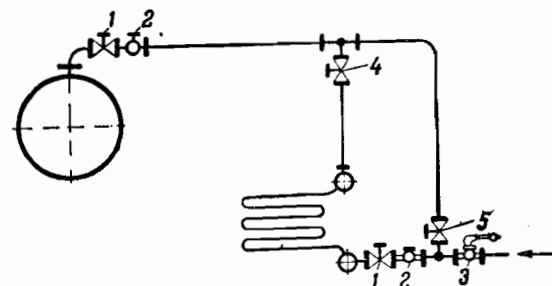
Давление в котле контролируется манометром (фиг. 23), присоединенным к барабану котла на трехходовом кране для возможности проверки его присоединением контрольного манометра. На шкале манометра должна быть нанесена красная черта, указывающая предельное давление, которое допустимо для данного котла. Манометры устанавливают также за перегревателем и на экономайзере.

Чтобы давление не могло превысить допустимого, каждый котел снабжается по крайней мере двумя предохранительными клапанами, которые автоматически открываются и выпускают излишний пар в атмосферу, когда давление станет выше допускаемого для данного котла.

На каждом питательном трубопроводе перед котлом устанавливаются запорный вентиль и питательный (обратный) клапан: первый — для отключения котла от питательной магистрали, второй, не пропускающий

воду в обратном направлении, — для удержания воды в котле в случае падения давления в питательном трубопроводе. Для возможности осмотра обратного клапана запорный вентиль устанавливают ближе к барабану (или экономайзеру), как это показано на фиг. 86. Вместе с тем изображенная схема предусматривает возможность отключения экономайзера, что достигается закрытием вентилей 1 и 4. При работе с экономайзером закрыт вентиль 5.

Для наблюдения за уровнем воды в котле устанавливаются водомерные стекла с тремя кранами, из которых первый — для присоединения к водяному пространству, второй — для присоединения к паровому пространству, третий — для продувки водомерного стекла.



Фиг. 86. Схема питания котла.

1 — запорный вентиль; 2 — обратный клапан; 3 — регулирующийся клапан; 4 и 5 — вентили для переключения

Кроме водомерного стекла, барабан котла должен быть снабжен двумя пробными кранами: одним — на паровом, другим — на водяном пространстве барабана. В случае повреждения водомерного стекла до установки нового пробные краны позволяют судить о правильном положении уровня воды в барабане.

Для отключения котельного агрегата от паровой сети он должен быть снабжен запорным вентилем (или задвижкой). Для удаления из котла шлама и воды с большой концентрацией солей к коллектору или барабану котла присоединяют продувочный вентиль. Котел снабжается, кроме того, отдельной спускной арматурой для удаления из него воды при ремонтах.

Для наблюдения за работой котла на нем устанавливаются разнообразные контрольно-измерительные приборы (КИП), к которым относятся термометры и термопары для наблюдения за температу-

рой пара, воды и газов в различных точках котла, тягомеры для измерения тяги в газоходах, газоанализаторы, паромеры, водомеры и др. Некоторые из приборов снабжаются приспособлениями для записи показаний на бумаге.

34. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Назначение парового котла — давать водяной пар при постоянных давлении и температуре при максимально возможной экономичности и в количестве, определяемом меняющейся нагрузкой потребителя пара.

Режим работы котла, при котором вырабатывается столько пара, сколько отправляется к потребителям, называется установившимся режимом. При этом режиме количества подаваемого в топку топлива и тепла, выделяющегося при его горении, соответствуют тому, что необходимо для образования нужного количества пара. Количество воздуха, поступающего в топку, и газов, покидающих котел, определяются количеством сжигаемого топлива.

Если количество воды, поступающей в барабан, равно по весу количеству пара, выходящего из котла, уровень воды при установившемся режиме в барабане не изменяется. Остается постоянным и давление пара в котле, равное нормальному для него.

Если потребитель начинает отбирать пара больше, чем вырабатывает котел, установившийся режим нарушается. Давление пара в котле начинает уменьшаться, а уровень воды в барабане — понижаться. Для того чтобы восстановить положение, машинист котла (кочегар) должен привести горение в топке в соответствие с увеличившимся потреблением пара из котла. Для этого он увеличивает подачу топлива и воздуха для горения, увеличивает тягу и подачу воды в барабан котла. После всех этих мероприятий уровень воды займет свое прежнее положение, давление пара в котле увеличится, и режим котла вновь станет установившимся. Изменение режима котла может произойти и в обратном направлении — при уменьшении расхода пара из котла. Так осуществляется ручное регулирование котла.

Стремление заменить человеческий труд, где это возможно, работой механизмов и машин привело к созданию автоматического регулирования котельных агрегатов, при котором изменение режима котла производится рядом автоматически действующих устройств.

Автоматическое регулирование котельных установок имеет своей задачей в первую очередь облегчение условий труда. Напряженный человеческий труд по регулированию такого сложного агрегата, каким является котельный агрегат, заменяется при автоматическом регулировании наблюдением за работой элементов системы автоматического регулирования. Уменьшается численность обслуживающего персонала, что в условиях бурно растущей промышленности СССР имеет существенное значение.

Автоматическое регулирование по сравнению с ручным повышает тепловую экономичность агрегата и уменьшает аварийность, так как автоматическое регулирование быстрее и более точно, чем ручное, воздействует на режим агрегата и устраняет возможность ошибок персонала при внезапном изменении режима котла или ликвидации аварии.

Автоматическое регулирование требует высокой квалификации обслуживающего персонала и серьезных знаний, поэтому введение его на электростанциях способствует повышению культурного уровня и тем самым ликвидации существенного различия между трудом физическим и умственным.

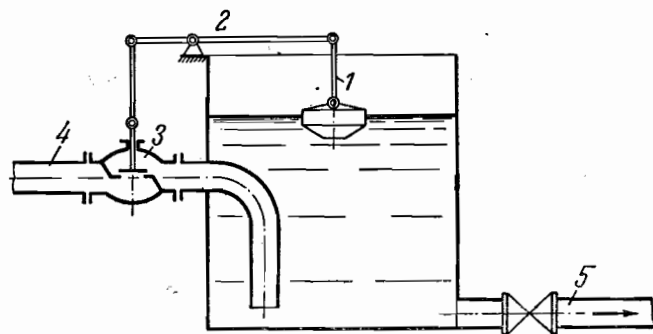
В барабанных котлах система автоматического регулирования осуществляется тремя конструктивно независимыми друг от друга регуляторами: питания котла, процесса горения и температуры.

Простейшая схема регулирования питания водой какого-либо резервуара представлена на фиг. 87. На ней 1 — поплавок (полое тело), изменяющий свое положение при изменении уровня воды в баке; 2 — рычаг, при помощи которого передается воздействие (импульс) регулирующему клапану 3; 4 — трубопровод, по которому вода поступает в бак; 5 — задвижка на трубопроводе, через который вода выходит из бака.

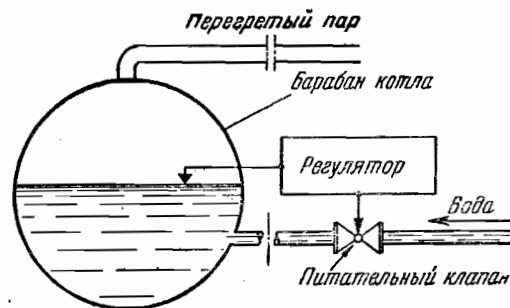
Если расход воды через вентиль 5 увеличивается, то вместе с понижающимся уровнем воды в баке опустится и поплавок 1, что вызовет подъем клапана 3, а вместе с этим увеличение подачи воды в бак и восстановление уровня.

При уменьшении расхода воды через задвижку 5 действия пойдут в обратном порядке.

В паровых котлах не используют поплавок для передачи импульса от уровня воды в барабане. Вместо поплавка существуют другие устройства, однако общим всегда яв-



Фиг. 87. Схема регулирования питания водой резервуара.
1 — поплавок; 2 — рычаг; 3 — регулирующий клапан; 4 — питательная линия; 5 — задвижка.



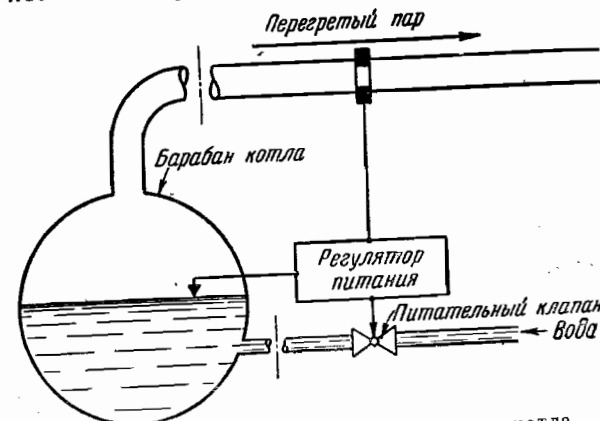
Фиг. 88. Схема одноимпульсного регулятора питания.

ляется направление импульса от уровня воды на клапан, чем изменяется сечение для прохода воды. На фиг. 88 представлена схема так называемого одноимпульсного регулирования питания барабанного котла. На ней стрелками указаны направления импульсов (воздействий). В основном фиг. 88 соответствует предыдущей схеме. Воздействие от уровня, меняющегося при нарушении

баланса между расходом пара и подачей воды, передается на регулятор и от него — на питательный клапан.

Изменения уровня в барабане в сильной степени зависят от размера водяного объема в барабане; они происходят тем резче при изменениях в режиме котла, чем водяной объем меньше.

Как показывает опыт, одноимпульсные регуляторы питания можно с успехом использовать для котлов сравнительно небольшой производительности с барабанами боль-



Фиг. 89. Схема двухимпульсного питания котла.

шой емкости. Для котлов большой производительности с барабанами малой емкости регулирования питания одноимпульсным регулятором недостаточно, и поэтому вводится еще одно добавочное воздействие на регулятор, а именно от расхода пара из котла. Этот импульс получают таким образом. Если в трубопроводе установить шайбу (иначе она называется диафрагмой) с отверстием, меньшим, чем сечение трубы, то давление пара перед шайбой будет больше, чем давление за шайбой; при этом разность давлений будет тем больше, чем больше пара проходит по трубе. Таким образом, разность давлений характеризует количество пара, проходящего по трубопроводу, и может служить импульсом на регулятор. На фиг. 89 представлена схема двухимпульсного регулятора питания; как видно, регулятор питания получает два импульса: от уровня воды и от диафрагмы, установленной на

паропроводе. Эти импульсы складываются, и подача воды точнее следует изменениям нагрузки, чем при одноимпульсном регулировании.

Существует и более сложное, а вместе с тем более ровное регулирование, при котором на регулятор посылается импульс также от количества воды, поступающей в барабан котла. И здесь используется свойство изменения давления при прохождении потока через диафрагму; она устанавливается на трубопроводе, подающем воду в барабан котла. Третий импульс также посылается на регулятор; он складывается с другими двумя импульсами.

Следующий важный участок регулирования — процесс сгорания топлива в топке. Горение при установившемся режиме должно протекать таким образом, чтобы количество выделяющего тепла было как раз достаточным для приготовления в котельном агрегате количества пара, необходимого в данный момент потребителю. Для этого нужно подавать в топку определенное количество топлива и воздуха и удалять из газоходов котла образовавшиеся продукты горения. Если не будет соответствия между процессом горения (количеством выделяющегося тепла) и расходом пара, изменится в первую очередь давление пара в котле.

Отсюда вытекает, что импульс на регулятор, управляющий процессом горения, должен исходить от давления пара в котле. Такой регулятор называется регулятором давления, или главным регулятором. Так он называется потому, что от него посылается в свою очередь импульс на регулятор топлива и на регулятор воздуха.

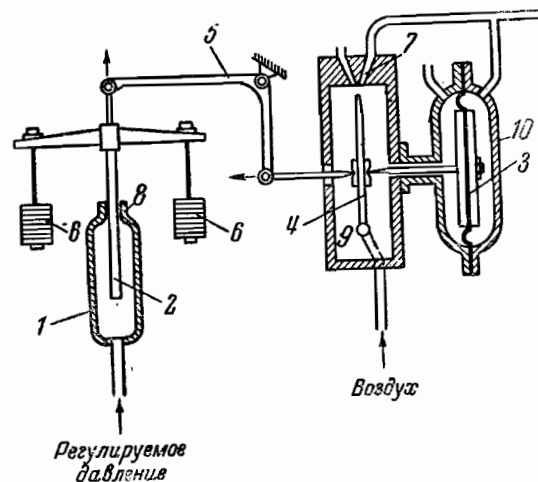
Описанная последовательность воздействия — не единственная, она может принимать и другой порядок.

Существуют различные системы регуляторов горения. В качестве примера рассмотрим в схематическом виде гидравлическую систему.

Схема главного регулятора показана на фиг. 90.

Импульс от давления пара поступает в металлический кожух 1, передается штоку 2, который может передвигаться во втулке 8 вверх и вниз. Этот импульс через рычаг 5 передается на струйную трубку 4, которая может поворачиваться вокруг оси 9, перпендикулярной чертежу, вправо и влево. В струйную трубку поступает воздух под некото-

рым избыточным давлением. Этот, как его называют, командный воздух берут из воздуховода, подающего воздух в топку; из струйной трубки воздух вытекает с большой скоростью. Против устья трубки находится канал 7, куда и поступает командный воздух, причем его давление в канале 7 зависит от положения устья струйной трубки по отношению к каналу 7. При максимально возможном



Фиг. 90. Схема главного регулятора (регулятора давления).

1 — металлический кожух; 2 — шток; 3 — мембрана; 4 — струйная трубка; 5 — рычаг; 6 — грузы; 7 — канал; 8 — втулка; 9 — ось; 10 — кожух.

отклонении вправо устье трубки приходится как раз против канала 7, и давление воздуха в нем наибольшее; при отклонении же влево давление воздуха в канале уменьшается. Командный воздух из канала 7 поступает в кожух 10 с мембраной 3; под действием командного воздуха мембрана изгибается, воздействуя на струйную трубку со стороны, противоположной действию рычага 5. Обе силы, действующие на струйную трубку с противоположных сторон, уравновешиваются грузами 6, укрепленными на траверсе. Вместе с тем давление командного воздуха через канал 7 передается на регулятор топлива (см. далее схему) и на регулятор воздуха. Величина этого давления и является им-

пульсом, от которого зависит количество подаваемых в топку топлива и воздуха.

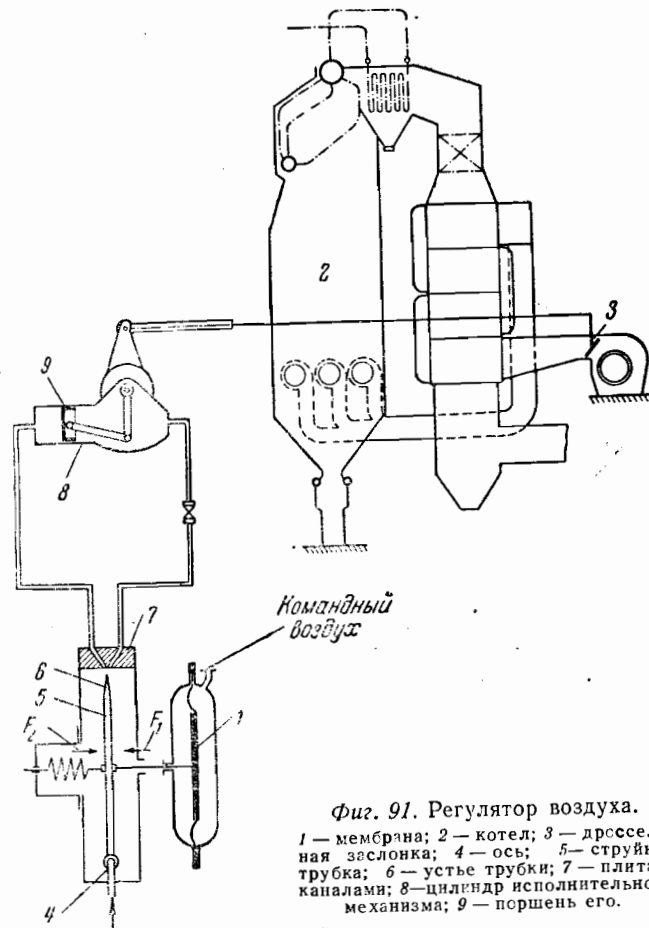
Рассмотрим, как при изменении давления пара в котле меняется давление командного воздуха в канале 7.

При установившемся режиме котла струйная трубка неподвижна; при изменении нагрузки, допустим при увеличении ее, давление пара начинает падать, вследствие чего шток 2 начинает перемещаться вниз, и рычаг 5 отклоняет струйную трубку вправо; вследствие приближения устья трубки к каналу 7 давление командного воздуха в нем будет увеличиваться и мембрана 3 будет оказывать давление влево, противодействуя движению струйной трубки, которая остановится тогда, когда давления на нее справа и слева уравниваются. При этом остановится и шток 2, заняв более низкое положение.

Увеличившееся давление командного воздуха в канале 7 служит импульсом для регуляторов топлива и газов; импульс передается по специальному трубопроводу. Принцип действия этих регуляторов, равно как и регулятора газов, одинаков; рассмотрим схему работы одного из них — регулятора воздуха. Она показана на фиг. 91. Паровой котел 2 снабжается воздухом от вентилятора; количество его регулируется положением заслонки 3. Регулятор воздуха представляет собой устройство, включающее мембрану 1, струйную трубку 5, исполнительный механизм 8. Струйная трубка, как и в главном регуляторе, может вращаться вокруг оси 4 вправо и влево; в нее отдельным масляным насосом масло подается под давлением 4—5 ат и выходит из трубки с большой скоростью.

При установившемся режиме работы котла струйная трубка 5 под действием усилия от мембраны с одной стороны и от соответственно отрегулированной пружины — с другой находится в среднем положении. При нарушении этого режима, например при уменьшении давления пара в котле, давление командного воздуха, подаваемого в стакан, содержащий мембрану, как уже было сказано, увеличивается, и мембрана отклонится влево. Вследствие этого струйная трубка также отклонится влево и при этом приблизится к левому каналу в плите 7 и удалится от правого канала. Это вызовет повышение давления масла в левой полости исполнительного механизма 8 и уменьшение его — в правой; вследствие этого поршень 9 передвинется вправо

и через систему связанных с ним рычагов переставит заслонку 3 в положение, при котором поступление воздуха в топку увеличится. При увеличении давления пара в котле движение элементов регулятора будет идти в обратном



Фиг. 91. Регулятор воздуха.

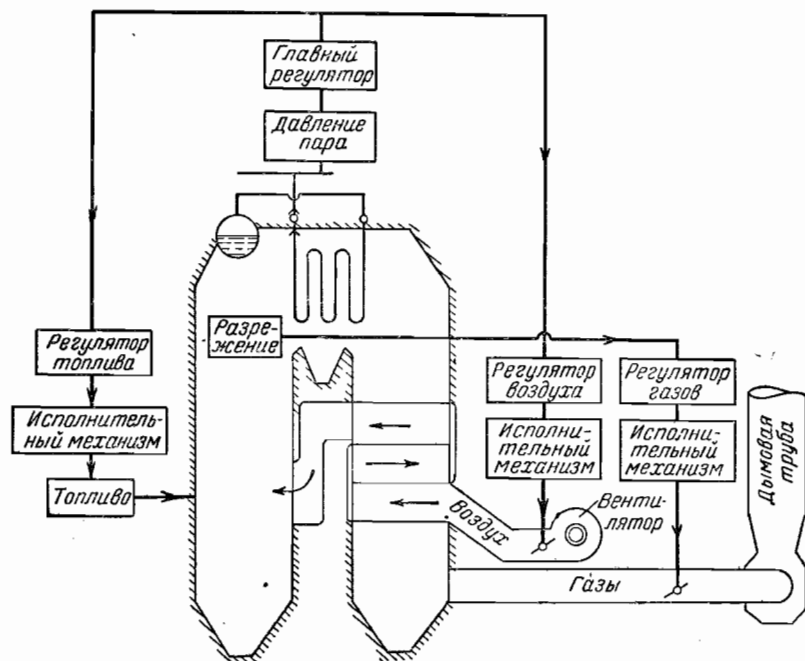
1 — мембрана; 2 — котел; 3 — дроссельная заслонка; 4 — ось; 5 — струйная трубка; 6 — устье трубки; 7 — плита с каналами; 8 — цилиндр исполнительного механизма; 9 — поршень его.

направлении. Процесс регулирования будет продолжаться до тех пор, пока давление пара в котле не восстановится.

Отсос газов из котла производится дымососом; его работа должна быть такой, чтобы в топке поддерживалось благоприятное разрежение, а именно 1—2 мм вод. ст. в верх-

ней части топочного пространства при всех нагрузках котла.

Регулятор газов в отличие от регуляторов топлива и воздуха в рассматриваемой схеме имеет самостоятельный импульс от разрежения в верхней части топки.



Фиг. 92. Схема регулятора горения котлоагрегата.

На фиг. 92 показана схема регулирования процесса горения котельного агрегата в целом. На ней линиями и стрелками показано, откуда берутся импульсы на регуляторы и направление их воздействия. Как указано на схеме, давление пара, выходящего из перегревателя, посылает импульс на главный регулятор, в котором изменяется давление командного воздуха, причем оно увеличивается при уменьшении давления пара и, наоборот, уменьшается при увеличении давления пара. Командный воздух поступает в регулятор топлива, для которого это изменение давления служит импульсом. Под его воздействием регулятор топ-

лива приводит в движение исполнительный механизм, который в свою очередь воздействует на питатель топлива; аналогичным образом командный воздух воздействует на регулятор воздуха. Регулятор газов получает импульс, как уже было указано, от разрежения в топке.

Рассмотренная система регулирования не является единственной. Имеются другие системы — электро-механическая и электронная. Способ передачи импульса от давления пара в котле на исполнительные механизмы и сами исполнительные механизмы в них имеют иные конструкции, но принципы использования тех или иных параметров как импульсов остаются прежними. Эти системы рассматриваются в специальных курсах и требуют знакомства со способами использования электрического тока для приведения в движение тех или иных механизмов.

Осуществление описанной схемы регулирования определяется особенностями процесса горения того или иного топлива. Наиболее просто осуществляется автоматическое регулирование горения жидких и газообразных топлив, наиболее сложно — регулирование в случае использования твердых топлив, в особенности при слоевом их сжигании.

Регулирование температуры перегретого пара производится установкой на тракте перегретого пара теплообменного аппарата — пароохладителя. Принцип регулирования сводится к следующему. Если температура перегретого пара оказывается высокой, пар охлаждают. Охлаждающей средой может служить питательная вода, та или иная часть которой проходит через пароохладитель. Таким образом, в пароохладителе отнимается от пара некоторая часть тепла, вследствие чего его температура уменьшается.

В других случаях температура перегретого пара регулируется впрыском воды в трубопровод перегретого пара. На испарение этой воды расходуется тепло, и температура пара снижается.

Барабаны котлов обладают часто достаточно большой емкостью, поэтому кратковременное несоответствие между количеством воды, поступающей в котел, и количеством отбираемого пара, возникающее при изменении нагрузки котла, влечет за собой не слишком большое и допустимое изменение уровня воды в барабане; в дальнейшем уровень

восстанавливается благодаря работе регулятора питания. Таким образом, в барабанных котлах нет необходимости в очень строгом соответствии количеств подаваемого топлива и воды. Это обстоятельство позволило регулирование питания и процесса горения в барабанных котлах разделить и возложить на два самостоятельных регулятора.

Иначе обстоит дело в прямоточных котлах. Отсутствие в них барабана делает необходимым держать в строгом соответствии процесс горения с питанием котла при данной его нагрузке. Опыт эксплуатации прямоточных котлов показывает, что при правильном соотношении между нагрузкой котла и количеством подаваемого топлива даже небольшое отклонение питания котла от нагрузки вызывает немедленно изменение температуры перегретого пара, поэтому в прямоточных котлах прежде всего осуществляется связанное регулирование подачи топлива и воды под воздействием регулятора давления, а так как изменение давления зависит от нагрузки котла, то этим устанавливается грубое соответствие между нагрузкой котла, подачей топлива и воды. Для более точного регулирования импульс берется и от температуры пара, чем дополнительно регулируется или только подача топлива, или только питание котла. Кроме того, имеются отдельные регуляторы воздуха и разрежения. Для более точного регулирования температуры перегретого пара используется еще регулирование ее впрыском воды после перегревателя.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

35. КЛАССИФИКАЦИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО РАБОЧЕМУ ТЕЛУ И ПРИНЦИПУ ЕГО РАБОТЫ

Тепловыми двигателями называют машины, в которых тепловая энергия, получившаяся при горении того или иного топлива, превращается в механическую энергию. Тепловые двигатели различаются прежде всего по рабочему телу и принципу работы его в двигателе; от последнего обстоятельства больше всего зависит конструктивное выполнение двигателя.

Рабочим телом для двигателей служит, как уже указывалось, тело в газообразном состоянии, потому что газ в большой степени способен к изменению объема, а именно при изменении объема, как сказано в § 13, и совершается работа.

Газообразное состояние рабочего тела можно получать двумя принципиально различными способами. В одном случае внутри двигателя производится сжигание топлива; получающиеся продукты горения и служат рабочим телом в двигателе. В другом случае топливо сгорает вне двигателя, в топке парового котла, в котором из воды готовится водяной пар; по трубопроводу пар направляется к двигателю.

По своей физической природе эти два газообразных тела резко различаются. Продукты горения трудно превратить в жидкое состояние и потому их можно рассматривать как идеальный газ, т. е. применять к ним законы Бойля-Мариотта и Гэ Люссака. Водяной пар, полученный в котле, наоборот, при некотором охлаждении снова превращается в жидкое состояние, так что его рассматривать как идеальный газ нельзя. В таком состоянии это газообразное тело называют реальным газом, и к нему упомянутые законы не могут быть применены. Расчеты, связанные с водяным паром как рабочим телом в тепловых

двигателях, производят, пользуясь таблицами и диаграммами, описанными в § 18 и 19.

Итак, рабочими телами в двигателях служит идеальный газ (продукты горения) или водяной пар.

И то и другое рабочее тело после своего образования имеет давление и температуру, более высокие, чем давление и температура окружающей среды. И то и другое тело способно расширяться и совершать работу; следовательно, как уже отмечалось, и то и другое тело обладает потенциальной энергией.

Потенциальная энергия рабочего тела по-разному может быть преобразована в механическую энергию вращения вала двигателя. В одном случае рабочее тело поступает в цилиндр с подвижным поршнем и здесь расширяется. Работа расширения передается поршню, который при помощи кривошипно-шатунного механизма соединен с валом двигателя. Так возникает механическая энергия вращения вала, которая используется электрическим генератором или какой-либо машиной. Поршень двигателя совершает возвратно-поступательные движения, т. е. движется попеременно в ту и другую стороны. Рабочее тело после расширения выбрасывается в атмосферу или вновь используется для совершения работы. Описанный двигатель называется поршневым двигателем.

Рабочим телом в поршневом двигателе служит идеальный газ или водяной пар. При использовании идеального газа как рабочего тела поршневой двигатель называется двигателем внутреннего сгорания. Такое название он получил потому, что сгорание рабочего тела происходит в самом двигателе. При использовании водяного пара как рабочего тела поршневой двигатель называется паровой машиной.

Потенциальная энергия рабочего тела может быть использована и иным путем. При истечении из сопел, как это было изложено при описании фиг. 1 и 2, потенциальная энергия превращается в кинетическую энергию движения газообразного тела, которая передается лопаткам на дисках, насаженных на вал двигателя. Движение лопаток и вызывает вращение вала. Описанный двигатель называется турбиной (от латинского слова *turbo* — круговое движение).

При использовании идеального газа в качестве рабочего тела такой двигатель называется газовой турбиной,

при использовании же водяного пара — паровой турбиной.

Особняком от описанных стоят так называемые реактивные двигатели. Рабочим телом в них служат продукты сгорания топлива. Потенциальная энергия, так же как в турбинах, превращается здесь в кинетическую энергию движения, которая, однако, используется для получения не вращательного, а поступательного движения, например, для движения самолета, ракеты, автомобиля и др.

На основании изложенного можно составить следующую таблицу тепловых двигателей:

Рабочее тело \ Тип двигателя	Поршневой	Турбинный	Реактивный
	Поршневой	Турбинный	Реактивный
Идеальный газ	Двигатель внутреннего сгорания	Газовая турбина	Реактивный двигатель
Водяной пар	Паровая машина	Паровая турбина	—

36. ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Эти двигатели работают на жидком и газообразном топливах. Используемые жидкие топлива — это в первую очередь продукты переработки нефти. Сюда относятся различного рода бензины и керосины, соляровое масло, мазут. Каждое из этих топлив по своим качествам имеет дальнейшие подразделения и в зависимости от своих свойств используется в тех или иных двигателях. Жидкое топливо получается и из некоторых сортов твердого топлива (см. § 28).

Жидкие топлива прежде всего различаются по способности их к испарению. Некоторые из них — бензины и керосины — легко испаряются при невысокой температуре, поэтому приготовление необходимой для работы двигателя горючей смеси, т. е. смеси паров топлива и воздуха, может быть произведено вне цилиндра двигателя. Это внешнее смесеобразование происхо-

дит в особом устройстве двигателя — карбюраторе. Двигатели, использующие этот метод смесеобразования, называются карбюраторными двигателями.

Трудно испаримые сорта топлива нуждаются для испарения в высокой температуре; благоприятные для этого процесса условия можно создать внутри цилиндра двигателя, где испарение и производится; такое приготовление горючей смеси называется внутренним смесеобразованием.

Способ приготовления горючей смеси оказывает на конструкцию двигателей большое влияние. Двигатели с внешним смесеобразованием вследствие их относительно малого веса используются в первую очередь в легких транспортных и тяговых установках (самолет, автомобиль, трактор). Двигатели с внутренним смесеобразованием получают конструктивно более тяжелыми, поэтому они пригодны в первую очередь для работы в стационарных установках или на судах. Однако в последние годы двигатели с внутренним смесеобразованием устанавливаются и на некоторых транспортных установках.

Рассмотрим процессы, происходящие в цилиндре двигателя с внешним смесеобразованием. Вначале мы упростим сложные явления, происходящие в двигателе, для того чтобы обратить внимание на основной принцип его работы; мы, таким образом, рассматриваем его работу теоретически, т. е. рассматриваем так называемый идеальный двигатель.

На фиг. 93 представлена простейшая схема цилиндра такого двигателя, а над ним — упрощенная диаграмма изменения давления при изменении объема газа в цилиндре.

При первом ходе поршня слева направо через впускной клапан *A*, устроенный в крышке, в цилиндр поступает горючая смесь — воздух с парами топлива.

Давление в цилиндре при этом почти постоянно, а изменение объема между поршнем и крышкой представится на диаграмме линией *CD*. Когда поршень приходит в крайнее правое положение, клапан *A* закрывается. Затем поршень начинает двигаться справа налево и при этом 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 повышается до 6—12 *атм*, а температура газов — до 400—600° К. Процесс сжатия представлен на диаграмме линией *DE*. Уменьшение объема горючей смеси при сжатии называется степенью сжатия. Если обозначить начальный объем горючей смеси V_1 , а объем после сжатия — V_2 , то степень сжатия, обозначаемая греческой буквой ϵ , может быть представлена так:

$$\epsilon = \frac{V_1}{V_2}. \quad (80)$$

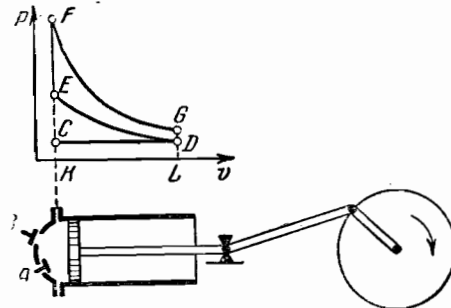
Когда поршень приходит в крайнее левое положение, происходит зажигание горючей смеси (например, при помощи электрической искры).

При сгорании смеси выделяется тепло, которое идет на нагревание образовавшихся продуктов сгорания. Давление при этом повышается до 25—50 *атм*, а температура до 2 000—2 300° К.

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 *EF*. Такой подвод тепла является основной характеристикой цикла, по которому работает двигатель. Отсюда этот цикл называется циклом с подводом тепла при постоянном объеме (или циклом двигателей быстрого сгорания).

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 до величины, соответствующей точке *D*. После этого поршень начинает двигаться справа налево и выталкивает оставшуюся в цилиндре часть газов.



Фиг. 93. Цикл двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при постоянном объеме.

Когда поршень приходит в свое крайнее левое положение, цикл заканчивается и может быть повторен.

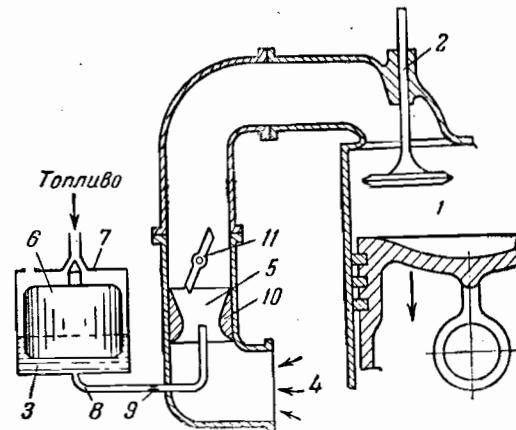
В течение всего цикла поршень совершил 2 раза путь слева направо и 2 раза справа налево, всего четыре хода или, как говорят, совершил четыре такта. Такой двигатель называется четырехтактным. Из всех четырех тактов только в одном, третьем, получается работа, заставляющая поршень двигаться и вращать вал. В остальные три такта, наоборот, поршень движется благодаря вращению вала с маховиком, в котором запасена механическая энергия от предыдущих циклов, или за счет работы поршней 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 цикл происходит два оборота вала, а в двухтактном — один. Вследствие этого двухтактные двигатели при прочих равных условиях обладают мощностью, почти в 2 раза большей, чем четырехтактные.

Устройство двухтактных двигателей с внешним смесеобразованием невыгодно, так как в этом случае продувать цилиндр пришлось бы горючей смесью и такая продувка сопровождалась бы потерей горючей смеси. Двухтактные двигатели с внешним смесеобразованием устанавливаются на некоторых типах мотоциклов.

На диаграмме можно проследить, какое количество работы передано рабочим телом валу машины за 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.

Горючая смесь для описанного двигателя, как было указано, готовится в карбюраторе. Рассмотрим простейший карбюратор (фиг. 94), предназначенный для работы на двигателе с постоянным числом оборотов. На изображенной схеме 1 — часть цилиндра двигателя с поршнем; 2 — впускной клапан двигателя; 3 — поплавковая камера карбюратора, содержащая топливо — бензин; 4 — поступление воз-



Фиг. 94. Простейший карбюратор.

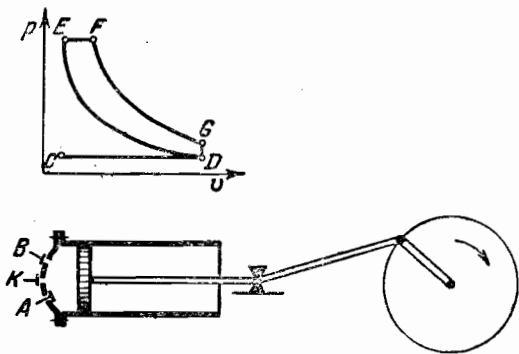
1 — цилиндр двигателя с поршнем; 2 — впускной клапан двигателя; 3 — поплавковая камера карбюратора; 4 — поступление воздуха; 5 — смесительная камера; 6 — пустотелый поплавок с игольчатым клапаном; 7 — отверстие для бензина; 8 — трубка; 9 — жиклер; 10 — диффузор; 11 — заслонка.

духа; 5 — смесительная камера карбюратора; 6 — пустотелый поплавок, имеющий игольчатый клапан, который закрывает отверстие 7, когда доступ бензина в камеру следует прекратить, и открывает его, когда камеру нужно пополнить бензином. Поплавковая и смесительная камеры соединены трубкой 8, имеющей калиброванное отверстие — жиклер 9. Трубка подходит к сужению 10, называемому диффузором. При неработающем двигателе бензин не вытекает из трубки, так как конец ее в смесительной камере расположен немного выше, чем уровень бензина в камере. При работе, когда поршень идет вниз, воздух поступает к диффузору и здесь вследствие сужения проходит с большой скоростью, создавая разрежение около устья трубки. Бен-

зин начинает вытекать из трубки, подхватывается струей воздуха, распыляется и испаряется. Через открывшийся клапан получившаяся горючая смесь поступает в цилиндр двигателя. Количество ее регулируется положением заслонки (дросселя) *11*.

Рассмотрим теперь другой двигатель внутреннего сгорания (фиг. 95), характерным признаком которого является подвод тепла к рабочему телу при постоянном давлении и.

В этом двигателе при движении поршня слева направо засасывается через впускной клапан *A* не горючая смесь,



Фиг. 95. Цикл двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при постоянном давлении.

как в рассмотренном ранее цикле, а воздух (линия *CD*). Когда поршень приходит в крайнее правое положение, впускной клапан закрывается, и при следующем такте, т. е. когда поршень движется справа налево, воздух сжимается (линия *DE*). При этом давление повышается до 30—40 *атм*, а температура до 800—900° К. В начале третьего такта открывается клапан *K* (форсунка) для впуска топлива. Жидкое топливо впрыскивается в цилиндр и здесь самовозгорается. При подводе топлива температура получающихся газов поднимается до 1700—1900° К; топливо вводится и сгорает постепенно, так что при расширении давление остается почти постоянным; отсюда этот цикл называется циклом с подводом тепла при постоянном давлении (или циклом двигателей постепенного сгорания). 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.

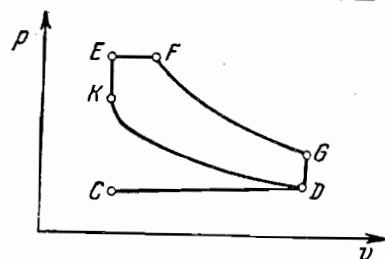
Именно двигатели с внутренним смесеобразованием пригодны для выполнения их двухтактными, так как продувка в них производится воздухом. Тем не менее очень быстроходные двигатели этого типа выполняются четырехтактными, так как при двух тактах и большом числе оборотов (1500—3000 об/мин) в двухтактном двигателе трудно осуществить достаточно тщательную продувку цилиндра и заполнение его воздухом.

Двигатели, работающие по описанному циклу, называются «дизелями» по имени конструктора Дизеля, принявшего участие в разработке первоначальной конструкции такого двигателя.

Последующая конструктивная разработка привела к созданию двигателя внутреннего сгорания достаточно экономичного и работающего на сырой нефти (вместо керосина в первоначальных конструкциях). Такой двигатель был впервые в 1899 г. сконструирован русскими инженерами на заводе «Русский дизель»; в России же в 1908 г. был построен и первый судовой двигатель внутреннего сгорания.

Подробное сравнение описанных способов подвода тепла показывает, что подвод тепла с соблюдением постоянства объема выгоднее по расходу топлива, чем подвод тепла при постоянном давлении; однако, как можно видеть по чертежу, при этом способе подвода тепла быстро нарастает давление. Поэтому в дизелях стали использовать оба способа и организуют подвод тепла таким образом: сначала он происходит при постоянном объеме, а когда давление поднимется до такого значения, выше которого идти не же-

лают (45—60, а иногда 100 *ата*), дальнейший подвод тепла производят при постоянном давлении. Получающийся цикл называют циклом со смешанным подводом тепла.

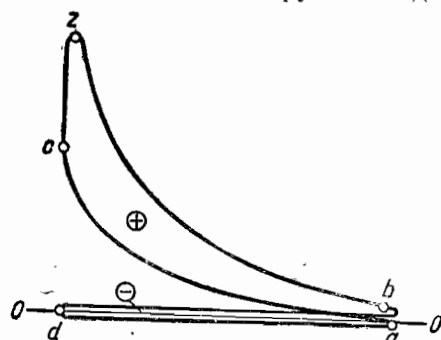


Фиг. 96. Цикл двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом тепла.

Такой цикл изображен на фиг. 96. На ней поперечному CD — засасывание воздуха, DK и FG — адиабатические процессы сжатия и расширения; KE — подвод тепла при постоянном объеме, а EF — при постоянном давлении.

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



Фиг. 97. Индикаторная диаграмма двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом тепла.

aa — атмосферная линия; da — линия впуска; ac — линия сжатия; cz — линия сгорания; zb — линия расширения; bd — линия выпуска.

двигателем. Кроме того, такая диаграмма позволяет выявить имеющиеся у двигателя недостатки.

На фиг. 97 изображена индикаторная диаграмма двигателя, работающего по циклу со смешанным подводом тепла. Площадь диаграммы, в которой стоит знак плюс (+), изме-

действительного двигателя можно получить при помощи особого прибора, называемого индикатором. Этот прибор вычерчивает величину давления газа в цилиндре двигателя по ходу поршня. В результате получается изображение цикла за четыре такта. Получаемая диаграмма носит название индикаторной диаграммы. Она служит для подсчета работы, производимой

рует работу газа в цилиндре — она положительна; площадь, в которой стоит знак минус (—), показывает потерю работы в результате засасывания воздуха и выталкивания продуктов сгорания. Отрицательной она получается потому, что на выталкивание продуктов сгорания тратится больше работы, чем получается при засасывании воздуха.

Двигатели внутреннего сгорания различаются и по способу зажигания горючей смеси. Различают по этому признаку двигатели с посторонним зажиганием и с самовоспламенением (воспламенение от сжатия). В описанных двигателях с внешним смесеобразованием, в которых засасывается горючая смесь, температура которой после сжатия невысока, зажигание производится от постороннего источника, обыкновенно от электрической искры, проскакивающей между электродами запальной свечи, устраиваемой в крышке цилиндра.

Для получения искры чаще всего применяется специальный электрический генератор высокого напряжения — магнето.

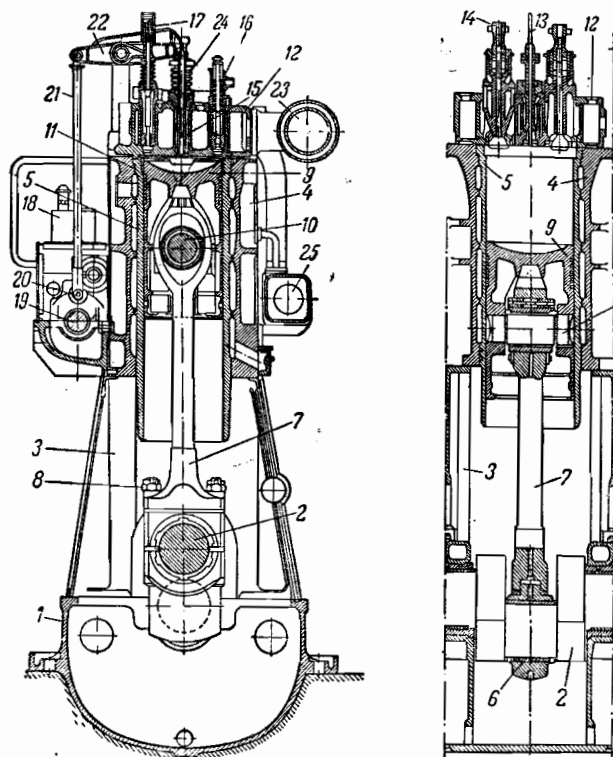
В дизелях (в них засасывается воздух) происходит самозажигание топлива. Для этого в процессе сжатия воздуха перед поступлением топлива должна быть достигнута высокая температура — выше температуры воспламенения вводимого в сжатый воздух распыленного жидкого топлива. Вдувание топлива в некоторых дизелях совершается сжатым воздухом, получаемым при помощи особых машин — компрессоров, составляющих непременную принадлежность такого двигателя. Компрессор приводится в движение от главного вала двигателя.

Такие, как их называют компрессорные, дизели выпускались на первом этапе использования двигателей внутреннего сгорания. В дальнейшем удалось освободиться от воздушного вдувания топлива как способа мало экономичного и мало надежного. Воздушный компрессор был заменен насосом, который под большим давлением (200—350 *ата*) вводит топливо в цилиндр через форсунку специальной конструкции. Первый такой бескомпрессорный дизель был построен в России в 1908 г. по проекту проф. В. И. Гриневецкого.

В настоящее время выпускаются только бескомпрессорные дизели. Они работают в большинстве случаев по смешанному циклу, который впервые был осуществлен

в двигателе конструкции русского инженера Г. В. Тринклера (1901 г.).

Поперечный разрез такого двигателя представлен на фиг. 98.



Фиг. 98. Поперечный разрез бескомпрессорного дизеля.

1 — фундаментная рама; 2 — коленчатый вал; 3 — стойка; 4 — цилиндр; 5 — цилиндрическая втулка; 6 — вкладыш нижней головки шатуна; 7 — шатун; 8 — шатунный болт; 9 — поршень; 10 — поршневой палец; 11 — поршневые кольца; 12 — крышка цилиндра; 13 — выпускной клапан; 14 — выпускной клапан; 15 — форсунка; 16 — предохранительный клапан; 17 — пусковой клапан; 18 — топливный насос; 19 — распределительный вал; 20 — ролик штанги; 21 — штанга привода клапана; 22 — рычаг привода клапана; 23 — выпускной коллектор; 24 — пружина клапана; 25 — воздушный коллектор.

Как показывает теоретическое рассмотрение циклов, по которым работают двигатели внутреннего сгорания, их термический к. п. д. в основном определяется степенью сжатия, причем с увеличением степени сжатия увеличи-

вается и экономичность (термический к. п. д.) двигателя. Вследствие этого при конструировании двигателей внутреннего сгорания стараются обеспечить возможно большую степень сжатия, однако для каждого типа двигателя есть предел, выше которого не идут. Для двигателей с внешним смесеобразованием предел степени сжатия ставится склонностью топлива к детонации. Так называют наблюдаемую у некоторых топлив способность к весьма быстрому, наподобие взрыва, сгоранию, сопровождающемуся сильными толчками и ударами, могущими повести к авариям. Способность топлива к детонации для каждого топлива характеризуется показателем, который называется октановым числом: чем это число больше, тем способность к детонации меньше. Чтобы избежать детонации в двигателях с внешним смесеобразованием, не идут на степени сжатия выше 5—7. В двигателях с внутренним смесеобразованием и самовоспламенением — дизелях — предел увеличения степени сжатия ставится конструктивными и экономическими соображениями: рост давления, происходящий при увеличении степени сжатия, требует утолщения стенок цилиндра, увеличения размеров других деталей и приводит к утяжелению двигателя. Увеличиваются также потери на трение. Поэтому, несмотря на рост термического к. п. д., повышение степени сжатия выше определенного предела становится невыгодным.

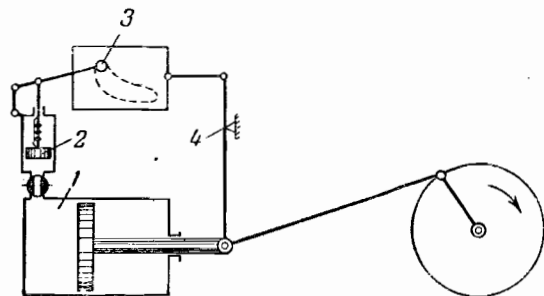
37. МОЩНОСТЬ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ. КОЭФФИЦИЕНТЫ. БАЛАНС ТЕПЛА. РАСХОД ТОПЛИВА

Мощность двигателя, т. е. работа, производимая им в единицу времени, различна в зависимости от того, в каком месте двигателя она измерена. С этой точки зрения различают индикаторную, или внутреннюю, эффективную и электрическую мощности.

Внутренняя мощность — это та, которую развивает рабочее тело в цилиндре двигателя.

Особым прибором, называемым индикатором, эта мощность у поршневых двигателей может быть измерена. Поэтому внутренняя мощность называется еще индикаторной. Схема индикатора изображена на фиг. 99. Его назначение — непрерывно записывать в определенном масштабе (в течение цикла) давление газа в цилиндре при

перемещении поршня. Осуществляется это следующим образом. Давление газа в цилиндре 1 двигателя через патрубок с краном передается в цилиндр индикатора, в котором ходит поршень 2 со штоком, нагруженный пружиной. Для пружин известен масштаб, указывающий, какое сжатие пружины (т. е. поднятие поршня индикатора) соответствует 1 ат. Положение поршня индикатора, таким образом, зависит от давления газа в цилиндре двигателя. Оно записывается карандашом 3, связанным со штоком поршня индикатора,



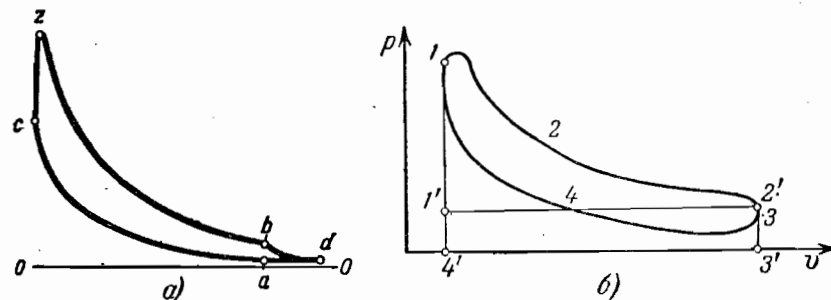
Фиг. 99. Схема индикатора.

1 — цилиндр двигателя с поршнем; 2 — поршень индикатора; 3 — карандаш; 4 — неподвижная точка.

на бумаге, передвигающейся при помощи рычага, соединенного с поршнем двигателя. Рычаг имеет неподвижную точку 4, делящую всю длину его на такие две части, что ход бумаги, на которой записывается давление газа, меньше хода поршня в несколько раз. За один оборот вала карандаш индикатора вычерчивает диаграмму, изображенную на фиг. 100, а. Такая диаграмма получается для двухтактного двигателя. Для четырехтактного она имеет вид, показанный на фиг. 97.

В § 15 уже указывалось, что на диаграмме, на которой по оси абсцисс откладывается объем, а по оси ординат — давление, площадь под кривой процесса измеряет работу газа. На индикаторной диаграмме имеются две кривые: верхняя кривая между крайними точками диаграммы представляет собой кривую расширения, нижняя — кривую сжатия. Если вычертить линию абсолютного нуля давления, то можно в отдельности найти работу расширения и работу сжатия и — как разность между ними — по-

лезную работу газа внутри цилиндра. Однако в вычерчивании линии абсолютного нуля давления нет необходимости, так как легко видеть, что площадь, очерченная индикаторной диаграммой (площадь внутри индикаторной диаграммы), измеряет эту работу. Специальным прибором, называемым *планиметром*, или другими способами можно определить эту площадь. Если теперь ту же площадь представить в виде прямоугольника с основанием, равным длине индикаторной диаграммы, то высота этого прямо-



Фиг. 100. Индикаторная диаграмма.

а — индикаторная диаграмма двухтактного двигателя; со — атмосферная линия; б — момент открытия выпускных клапанов; d — положение в мертвой точке; а — момент закрытия выпускного клапана (начало сжатия), б — среднее индикаторное давление.

угольника в масштабе пружины индикатора даст среднее индикаторное давление. Таким образом, если f — площадь индикаторной диаграммы, мм², l — длина диаграммы, мм, а m мм/ат — масштаб пружины индикатора, то среднее индикаторное давление p_i можно выразить такой формулой:

$$p_i = \frac{f}{lm} \text{ ат;} \quad (81)$$

Если на фиг. 100, б 1-2-3-4-1' — индикаторная диаграмма, снятая индикатором с работающего двигателя, а 1'-2'-3'-4'-1' — равновеликий ей прямоугольник, то отрезки 1'-4' и 2'-3' измеряют в масштабе пружины индикатора среднее индикаторное давление. Очевидно, это такое *фиктивное и одинаковое в течение одного хода поршня* давление газа на поршень, которое дает ту же работу, что и *переменное действительное* давление газа.

Так определяют для работающего двигателя среднее индикаторное давление. Зная его, можно подсчитать и индикаторную мощность. Сначала определяют работу газа за цикл; ее можно определить как произведение постоянной силы на путь; если F — площадь поршня и S — ход его, то Fp_i — постоянная сила, действующая на поршень, а внутренняя работа газа L_i за цикл составит:

$$L_i = Fp_i S. \quad (82)$$

Здесь произведение FS представляет собой объем V , описанный поршнем; таким образом,

$$L_i = Vp_i, \quad (83)$$

откуда

$$p_i = \frac{L_i}{V}. \quad (84)$$

Полученное выражение показывает, что среднее индикаторное давление можно определить как работу газа внутри цилиндра, приходящуюся на единицу объема, описанного поршнем.

При n оборотах в единицу времени внутренняя мощность N_i подсчитывается для двухтактного двигателя по формуле

$$N_i = Fp_i S n = Vp_i n. \quad (85)$$

Входящие в это выражение величины нужно брать в соответственных единицах измерения. Так, если F измерено в m^2 , p_i — kg/m^2 , S — m , а n — об/мин, то

$$N_i = \frac{V \cdot p_i n}{60 \cdot 75} \text{ л. с.} \quad (86)$$

Для четырехтактного двигателя, в котором рабочий цикл совершается за два оборота вала, соответственно

$$N_i = \frac{V p_i n}{60 \cdot 75 \cdot 2} \text{ л. с.} \quad (87)$$

Для дизелей $p_i = 5,5 \div 7 \text{ ат}$, для карбюраторных двига-

Однако не вся работа, совершенная газом внутри цилиндра двигателя, может быть использована. Часть этой работы тратится на преодоление трения в соприкасающихся частях двигателя, на привод продувочного и масляного насосов, на наполнение цилиндра горючей смесью. Поэтому мощность, которая получается на валу двигателя, называемая эффективной мощностью (N_e), всегда меньше индикаторной мощности N_i . Эффективная мощность работающего двигателя может быть определена опытным путем. Отношение

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} \quad (88)$$

называется механическим к. п. д. Для двигателей $\eta_m = 70 \div 85\%$.

Если эффективная мощность двигателя используется для получения электрической энергии, то легко измерить электрическую мощность, вырабатываемую генератором электрического тока. Она будет меньше эффективной мощности двигателя, так как часть механической энергии не превращается в электрическую, а переходит в тепловую и теряется бесполезно. Соединение вала двигателя и вала генератора осуществляется при помощи муфты или ременной передачи. В первом случае потери будут только в генераторе — на нагревание его обмоток и трение в подшипниках. Отношение электрической мощности N_e к эффективной мощности N_i называется к. п. д. генератора:

$$\eta_e = \frac{N_e}{N_i}. \quad (89)$$

При наличии ременной передачи нужно еще учесть потери в ней.

Рассмотрим теперь в общих чертах, на что расходуется энергия, выделяющаяся при сгорании топлива в цилиндре двигателя, или, иначе говоря, составим баланс тепла для двигателя.

Как мы видели, 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 эффектив-

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 теплота также не используется для превращения ее в механическую энергию и считается потерянной. Эту потерю называют потерей с охлаждающей водой. Наконец, некоторая часть тепла теряется в окружающую среду, нагревая воздух машинного зала.

Если принять за 100% тепло топлива, выделившееся при сгорании, то для двигателя с внутренним смесеобразованием и самовоспламенением средней экономичности распределение тепла по указанным статьям расхода будет следующее:

в механическую энергию переходит	32%
потеря с охлаждающей водой	28%
. . . отходящими газами и в окружающую	
среду	32%
потеря на трение и нагнетание воздуха (ком-	
прессор)	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 неизбежно должно быть передано холодному источнику для того, чтобы произошел процесс преобразования тепловой энергии в механическую.

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. Выходящие из двигателя газы также 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, установ-

ках (автомобиль, самолет), где возможности использования тепла отходящих газов и охлаждающей воды чрезвычайно ограничены (главным образом это тепло может быть использовано для обогрева кабин). В стационарных же установках, где отходящее тепло легче использовать, двигатели внутреннего сгорания применяются редко, в основном потому, что они работают на жидком и газообразном топливах, запасы которых меньше запасов твердого топлива.

Для стационарных установок применяют главным образом паровые двигатели, так как для них может быть использовано твердое и притом низкосортное топливо.

Мощность, полученную на валу двигателя, т. е. эффективную мощность, 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., то расход топлива на эффективный силов-час (э. с. ч.) может быть определен по формуле

$$b_e = \frac{632}{Q_n^p \eta_e} \text{ кг/э. с. ч.} \quad (90)$$

Смысл приведенной формулы становится понятным из следующих соображений: Q_n^p — это низшая теплота сгорания рабочего топлива, т. е. то количество тепла в ккал, которое выделяется при полном сгорании 1 кг топлива; так как η_e учитывает долю тепла, превращаемого в механическую энергию, то произведение $Q_n^p \eta_e$ дает в ккал количество тепла, которое переходит в работу на валу двигателя, иначе говоря механическую энергию, получаемую на валу двигателя при сжигании 1 кг топлива. Так как получение 1 сило-часа на валу (э. с. ч.) равносильно получению 632 ккал механической энергии, то нужно, очевидно, на 1 сило-час затратить столько килограммов топлива, сколько раз произведение $Q_n^p \eta_e$ содержится в 632. Это можно узнать, разделив 632 на $Q_n^p \eta_e$. Так и поступают по формуле (90).

Наоборот, если испытанием найден расход топлива на эффективный сило-час, то эффективный к. п. д. может быть вычислен по формуле

$$\eta_e = \frac{632}{Q_n^p b_e} \quad (91)$$

Эту формулу можно объяснить следующим образом: произведение $Q_n^p b_e$ представляет собой количество тепла в калориях, затраченное 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 $Q_n^p b_e$. Это и будет значение эффективного к. п. д. двигателя.

Пример 23. Двигатель внутреннего сгорания мощностью 200 э. л. с при полной нагрузке расходует 40 кг нефти в час. Теплота сгорания нефти $Q_n^p = 10\,000$ ккал/кг. Найти эффективный к. п. д. двигателя.

Вычислим сначала расход топлива на эффективный сило-час.

$$b_e = \frac{40}{200} = 0,2 \text{ кг/э. с. ч.}$$

Далее, по формуле (91) находим:

$$\eta_e = \frac{632}{10\,000 \cdot 0,2} = 0,316,$$

или в процентах

$$\eta_e = 31,6\%.$$

38. ПАРОВЫЕ МАШИНЫ

Паровая машина была первым изобретенным тепловым двигателем. Вначале (XV—XVII вв.) такие двигатели использовались для поднятия воды на высоту и для откачки воды из шахт; первые паровые машины были крайне несовершенны.

Впервые в виде универсального двигателя непосредственно для привода заводских механизмов и машин-орудий паровая машина была создана талантливым механиком-изобретателем, первым русским теплотехником И. И. Ползуновым.

В условиях крепостнической России дело И. И. Ползунова не получило развития. После нескольких месяцев ра-

боты вследствие незначительной аварии в котле машина уже после смерти Ползунова была остановлена и более не применялась.

Паровая машина отличается простотой устройства, надежностью и долговечностью в работе. Она допускает значительную перегрузку и может пускаться в ход под нагрузкой. Это делает ее очень удобной к применению на железнодорожном транспорте, где она и является в настоящее время преимущественно применяемым двигателем. Большое распространение имеют локомобили — агрегаты, соединяющие в одном устройстве котел и паровую машину. В СССР имеется ряд заводов, строящих локомобили.

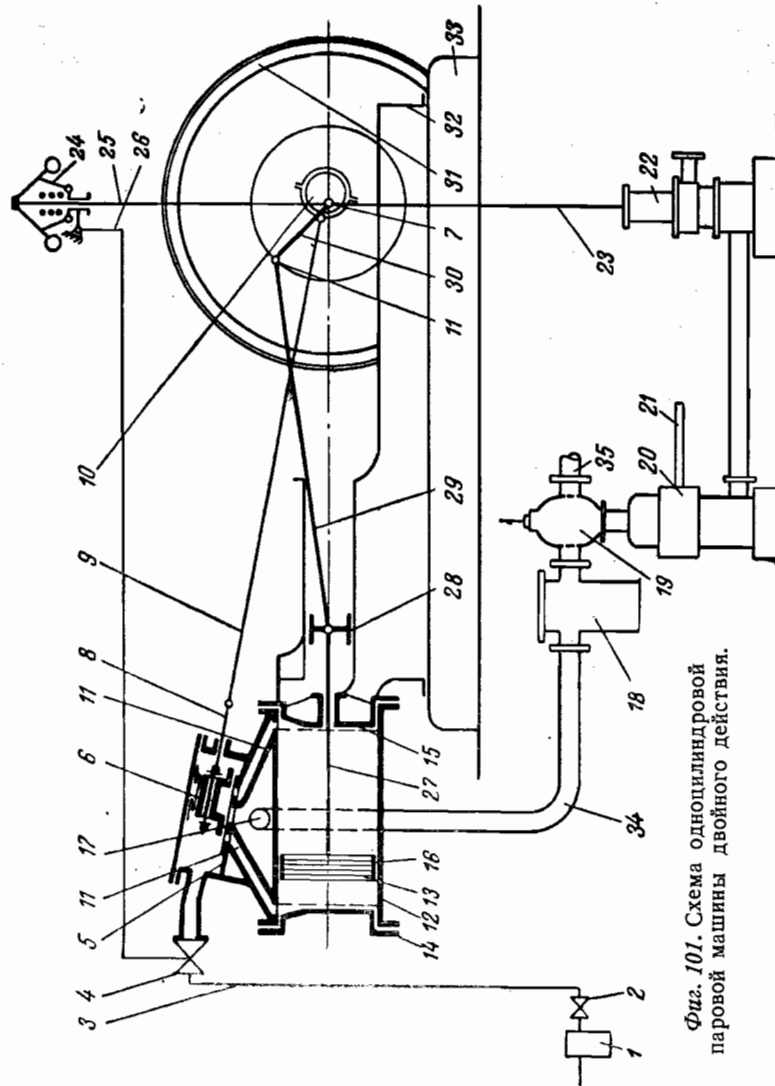
В последние годы с ростом давления пара, используемого в двигателях, намечается использование быстроходных паровых машин в речном и автотранспорте. Паровые машины с большим числом оборотов и повышенным давлением пара могут найти широкое применение на колхозных электростанциях для снабжения электроэнергией и теплом колхозного производства (колхозные теплоэлектроцентрали).

На центральных электрических станциях паровые машины уже давно не используются вследствие их малой экономичности и громоздкости.

Рассмотрим кратко принцип работы паровой машины. В качестве примера возьмем одноцилиндровую паровую машину двойного действия, т. е. такую, в которой пар работает по обе стороны поршня.

Схема такой машины представлена на фиг. 101. Водяной пар из парового котла поступает через водоотделитель 1 и запорный клапан 2 по паропроводу 3 и через регулирующий клапан 4 в золотниковую коробку 5. В последней совершает возвратно-поступательные движения золотник 6, приводимый в движение от основного вала 7 машины; золотник связан с валом при помощи золотникового штока 8 и тяги 9. Тяга 9 соединена с кольцом 10, эксцентрично сидящим на валу 7 машины и потому называемом эксцентриком.

Основной частью двигателя является цилиндр 12, в котором находится поршень 13. Цилиндр имеет две крышки: заднюю 14 и переднюю 15. Поршень снабжен



Фиг. 101. Схема одноцилиндровой паровой машины двойного действия.

1 — водоотделитель; 2 — запорный вентиль; 3 — трубопровод; 4 — регулирующий клапан; 5 — золотниковая коробка; 6 — золотник; 7 — основной вал машины; 8 — золотниковый шток; 9 — тяга; 10 — эксцентрик; 11 — паропускные каналы; 12 — цилиндр машины; 13 — поршень; 14 — задняя крышка цилиндра; 15 — передняя крышка цилиндра; 16 — поршневое кольцо; 17 — паропускной канал; 18 — маслоохладитель; 19 — трехходовой клапан; 20 — смешивающий конденсатор; 21 — подвод охлаждающей воды; 22 — морозный насос; 23 — тяга от главного вала к мотовоздушному насосу; 24 — центробежный регулятор; 25 — вал регулятора; 26 — тяга; 27 — шток; 28 — ползуны; 29 — шатун; 30 — кривошип; 31 — маховик; 32 — рама; 33 — фундаментная плита; 34 — паропроводящая труба.

пружинящими кольцами 16, затрудняющими перетекание пара из одной полости цилиндра в другую.

В положении, изображенном на чертеже, пар из золотниковой коробки через левый паровой канал 11 поступает в левую полость цилиндра, и за счет работы расширения пара поршень передвигается слева направо; при этом пар, находящийся в правой полости цилиндра, через правый паровой канал 11 поступает в пространство под золотником и через паровыпускной канал 17, паропроводящую трубу 34, маслоохладитель 18 и трехходовой кран 19 направляется в конденсатор 20.

При обратном ходе поршня (справа налево) свежий пар поступает из золотниковой коробки в правую полость цилиндра, а уже отработавший в левой полости пар направляется поршнем через левый паровой канал в конденсатор 20.

Как видно, периоды работы пара в той и другой полостях цилиндра по времени сдвинуты: когда свежий пар поступает в одну полость цилиндра и совершает в ней работу, передвигая поршень, пар из другой полости направляется через паровой канал под золотник, а оттуда в конденсатор. Таким образом, благодаря периодическим возвратно-поступательным движениям золотника 6 поршень 13 также совершает возвратно-поступательные движения.

В конденсатор 20 поступает по трубопроводу 21 из озера, реки или какого-либо другого источника водоснабжения вода, которую называют охлаждающей водой; нагреваясь за счет скрытой теплоты парообразования пара, она конденсирует его и смешивается с получившимся конденсатом.

В конденсаторе поддерживается давление, значительно меньшее атмосферного (0,1—0,15 ат), поэтому через неплотности в него проникает воздух. Мотороздушный насос 22, приводимый в движение от главного вала машины через тягу 23, отсасывает из конденсатора смесь конденсата, охлаждающей воды и воздуха.

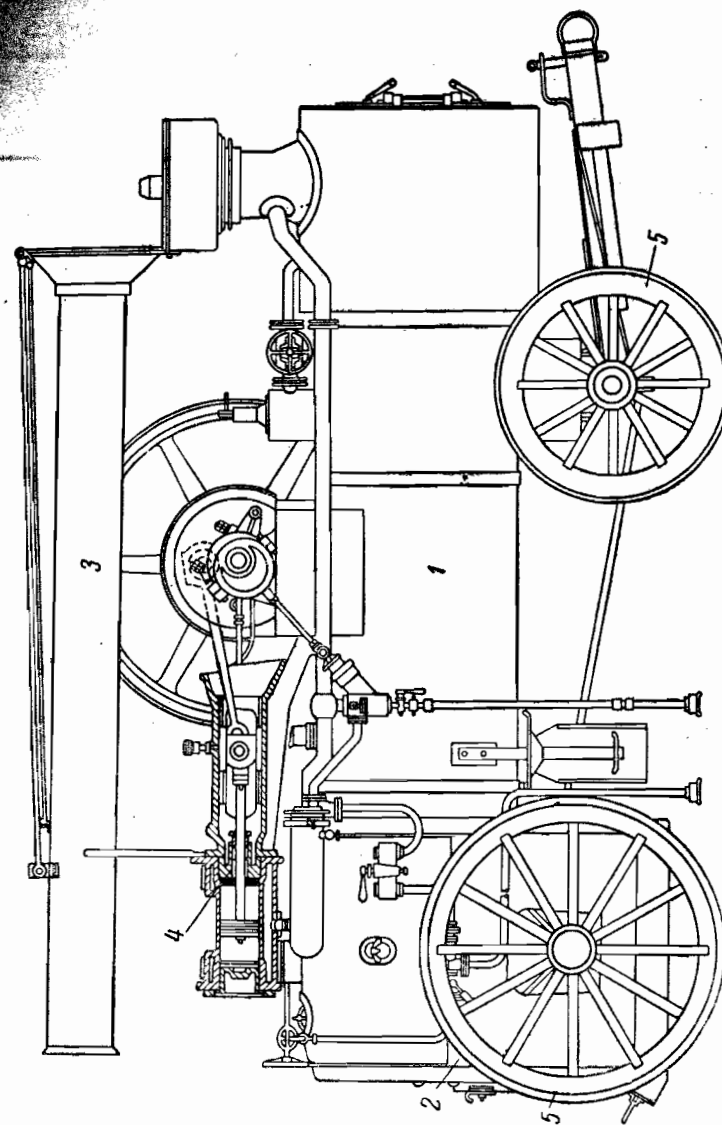
Мощность, вырабатываемая машиной, должна соответствовать потребности в энергии или, как говорят, нагрузке потребителя. При этом выставляется условие, чтобы вал машины при любой нагрузке делал приблизительно одно и то же число оборотов в единицу времени (на которое рас-

считана машина). Постоянство числа оборотов машины и соответствие мощности машины нагрузке потребителя устанавливаются автоматически. Когда потребность в энергии снижается, а мощность, вырабатываемая машиной, еще остается прежней, начинает расти число оборотов вала машины, так как излишек мощности идет на увеличение кинетической энергии вращающихся частей машины. Нормальное для данной машины число оборотов устанавливает центробежный регулятор 24. При увеличении числа оборотов грузы регулятора расходятся и поднимают муфту, сидящую на валу 25, приводимом в движение от главного вала. Связанная с муфтой тяга 26 прикрывает регулирующий клапан 4; при прохождении пара через суженное отверстие количество пара и его давление падают, вследствие чего работоспособность уменьшается; тогда машина начинает вырабатывать меньшую мощность в соответствии с понизившейся нагрузкой потребителя. Обратный процесс под влиянием регулятора происходит при росте нагрузки потребителя: число оборотов машины начинает падать, и регулятор шире открывает доступ пара в машину, отчего вырабатываемая мощность возрастает и становится равной новой, увеличившейся нагрузке потребителя.

Не всегда паровая машина оборудуется конденсатором. При его отсутствии пар из цилиндра выбрасывается через особую трубу в атмосферу — машина, как говорят, работает «на выхлоп». Давление выходящего из машины пара при этом несколько больше атмосферного. Такая работа менее выгодна, чем при наличии конденсатора, так как значительная потенциальная энергия пара оказывается неиспользованной.

Возвратно-поступательное движение поршня 13 при помощи штока 27, соединенного с ползуном 28, шатуна 29 и кривошипа 30 превращается во вращательное движение вала 7. На валу сидит маховик 31, назначение которого — выравнивать ход машины, что достигается за счет большой массы маховика. Рама машины 32 прикреплена к фундаментной плите 33.

В сельском хозяйстве, на отдельных небольших предприятиях, не приключенных к общей электрической сети, строительных площадках с успехом используют комбинированные, большей частью передвижные агрегаты — локомобили (фиг. 102), представляющие собой соединение



Фиг. 102. Локомобиль класса П.

1 — паровой котел; 2 — топка; 3 — дымовая труба; 4 — паровая машина; 5 — ходовые колеса.

в одном агрегате паровой машины, котла и вспомогательных устройств. Паровой котел 1 локомотива — паровозного типа, газотрубный¹, вырабатывает пар 13 атм, 300°С. Топка 2 представляет собой небольшую жаровую трубу. Дымовая труба 3 при работе локомотива переводится в вертикальное положение. На котле располагается паровая машина 4. Ходовая часть локомотива состоит из четырех колес 5. Это — локомотив типа П (передвижной). Мощность его 25—75 э. л. с.

Советские заводы изготовляют и стационарные локомотивы СК (конденсационные), устанавливаемые на фундаменте (полулокомотивы). Мощность их 175—500 л. с.

В последние годы промышленностью выпущены легкие паросиловые установки; максимальная эффективная мощность их составляет 40 л. с. Вес их в 2 раза меньше веса локомотива соответствующей мощности. Паровая машина делает 1 000 об/мин и работает паром 20 атм, 375—400°С.

39. ПАРОВЫЕ ТУРБИНЫ

Преобладающим двигателем на электростанциях является паровая турбина, принцип работы которой, как указывалось, состоит в преобразовании сначала потенциальной энергии пара в кинетическую энергию пара, а затем последней — в механическую энергию вращения вала.

Турбины по назначению делятся на конденсационные турбины, служащие только для выработки электрической энергии, и теплофикационные, выполняющие, кроме того, задачу централизованного снабжения потребителей горячей водой или паром для тепловых нужд. В этом параграфе будут рассмотрены конденсационные турбины.

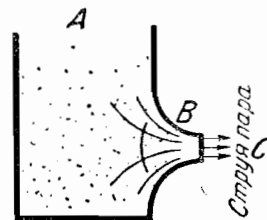
Рассмотрим сначала процесс преобразования потенциальной энергии в кинетическую энергию движения пара.

Пусть водяной пар вытекает из резервуара А (фиг. 103) в пространство С через каналы, называемые насадками или соплами (В). Переходя от более высокого давления, поддерживаемого в резервуаре А, к более низкому давлению в пространстве С, пар расширяется, т. е. объем его увели-

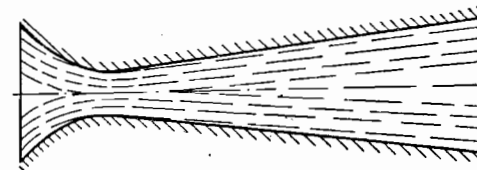
¹ Газотрубными называются котлы, в которых газ проходит внутри трубок, а вода окружает эти трубки. Такие котлы не нуждаются в обмуровке.

чивается, и он вытекает из сопла с большой скоростью. Следовательно, этот пар обладает большой кинетической энергией. Таким образом, в сопле В потенциальная энергия пара превращается в кинетическую.

Истечение газообразного тела, обладающего способностью к расширению, в суживающихся соплах, подобных изображенному на фиг. 103, характеризуется следующей особенностью. При равенстве давлений газа в резервуаре А и пространстве С никакого истечения из сопла не будет. По-



Фиг. 103. Истечение пара.



Фиг. 104. Расширяющееся сопло.

мере понижения давления газа в пространстве С скорость истечения и расход вытекающего газа будут увеличиваться, однако только до тех пор, пока давление в пространстве С не станет равным половине (приблизительно) давления газа в резервуаре А. Получившийся при этом расход газа называется максимальным расходом, а скорость — критической. Дальнейшим понижением давления в пространстве С нельзя добиться увеличения расхода газа и скорости его истечения. Для получения скоростей истечения выше критической (до 1 000 м/сек) применяются сопла особой формы. Они имеют сначала небольшую суживающуюся часть, а затем расширяющуюся (фиг. 104). Эти сопла называются расширяющимися соплами, или соплами Лаваля.

Такая форма сопла Лаваля объясняется характером изменения скорости при увеличении объема пара во время его движения по соплу. При падении давления до половины (приблизительно) его начального значения скорость увеличивается в большей мере, чем объем, и сечение сопла должно уменьшаться; при дальнейшем расширении, наоборот, объем растет быстрее, чем скорость, и сопло должно

быть расширяющимся. Отсюда расширяющаяся часть у сопла должна быть только в том случае, если давление в среде, в которую происходит истечение, меньше так называемого критического давления, равного примерно половине начального; если же давление после сопла равно или больше критического, то сопло должно иметь только суживающуюся часть.

Вытекающий из сопла пар можно использовать для совершения работы. Для этого пар направляют на особые изогнутые лопатки, насаженные на диски. Такое устройство



Фиг. 105. Центростремительная и центробежная силы при движении пара между лопатками.

было показано на фиг. 2. На ней 3 — сопло, из которого вытекает пар; 4 — лопатки, насаженные на диск 5. Этот диск сидит на валу 6. В канале между лопатками пар совершает криволинейное движение, во время которого, как известно из механики, возникает центростремительная сила, приложенная к движущемуся телу (фиг. 105), в данном случае — к пару. Согласно третьему закону Ньютона вследствие этого возникает противодействующая сила — центробежная, приложенная к устройствам, образующим криволинейное движение, в данном случае — к лопаткам. Центробежная сила 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 или имел бы, если бы диск с лопатками был неподвижным.

В технике приходится иметь дело с двоякого рода движением. В одном случае нас интересует движение тела относительно неподвижных предметов на земле. Это движение называется абсолютным движением, а скорость какого-либо тела относительно этих неподвижных предметов — абсолютной скоростью. В другом случае нас может интересовать движение этих же тел по отношению к другим, в свою очередь движущимся телам: в этом случае

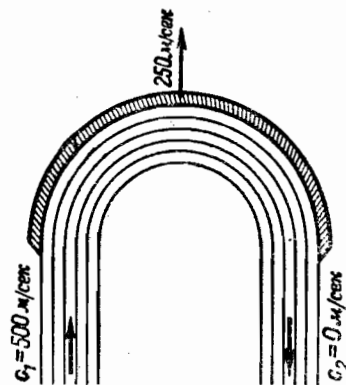
его называют относительным движением, а скорость тел относительно движущихся тел — относительной скоростью.

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 направлении парохода. 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, но теперь уже в направлении, обратном движению человека, то, очевидно, абсолютная скорость человека, т. е. его скорость по отношению к берегу, будет в это время равна нулю.

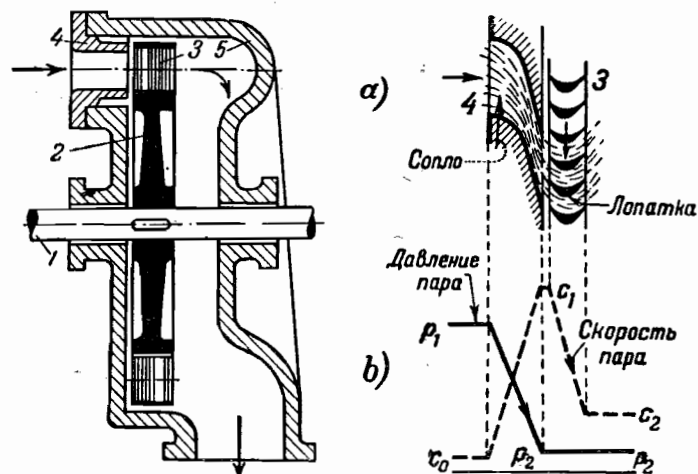
Для того чтобы уяснить себе явление передачи струей пара ее кинетической энергии лопаткам, рассмотрим упрощенный случай движения струи пара по лопатке (фиг. 106) и проследим, как изменяется скорость пара при движении. При этом речь может идти об абсолютной скорости пара (по отношению к неподвижному соплу или корпусу турбины) и относительной скорости его (по отношению к движущейся лопатке).

Пусть струя пара поступает на лопатку из сопла с абсолютной скоростью 500 м/сек, а скорость движения лопатки в том же направлении составляет 250 м/сек. Очевидно, относительная скорость движения пара составит: $500 - 250 = 250$ м/сек (сравнить с примером движения человека по



Фиг. 106. Изменение абсолютной скорости при движении пара между движущимися лопатками.

палубе парохода). Так обстоит дело, когда струя пара и лопатка движутся в одном направлении. В дальнейшем пар движется по криволинейному пути по лопатке, поворачивает 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 на-



Фиг. 107. Разрез по турбине.

1 — вал; 2 — диск; 3 — лопатки; 4 — сопло; 5 — корпус.

правлении с той же скоростью, то, очевидно, абсолютная скорость пара равна нулю.

Таким образом, при изменении направления движения струя пара потеряла свою абсолютную скорость, т. е. свою кинетическую энергию. Эта энергия при помощи лопаток оказалась переданной валу турбины.

В действительности пар выходит не с нулевой, а с некоторой небольшой абсолютной скоростью, значительно меньшей, чем та, с которой он поступает на лопатку.

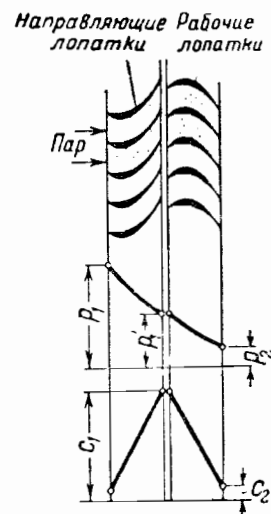
На фиг. 107 дан разрез простейшей турбины в собранном виде. Диск с рабочими лопатками заключен в неподвижный кожух 5, стенки которого создают путь для выхода пара из турбины, указанный стрелками.

По способу работы пара различают турбины активные и реактивные.

Активными турбинами называют такие, в которых расширение пара происходит перед поступлением пара на рабочие лопатки. Если сделать разрез по соплу и рабочей лопатке и развернуть его в плоскости чертежа, получим изображение, представленное на фиг. 107, а. На ней 4 — разрез по соплу, а 3 — ряд лопаток. Под чертежом разреза расположен график изменения давления и абсолютной скорости пара (фиг. 107, 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 (т. е. давления перед и после лопаток равны); такие турбины поэтому 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 , причем направление ее меняется почти на обратное.

В реактивных турбинах расширение пара происходит как перед поступлением пара на рабочие лопатки, так и в самом рабочем колесе, что достигается устройством сужающегося сечения на выходе из каналов между рабочими лопатками. Изменения давления и скорости показаны на фиг. 108. Из нее видно, что падение давления от p_1 до p'_1 происходит перед рабочим колесом, а от p'_1 до p_2 — в рабочем колесе. Падение давления пара в рабочем колесе вызывает появление реактивной силы, приложенной, так же как и центробежная (активная) сила, связанная с изменением направления потока пара, к рабочим лопаткам.

Появление реактивной силы можно пояснить таким простым примером. Предположим, что резервуар, наполненный сжатым газом, установлен на катках на рельсах. Давление газа одинаково на все стенки, и резервуар будет находиться



Фиг. 108. График изменения скорости и давления для реактивной турбины.

в покое; но если в стенке резервуара сделать отверстие так, чтобы газ начал выходить из него в направлении рельсов, ускоряясь и как бы отталкиваясь от резервуара, то сам резервуар под действием возникшей реактивной силы начнет откатываться в сторону, противоположную вытеканию газа.

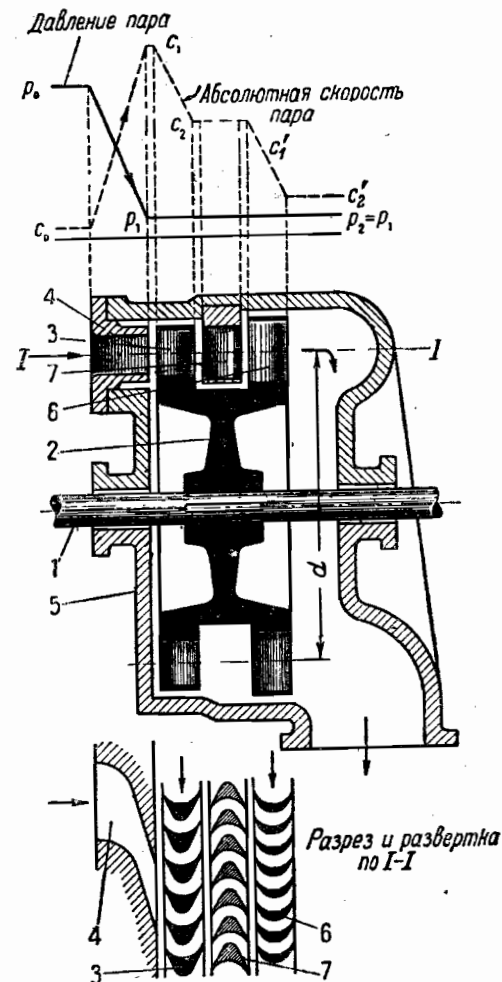
Рассмотрим возникновение реактивной силы с точки зрения законов механики. Если пар между лопатками движется без изменения давления, то его скорость относительно лопаток, т. е. относительная скорость, остается постоянной, и в этом случае, как было объяснено ранее, лопатки находятся только под действием центробежной силы, возникающей вследствие изменения направления движения пара. Если же при движении между лопатками происходит, кроме того, и падение давления, то это вызывает увеличение скорости пара относительно лопаток, т. е. увеличение относительной скорости движения пара. Наличие увеличения скорости, т. е. наличие 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, приложенная к лопаткам. Эта последняя сила и называется реактивной силой. Таким образом, в этом случае на лопатки действуют в одну и ту же сторону 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 обычно 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. 109). Пар после расширения в сопле 4 поступает в первый ряд лопаток 3, на котором скорость его сбрасывается от значения c_1 до значения c_2 (см. сверху 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 корпу-

сом турбины и неподвижны; в них восстанавливается направление движения, измененное в первом ряде лопаток; после этого пар поступает во второй ряд рабочих лопаток 6.



Фиг. 109. Разрез по активной турбине со ступенями скорости.

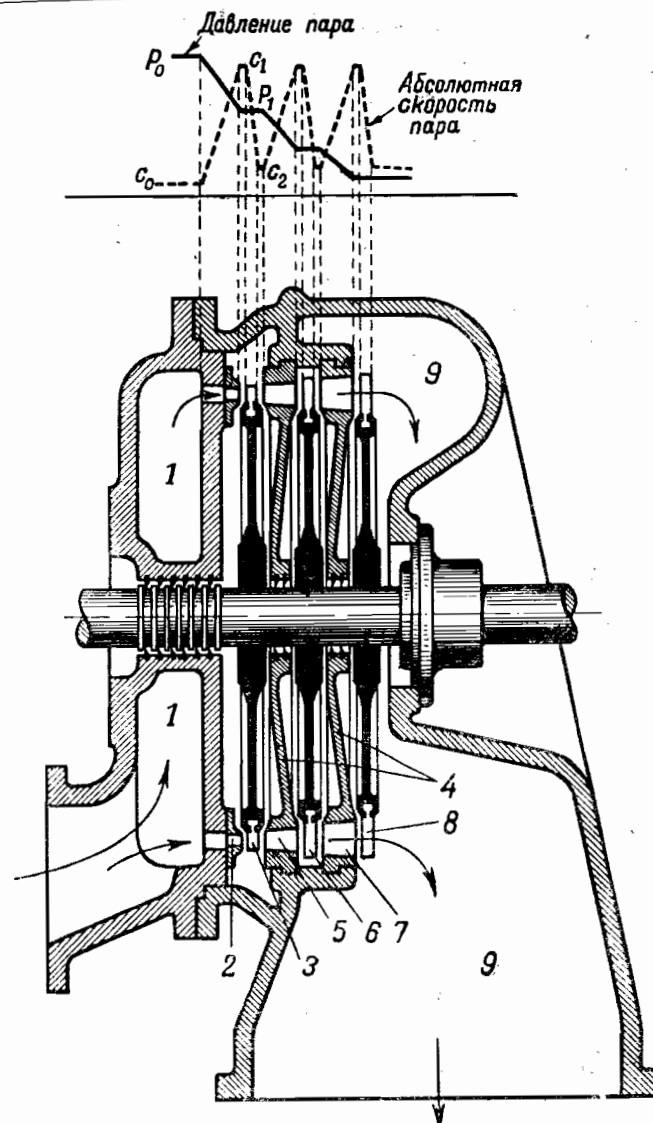
1 — вал; 2 — диск; 3 — первый ряд рабочих лопаток; 4 — сопло; 5 — корпус; 6 — второй ряд рабочих лопаток; 7 — направляющие лопатки.

При этом скорость срабатывается с c_2 до c_3 . При таком способе использования скорости вал будет вращаться вдвое медленнее, развивая ту же мощность.

Другой способ уменьшения скорости вращения 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 срабатывание скорости показаны на фиг. 110 (вверху) для трех ступеней давления. Давление пара в первой ступени падает от p_0 только до p_1 . Получающаяся в первой ступени скорость срабатывается, после чего вновь происходит падение давления в следующей ступени и срабатывание ее скорости и т. д. Соответственно этому принципу работы конструкция турбины такова (фиг. 110): 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 (которые тоже иногда называются направляющими лопатками), в которых происходит очередное падение давления.

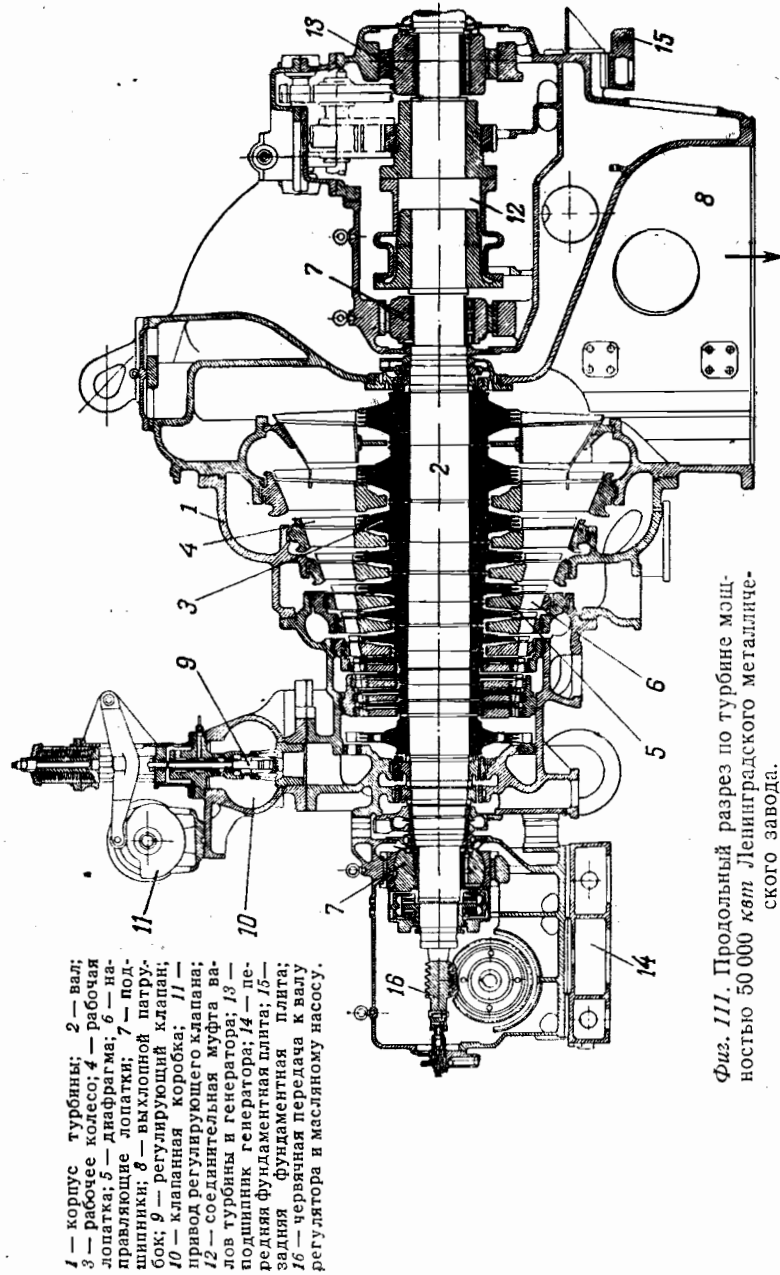
Современные мощные турбины (фиг. 111) имеют несколько вращающихся дисков с рабочими лопатками, иногда несколько десятков. Между каждой парой дисков пар поступает в направляющие неподвижные лопатки или сопла, расположенные в кожухе; в них происходит изменение направления его движения; при этом пар принимает такое же направление движения, какое он имел при поступлении в первый ряд рабочих лопаток. Проходя все эти диски (ступени), пар постепенно расширяется в соплах, а иногда и в рабочих лопатках, пока не выйдет из турбины через так называемый выпускной патрубок. На фиг. 112 показаны отдельно сопло 1, два ряда рабочих и один ряд направляющих лопаток.

По мере прохождения пара через последовательные ступени турбины объем его увеличивается, и соответственно должны увеличиваться сечения для прохода пара; растут диаметры колес и длины лопаток, увеличиваются также механические напряжения в дисках колес и лопатках. Поэтому мощность турбины, вырабатываемая потоком пара, имеет предел, определяемый прежде всего высотой лопаток последнего ряда. Расчеты показывают, что предельная



Фиг. 110. 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 — выпускной патрубок.

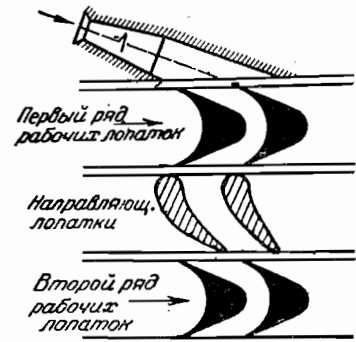


Фиг. 111. Продольный разрез по турбине мощностью 50 000 квт Ленинградского металлического завода.

- 1 — корпус турбины; 2 — вал; 3 — рабочее колесо; 4 — рабочая лопатка; 5 — диафрагма; 6 — направляющие лопатки; 7 — подшпильники; 8 — выхлопной 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; 16 — червячная передача к валу регулятора и масляному насосу.

мощность однопоточной турбины при $n = 3000$ об/мин составляет примерно 50 000 квт. Чтобы превысить этот предел, прибегают к одному из следующих конструктивных мероприятий: либо в определенном месте турбины поток пара раздваивают и каждую его половину ведут через отдельный комплект последних ступеней (двухпоточные турбины), либо сопла и лопатки предпоследней ступени делают двухъярусными и из внутреннего яруса в последнюю ступень турбины направляют не весь поток пара, а часть его (около $\frac{2}{3}$); другая часть, из внешнего яруса предпоследней ступени, непосредственно направляется в конденсатор. Схема турбины с раздвоенным потоком показана на фиг. 113, а и б; схема с частичным поступлением пара в последнюю ступень — на фиг. 113, в.

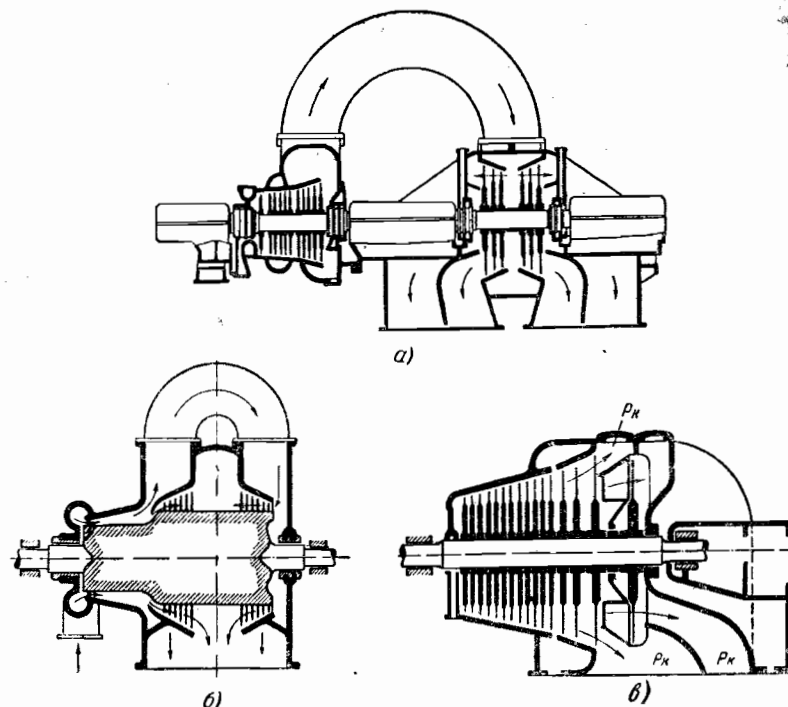
Производство турбин в СССР достигло высокой степени совершенства. До Великой Октябрьской революции в России турбины очень малой мощности строились только на одном заводе. После революции была поставлена задача остронить производство мощных турбин для строящихся центральных электрических станций, и уже в 1928 г. Ленинградский металлический завод (ЛМЗ имени Сталина) выпустил турбину мощностью 10 000 квт. В настоящее время турбины строятся рядом заводов, создан и освоен ряд оригинальных конструкций турбин на высокие и сверхвысокие параметры пара. Ленинградским металлическим заводом имени Сталина серийно выпускаются конденсационные турбины мощностью 100 000 квт при 3 000 об/мин, работающие паром при начальных параметрах $p_1 = 90$ ата, $t_1 = 500^\circ\text{C}$ и конечном давлении $p_2 = 0,04$ ата. Это — двухцилиндровые турбины с раздвоенным потоком пара во втором цилиндре. В цилиндре высокого давления (ц. в. д.) имеется 12 ступеней давления, из которых первая, регулирующая, имеет две ступени скорости. В цилиндре низкого давления (ц. н. д.) размещено десять ступеней, по пять



Фиг. 112. Расположение рабочих и направляющих лопаток.

в каждом потоке пара. Общий вес турбины 264 т. Общая длина (без генератора) 12 350 мм.

В 1953 г. была пущена в работу турбина мощностью 150 000 кВт при 3 000 об/мин на паре сверхвысоких начальных параметров: $p_1 = 170 \text{ ата}$, $t_1 = 550^\circ \text{C}$ при конечном



Фиг. 113. Схемы потоков в последних ступенях турбины предельной мощности.

a — раздвоенный поток пара в цилиндре и. д. двухцилиндровой турбины; b — то же одноцилиндровой турбины; c — поток с частичным поступлением пара в последнюю ступень.

давлении $p_2 = 0,035 \text{ ата}$, двухпоточная с двухъярусной предпоследней ступенью.

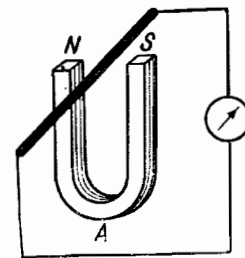
Для централизованного снабжения потребителей не только электрической энергией, но и теплом для нужд технологических процессов промышленности и отопления наши заводы строят теплофикационные турбины. Среди них имеются турбины, которые весь отработавший

пар при необходимом давлении отдают для целей теплофикации. Такие турбины называются турбинами с противодавлением.

Большей же частью для тепловых нужд отбирают лишь часть пара по пути следования его в турбине после какой-либо промежуточной ступени; оставшая часть пара продолжает процесс расширения и следует в конденсатор. Давление в отборе должно поддерживаться в определенных пределах, для чего имеется специальный регулятор давления. Такая турбина называется турбиной с отбором пара. Отборов (регулируемых) устраивают один или два, смотря по потребности в паре того или иного давления.

Теплофикационные турбины в СССР строят различных мощностей максимально до 50 000 кВт. Зарубежное машиностроение не знает теплофикационных турбин такой мощности.

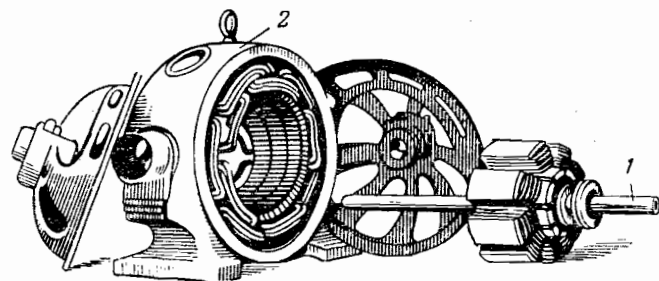
Электрический генератор. Как было уже сказано, в турбине тепловая энергия пара превращается в механическую энергию вращающегося вала. Редко бывает так, чтобы получаемая механическая энергия шла на непосредственное использование. Это имеет место лишь в турбовоздуховках и турбонасосах. В первом случае турбина приводит в движение воздуховодку, 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 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 пространстве около магнита или, как говорят, в магнитном поле перемещать замкнутый проводник, то в нем появляется (индуцируется) электрический ток. Это можно осуществить так (фиг. 114): возьмем магнит A и между его полюсами N



Фиг. 114. Появление индуктивного электрического тока.

и между его полюсами S перемещать замкнутый проводник, то в нем появляется (индуцируется) электрический ток. Это можно осуществить так (фиг. 114): 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.



Фиг. 115. Детали электрического генератора.

Он состоит из двух основных частей (фиг. 115): вращающегося ротора 1, на котором расположен ряд магнитов, и неподвижного статора 2 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. 115 генератор изображен в разобранном виде.

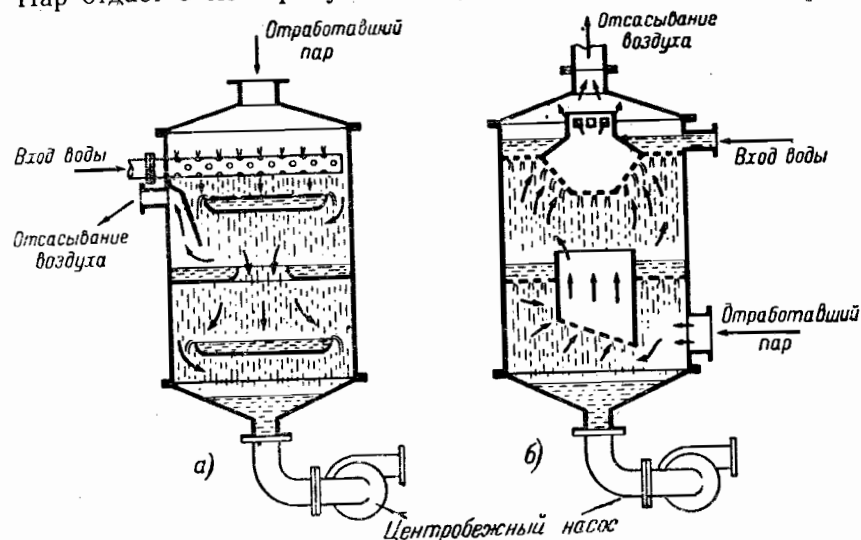
40. КОНДЕНСАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Чтобы пар с заданными начальными параметрами мог совершить как можно большую работу, он должен расширяться до возможно более низкого давления, а для этого его нужно из турбины выпускать не в атмосферу, а в особое устройство, называемое конденсатором.

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.

Для паровых машин иногда используют так называемые смешивающие конденсаторы. В них пар, поступающий из машины, смешивается с охлаждающей водой. Пар отдает свою скрытую теплоту парообразования и кон-



Фиг. 116. Схемы смешивающего конденсатора.
а — с параллельным током; б — с противотоком.

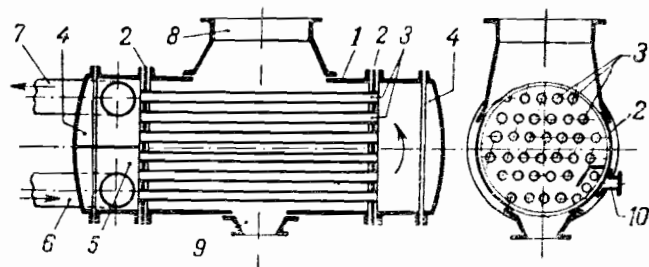
денсируется; получающаяся смесь конденсата с охлаждающей водой откачивается насосом. Кроме того, надо отсасывать из конденсатора и воздух, проникающий через неплотности и растворенный в воде. Иногда устанавливается общий насос для отсоса воздуха и воды; тогда он называется мокровоздушным насосом.

На фиг. 116 показаны две схемы смешивающего конденсатора. В схеме а пар и предназначенная для его конденсации вода поступают сверху и движутся вниз в одном направлении. Это — смешивающий конденсатор с параллельным током. Для увеличения поверхности соприкосновения между паром и водой воду подают отдельными струями: она задерживается на ряде специально устанавливаемых корыт, стекая с одного на другое. В нижней части

расположен центробежный насос, откачивающий получающуюся смесь. Воздух отсасывается из специального отсека в верхней части конденсатора, несколько ниже места входа воды. В схеме б осуществлено противоточное движение пара и воды. Вода и здесь падает струями. Получающаяся смесь падает вниз и отсюда откачивается.

В смешивающих конденсаторах обычно получают давление 0,1—0,15 *ата*, что и требуется для паровых машин.

Для паровых турбин применяют только поверхности конденсаторы; в них удается создать более низкое абсолютное давление, т. е. более глубокий вакуум.



Фиг. 117. Разрез по конденсатору паровой турбины.

Такой конденсатор (фиг. 117) состоит из цилиндрического барабана — корпуса 1 с двумя крышками 4 по торцам; в оба конца барабана вделаны две металлические доски 2, в которые вставлено большое количество трубок 3.

Пар из турбины поступает в конденсатор через патрубок 8 и окружает трубки, по которым движется вода. Через патрубок 6 в пространство 5 поступает так называемая циркуляционная вода, забираемая из реки или какого-либо другого источника водоснабжения; по нижним трубкам она 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 последний 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.

Неизбежно проникающий в конденсатор с паром и через

неплотности воздух необходимо отсасывать; это делается через патрубок 10; в прилегающей к нему части конденсатора количество несконденсировавшегося пара уже совсем мало, а относительное количество воздуха велико, так что парциальное давление пара здесь значительно ниже, чем в остальной части конденсатора. Так как пар здесь насыщенный, а температура смеси его с воздухом соответствует температуре насыщения пара при его парциальном давлении, то при более низком парциальном давлении пара здесь держится и более низкая температура, чем в остальной части конденсатора. Эта часть конденсатора называется зоной охлаждения. Воздух вместе с незначительным количеством пара отсасывается обыкновенно пароструйным насосом, называемым эжектором.

Иногда, если близко нет проточной воды, из конденсатора циркуляционную воду направляют в охлаждающие устройства (градирни, пруды, брызгальные бассейны) и потом снова возвращают ее в конденсатор через патрубок 6.

В конденсаторах паровых турбин поддерживают давление 0,03—0,08 *ата*. Из таблиц насыщенного пара видно, что при давлении 0,04 *ата* пар имеет температуру около 29° С.

Вода, служащая для конденсации этого пара, поступает в конденсатор приблизительно при 10° С, а выходит приблизительно при 20° С. 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 пар при $p_2 = 0,04$ *ата* и $x = 0,94$. По *is*-диаграмме его теплосодержание составляет $i_2 = 575$ ккал/кг. Получаемый из этого пара конденсат имеет теплосодержание $i'_2 = 29$ ккал/кг. Таким образом, 1 кг конденсирующегося пара отдает циркуляционной воде $575 - 29 = 546$ ккал/кг тепла. С другой стороны, 1 кг циркуляционной воды, нагреваясь на 10° С, 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.

41. РАСХОД ПАРА КОНДЕНСАЦИОННОЙ ТУРБИНОЙ

Для вычисления расхода топлива, сжигаемого на электрической станции, надо знать, какое количество пара требуется подвести к турбине для выработки 1 квтч электрической энергии. Подсчитать его можно, исходя из следующих соображений.

Рассмотрим сначала идеальную турбину, т. е. такую, в которой нет никаких потерь механической энергии в процессе ее получения; нет также потерь тепла в окружающую среду.

Каждый килограмм пара, поступающий в турбину с теплосодержанием i_1 ккал/кг, после адиабатического расширения покидает турбину с теплосодержанием i_2 ккал/кг, а количество тепла, равное разности $h_0 = (i_1 - i_2)$ ккал/кг, называемое адиабатическим теплопадением, превращается в механическую энергию. Чтобы получить от идеальной турбины 1 квтч или, что то же, 860 ккал механической (или электрической) энергии, нужно, очевидно, пропустить через нее столько килограммов пара, сколько раз $(i_1 - i_2)$ содержится в 860; таким образом, если обозначить d_0 — расход пара идеальной турбины, то

$$d_0 = \frac{860}{i_1 - i_2} \text{ кг/квтч.} \quad (92)$$

В процессе преобразования тепловой энергии в механическую (и затем в электрическую) в действительной турбине имеется ряд потерь. Прежде всего вследствие трения внутри пара и пара о стенки турбины часть механической энергии превращается в тепло, которое усваивается паром. Таким образом, выходящий из турбины пар имеет теплосодержание, большее чем i_2 , а именно $i_{2\theta}$, где буква θ показывает, что речь идет о теплосодержании пара в действительной турбине. Вследствие этого внутри турбины от 1 кг получается не $(i_1 - i_2)$ ккал/кг механической энергии, а меньше, именно $(i_1 - i_{2\theta})$ ккал/кг.

Отношение действительной работы, полученной внутри турбины, к идеальной работе называется внутренним относительным к. п. д. и обозначается η_{oi} ; таким образом,

$$\eta_{oi} = \frac{i_1 - i_{2\theta}}{i_1 - i_2}. \quad (93)$$

Отсюда

$$i_1 - i_{2\theta} = (i_1 - i_2) \eta_{oi}$$

или

$$i_1 - i_{2\theta} = h_0 \eta_{oi}. \quad (94)$$

Однако не вся механическая энергия, вырабатываемая паром внутри турбины, передается валу турбины; часть ее теряется на трение в подшипниках турбины и тратится на привод регулирующих устройств и пр. Поэтому на вал двигателя поступает лишь некоторая доля выработанной паром энергии, измеряемая так называемым механическим к. п. д. и обозначаемая η_m ; таким образом, каждый килограмм пара передает на вал турбины количество механической энергии, равное

$$h_0 \eta_{oi} \eta_m.$$

Эта механическая энергия тратится на вращение электрического генератора и преобразуется в нем в электрическую энергию. Однако количество получаемой электрической энергии меньше механической, выработанной турбиной, так как известная доля электрической энергии тратится на нагревание обмоток и других частей генератора. Долю получаемой электрической энергии обозначим η_e ; она называется к. п. д. генератора; отсюда количество электрической энергии, полученное за счет каждого килограмма пара, составит:

$$h_0 \eta_{oi} \eta_m \eta_e.$$

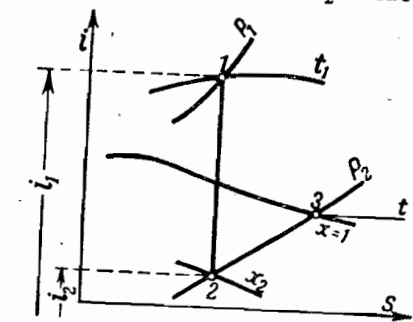
Таким образом, для получения от турбогенератора 1 квтч или, что то же, 860 ккал электрической энергии надо затратить столько килограммов пара, сколько раз $h_0 \eta_{oi} \eta_m \eta_e$ содержится в 860. Если обозначить d_s — расход пара на выработку 1 квтч электрической энергии, то

$$d_s = \frac{860}{h_0 \eta_{oi} \eta_m \eta_e} \text{ кг/квтч.} \quad (95)$$

Обычно значения коэффициентов η_{oi} , η_m , η_e при расчетах расхода пара задают, а значение $h_0 = i_1 - i_2$ можно найти по i -с-диаграмме. Для этого способом, описанным в § 19, по заданному начальному состоянию пара находят i_1

(точка 1 на фиг. 118). Для того чтобы найти i_2 , исходим из того, что расширение пара в двигателе адиабатическое; как было указано в § 15, 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 i_2 . Часовой расход пара на турбину мощностью N квт составит:

$$D = Nd_s = \frac{860N}{h_0 \eta_{oi} \eta_m \eta_z} \text{ кг/час.} \quad (96)$$



Фиг. 118. is -диаграмма адиабатного расширения пара в турбине.

Обычно турбина рассчитывается таким образом, что она работает наиболее экономично не при полной мощности, а при мощности 0,8—0,9 от полной; эта мощность называется экономической мощностью турбины: найденный по формуле (96) расход пара относится к экономической мощности турбины, и впредь мы его будем обозначать $d_{эк}$; таким образом,

$$d_{эк} = \frac{860}{h_0 \eta_{oi} \eta_m \eta_z} \text{ кг/квтч.} \quad (97)$$

Мощность турбины, при которой она может работать сколько угодно долго без ущерба для ее прочности, называется максимально длительной; эта мощность обозначается в паспорте турбины и называется еще номинальной мощностью; обозначим ее N_n .

Расход пара конденсационной турбиной при различных ее нагрузках устанавливают испытанием. Результаты испытаний выражают графическим построением диаграммы DN (фиг. 119), в которой по оси абсцисс откладывают значения нагрузки N , а по оси ординат — расход пара D . Для удобства пользования диаграммой и упрощения расчетов расход пара турбиной выражают в упомянутой диаграмме прямой линией. Она вычерчивается на диа-

грамме таким образом. Расход пара для мощности N_n определяют по формуле

$$D_n = d_{эк} N_n, \quad (98)$$

которая верна приближению, так как удельный расход пара при N_n несколько выше, чем $d_{эк}$. Соответственно нагрузке N_n откладывают в диаграмме расход пара D_n и получают точку B . Затем из точки B проводят прямую AB таким образом, чтобы она как можно точнее соответствовала значениям расхода пара турбиной при различных нагрузках, найденным в испытаниях.

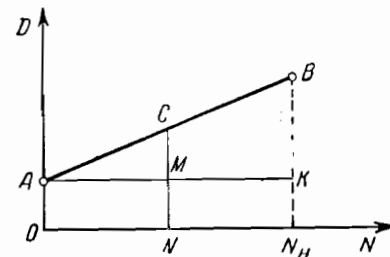
В пересечении прямой AB с осью ординат получают точку A ; отрезок AO измеряет на полученной диаграмме расход пара при нагрузке $N=0$. Этот расход называют расходом холостого хода; так он называется потому, что он тратится только для того, чтоб турбина вращалась с нормальным числом оборотов, не выдавая электрической энергии на шины электрического генератора. Расход холостого хода обозначают D_x и часто выражают долей x от расхода пара D_n при номинальной нагрузке N_n . Таким образом, получают:

$$D_x = x D_n = x d_{эк} N_n; \quad (99)$$

в этой формуле x называют коэффициентом холостого хода.

Для любой нагрузки N в построенной диаграмме расход пара определяется ординатой NC .

Расход пара на холостой ход одинаков при любой нагрузке турбины. Линия AK , параллельная оси абсцисс, отсекает от ординаты NC (и всякой другой ординаты) отрезок NM , равный отрезку OA . Таким образом, отрезок MC измеряет количество пара, которое израсходовано на выработку электрической энергии, т. е. сверх того, что тратится на вращение турбины „вхолостую“.



Фиг. 119. Графическое изображение расхода пара конденсационной турбиной.

Установим слагаемые расходы пара для нагрузки N_n ; холостой расход, как и для любой другой нагрузки, определяется формулой (99); расход пара на выработку электрической энергии получится, если из общего расхода пара при мощности N_n , определяемого по формуле (98), вычесть расход холостого хода:

$$d_{э\kappa} N_n - x d_{э\kappa} N_n = (1 - x) d_{э\kappa} N_n. \quad (100)$$

Отсюда расход пара D_n можно представить в виде двух слагаемых, из которых одно определяет расход пара на холостой ход, а другое — на выработку электрической энергии:

$$D_n = d_{э\kappa} N_n = x d_{э\kappa} N_n + (1 - x) d_{э\kappa} N_n, \quad (101)$$

а для любой мощности N

$$D = x d_{э\kappa} N_n + (1 - x) d_{э\kappa} N. \quad (102)$$

42. РЕЖИМЫ ТЕПЛОФИКАЦИОННОЙ ТУРБИНЫ С ОДНИМ ОТБОРОМ ПАРА

Для централизованного снабжения потребителей не только электрической энергией, но и тепловой, отпускаемой фабрикам и заводам для различных технологических процессов и населению для отопления зданий и бытовых нужд, советские заводы разработали ряд типов теплофикационных турбин. Среди них особенно распространены турбины, в которых отбирается некоторая часть пара, после того как он частично расширился в турбине, пройдя несколько ступеней давления. Такие турбины называются турбинами с отбором пара. Иногда бывают два отбора: один — для промышленных целей, из которого отдается пар при давлении $\sim 6-16$ атм, другой — для целей отопления (1,2—2,5 атм). Давление в этих отборах поддерживается постоянным (с некоторым допустимым отклонением от принятого); поэтому эти отборы называются регулируемы́ми.

Отбираемый пар направляется для удовлетворения тепловых нужд потребителя. Количество тепла, отдаваемого потребителю отбираемым паром в час, называется тепловой мощностью или тепловой нагрузкой тур-

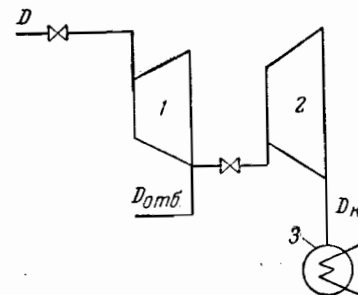
бины или установки. Тепловая нагрузка измеряется в ккал/час (или в млн. ккал/час).

В условных обозначениях турбину с одним отбором можно представить, как показано на фиг. 120. Трапеция 1 представляет собой часть высокого давления турбины (ч. в. д.); в этой части пар расширяется от начального давления до давления, принятого в отборе; трапеция 2 представляет собой часть низкого давления турбины (ч. н. д.), в которой пар расширяется от давления в отборе до давления в конденсаторе 3.

В общем случае в турбину поступает количество пара D ; весь этот пар расширяется в ч. в. д. и вырабатывает некоторую мощность; по выходе из ч. в. д. количество пара $D_{отб}$ поступает в отбор, а остальная пар поступает в ч. н. д. и расширяется там, вырабатывая при этом также некоторую электрическую мощность. Таким образом, электрическая мощность турбины складывается из электрических мощностей обеих частей турбины.

Теплофикационная турбина может работать при различных режимах. Она рассчитывается таким образом, чтобы давать номинальную мощность N_n при заданном номинальном отборе $D_{отб}^n$. При номинальных электрической и тепловой нагрузках турбина потребляет количество пара D_n кг/час; это — максимальный расход пара. На пропуск этого количества пара рассчитывается вся ч. в. д. с ее лопаточным аппаратом. Очевидно, в конденсатор при этом режиме будет поступать количество пара

$$D_k = D_n - D_{отб}^n. \quad (103)$$



Фиг. 120. Схема теплофикационной турбины с одним регулируемым отбором в условных обозначениях.

1 — часть высокого давления турбины (ч. в. д.); 2 — часть низкого давления турбины (ч. н. д.); 3 — конденсатор; D — количество пара, поступающего в турбину; $D_{отб}$ — количество пара, поступающего в отбор; $D_n = D - D_{отб}$ — количество пара, поступающего в ч. н. д. и конденсатор.

Вместе с тем турбина должна давать номинальную электрическую мощность и при отсутствии отбора. В этом случае она работает как конденсационная турбина. Расход пара на турбину при этом меньше, чем D_a , и поэтому ч. в. д. выработает меньшую мощность; следовательно, ч. н. д. должна вырабатывать большую мощность, чем при предыдущем режиме, и в конденсатор поступит количество пара D_n , большее чем D_k . Очевидно, что как ч. н. д., так и конденсатор должны быть рассчитаны на пропуск именно этого количества пара $D_n > D_k$.

Помимо описанных двух, могут быть разнообразные режимы, когда турбина дает номинальную электрическую мощность при отборе пара от нуля до номинального.

Режим, при котором турбина вырабатывает номинальную электрическую мощность и отдает номинальное количество отборного пара, будем называть номинальным режимом.

При максимальном расходе пара D_a могут быть и такие режимы, при которых количество отбираемого пара больше номинального. Так как через ч. в. д. в этом случае проходит прежнее количество пара D_a , а отбирается количество пара, большее чем $D_{отб}^H$, то в ч. н. д. поступит меньшее количество пара, чем по формуле (103), и потому мощность турбины при этих режимах будет меньше номинальной. Предельным для таких режимов будет тот, при котором все количество пара D_a поступающее в турбину, после прохождения ч. в. д. отбирается на производство. В этом случае ч. в. д. работает как самостоятельная турбина, однако с давлением на выходе значительно большим, чем у конденсационных турбин. Такая турбина, как указывалось, называется турбиной с противодавлением. Очевидно, ее мощность меньше, чем номинальная мощность обеих частей турбины. Однако такой режим практически недопустим; через ч. н. д. необходимо пропускать некоторое, хотя бы небольшое количество пара (около 5—8% от D_n) для ее вентиляции; в противном случае выделяющееся в ч. н. д. тепло трения от вращения дисков турбины о пар при отсутствии движения пара привело бы к опасному повышению температуры лопаток.

Рассмотрим уравнение расхода пара для описанной теплофикационной турбины с одним отбором пара. При $D_{отб} = 0$ уравнение это будет такое, как описано в § 41, т. е. по формуле (102):

$$D = x d_{э\kappa} N_n + (1 - x) d_{э\kappa} N. \quad (104)$$

Если же отбирать количество $D_{отб}$ пара, то мощность станет меньше, чем N , так как отобранный пар не совершит работу в ч. н. д. Чтобы мощность осталась прежней, нужно в турбину дать дополнительное количество пара, которое при расширении выработало бы такую же мощность, которую не создало количество $D_{отб}$ пара в ч. н. д. Очевидно, это дополнительное количество пара, расширяясь во всей турбине, а не только в ч. н. д., как отобранное количество, будет меньше его и составит, таким образом, только некоторую долю β от него, т. е. дополнительное количество пара будет $\beta D_{отб}$, где $\beta < 1$. Таким образом, расход пара теплофикационной турбиной составит:

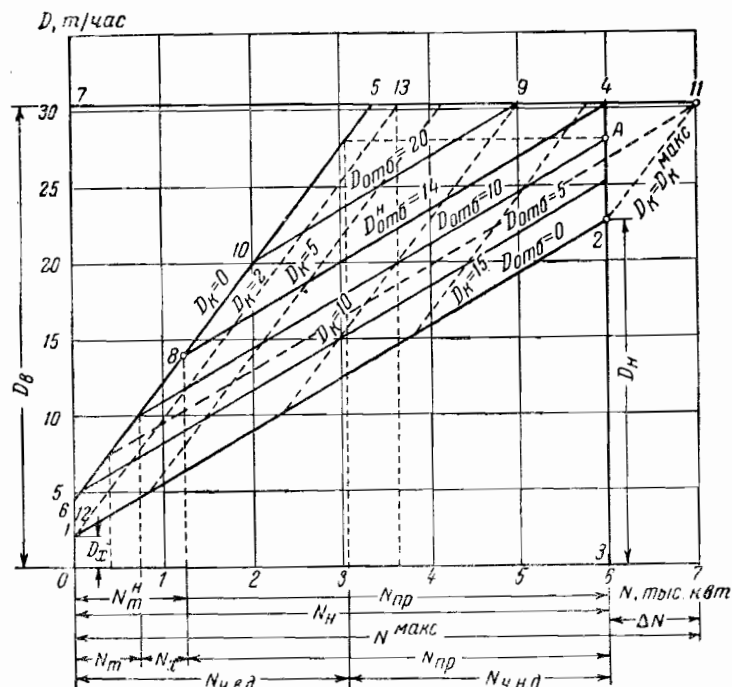
$$D = x d_{э\kappa} N_n + (1 - x) d_{э\kappa} N + \beta D_{отб}. \quad (105)$$

Коэффициент β определяется особым расчетом; он зависит от начальных параметров пара, давления в конденсаторе и давления отбора; для производимых в СССР турбин его значение составляет 0,3—0,6; называют его коэффициентом недовыработки.

Расход пара для различных режимов описываемой турбины можно представить графически; как и у конденсационной турбины, расход пара в зависимости от нагрузки можно представить прямой линией; только здесь для каждого значения отбора расход пара на всю турбину представится отдельной прямой линией. Совокупность таких линий для различных значений отборов дает диаграмму, описывающую всевозможные режимы турбины. На диаграмме режимов (фиг. 121) линия 1-2 соответствует такому режиму, при котором пар в отбор не поступает, т. е. линия 1-2 характеризует конденсационный режим рассматриваемой турбины; следовательно, отрезок 2-3 измеряет количество D_n пара, на которое рассчитываются ч. н. д. и конденсатор. Точка 4 определяет расход пара при номинальной электрической мощности и номинальном отборе, т. е. характеризует номинальный режим турбины. Таким образом, отрезок 3-4, равный отрезку 0-7, измеряет количество пара D_a , на которое рассчитывается ч. в. д. турбины.

Линия 5-6 характеризует режим турбины, при котором весь пар, поступающий в турбину, пройдя ч. в. д., поступает в отбор; иначе говоря, при этом режиме в конденсатор пар не поступает: $D_k = 0$ (теоретический случай) и ч. в. д. работает, как турбина с противодавлением.

Линия 4-8, параллельная линии 1-2, характеризует такой режим турбины, при котором в отбор поступает номинальное количество



Фиг. 121. Диаграмма режимов теплофикационной турбины с одним регулируемым отбором пара.

пара $D_{отб}^*$. При этом электрическая мощность изменяется от N_m^* до N_n^* . Здесь N_m^* — номинальная теплофикационная мощность турбины, т. е. теплофикационная мощность при номинальном режиме; так она называется потому, что эта мощность создается за счет количества пара, поступающего в отбор для нужд теплофикации. При режиме, соответствующем точке 8, вырабатывается только мощность N_m^* . Для любой другой точки на той же линии 4-8 в турбину поступает, кроме $D_{отб}^*$, и пар, проходящий всю турбину и направляющийся в конденсатор. Так, для точки 4 в конденсатор направляется

количество пара, равное $D_k = D_n - D_{отб}^*$. За счет этого пара создается конденсационная мощность

$$N_{np} = N_n - N_m^* \quad (106)$$

Эта конденсационная мощность называется привязанной конденсационной мощностью. Наличие привязанной конденсационной мощности в теплофикационной турбине не соответствует назначению турбины и является нежелательным.

Как было указано, увеличение отбора сверх $D_{отб}^*$ вызывает снижение электрической мощности. На диаграмме режимов проведена линия 9-10, параллельная линиям 8-4 и 1-2. Линия 9-10 характеризует такой режим турбины, при котором в отбор поступает некоторое количество пара $D_{отб} > D_{отб}^*$. Как видно, если при этом в турбину поступает максимальное количество пара D_n , на которое рассчитана ч. в. д., то вырабатываемая электрическая мощность составит $N_9 = 5000 \text{ кВт} < N_n$. Если же в отбор поступает все количество пара D_n , то турбина вырабатывает мощность $N_5 \approx 3300 \text{ кВт} < N_9 < N_n$.

При номинальном режиме в турбину поступает количество пара D_n , а в конденсатор: $D_k = D_n - D_{отб}^*$; между тем конденсатор, а вместе с ним и вся ч. н. д. рассчитаны на пропуск большего количества пара, а именно на D_n , при котором вырабатывается номинальная мощность N_n , если $D_{отб} = 0$. Таким образом, при номинальном режиме ч. н. д., а вместе с ней и конденсатор недоиспользованы на пропуск количества пара

$$D_{хв} = D_n - D_k = D_n - (D_n - D_{отб}^*) \quad (107)$$

Эта недоиспользованная пропускная способность ч. н. д. и конденсатора называется конденсационным хвостом турбины.

Конденсационный хвост турбины может быть использован для получения электрической мощности, большей чем номинальная. Для этого нужно полностью использовать ч. в. д. и ч. н. д. турбины. При этом, очевидно, потребуется уменьшить количество пара, поступающего в отбор, настолько, чтобы полностью использовать ч. н. д. и конденсатор. Линия 2-11, параллельная линии 5-6, характеризует такой режим турбины, при котором в конденсатор поступает полное количество пара, на которое рассчитаны он и ч. н. д. Очевидно, точка 11 соответствует максимальной возможной электрической мощности, так как при характеризуемом ею режиме полностью загружены обе части турбины. Максимальная мощность турбины в этом случае составит:

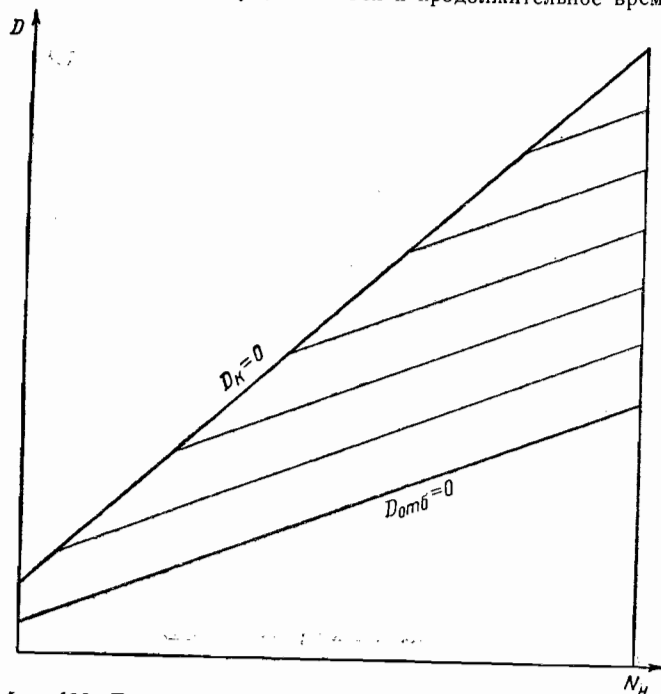
$$N_{max} = N_n + \Delta N \quad (108)$$

Этот режим возможен в том случае, если тепловая нагрузка потребителя может быть кратковременно снижена, если допустима кратковременная перегрузка электрического генератора и если этот режим разрешается заводом-изготовителем турбины.

Условия работы большинства теплофикационных турбин таковы, что первое условие выполнимо, так как отопительная нагрузка допу-

скает возможность кратковременных перерывов, в особенности в том случае, если они устраиваются по заранее составленному плану.

Второе условие также выполнимо при надлежащем охлаждении обмоток генератора. Таким образом, конденсационный хвост турбины может быть использован при неожиданном уменьшении мощности других генераторов и для покрытия небольших по продолжительности пиковых нагрузок в электрической сети. Вместе с тем такой режим при особых условиях может осуществляться и продолжительное время.



Фиг. 122. Диаграмма режимов теплофикационной турбины без привязанной конденсационной мощности.

На фиг. 121 проведена еще линия 12-13, характеризующая такой режим, при котором в конденсатор поступает наименьшее количество пара; это — так называемый вентиляционный расход пара. Между этой линией и линией D_k^{max} проведен пунктиром ряд линий, характеризующих тот или иной постоянный расход пара в конденсатор.

В начальный период построения теплофикационных турбин их строили со значительной привязанной конденсационной мощностью. В настоящее время строятся теплофикационные турбины без привязанной конденсационной мощности, т. е. такие, номинальная мощность которых вырабатывается отборным паром (фиг. 122). В конденсатор при этом

поступает только незначительное количество пара, необходимое для вентиляции ч. н. д. Такая турбина может работать и в отсутствии отбора и давать при этом номинальную мощность. Очевидно, конденсационный хвост в этом случае составляет полную пропускную способность ч. н. д. и конденсатора, так как при номинальном режиме и ч. н. д. и конденсатор не загружены (если не считать вентиляционного расхода пара).

Рассмотренная здесь диаграмма, в которой различные режимы характеризуются прямыми линиями, только приблизительно описывает действительные режимы. Заводами-изготовителями на основании специальных расчетов и опытных данных составляются диаграммы режимов, более точно характеризующие возможные режимы турбины.

Пример 24. На фиг. 121 приведена диаграмма режимов теплофикационной турбины с одним регулируемым отбором.

Определить: 1) номинальную электрическую мощность турбины и номинальный отбор; 2) на какую пропускную способность рассчитаны ч. в. д. и ч. н. д.; 3) каковы номинальная теплофикационная и привязанная конденсационная мощности турбины; 4) определить количество пара, поступающего в конденсатор при номинальной электрической мощности и номинальном отборе; 5) какова величина конденсационного хвоста; 6) какова мощность турбины при максимальном отборе и минимальном пропуске пара в конденсатор; 7) какова максимальная мощность турбины при полной нагрузке ч. в. д. и ч. н. д.; 8) для заданной точки А определить: а) электрическую мощность турбины; б) поток пара через ч. в. д., в отбор, ч. н. д. и конденсатор; в) теплофикационную и конденсационную мощности; г) мощности, вырабатываемые отдельно ч. в. д. и ч. н. д.

1. Номинальная мощность $N_n = 6000$ квт; номинальный отбор $D_{отб}^n = 14,0$ т/час.

2. Часть высокого давления рассчитана на пропускную способность $D_v = 30,2$ т/час; ч. н. д. рассчитана на пропускную способность $D_n = 22,6$ т/час.

3. Номинальная теплофикационная мощность турбины $N_t^n = 1300$ квт; привязанная конденсационная мощность $N_{np} = 6000 - 1300 = 4700$ квт.

4. Количество пара, поступающего в конденсатор при номинальной электрической мощности и номинальном отборе, составляет:

$$D_k = D_v - D_{отб}^n = 30,2 - 14 = 16,2 \text{ т/час.}$$

5. Конденсационный хвост

$$D_{хв} = D_n - D_k = 22,6 - 16,2 = 6,4 \text{ т/час.}$$

6. Мощность турбины при максимальном отборе и минимальном пропуске в конденсатор $D_k = 2$ т/час составляет (точка 13):

$$N \approx 3600 \text{ квт;}$$

при этом

$$D_{отб} = D_v - D_k^{мин} = 30,2 - 2 = 28,2 \text{ т/час.}$$

7. Максимальная мощность турбины при полной загрузке ч. в. д. и ч. н. д. составляет (точка II):

$$N_{макс} = 7000 \text{ кВт.}$$

При этом в отбор поступает

$$D_{отб} = D_v - D_k = 30,2 - 22,6 = 7,6 \text{ т/час.}$$

Теплофикационная мощность

$$N_m = 400 \text{ кВт.}$$

8. Для точки А:

а) $N = 6000 \text{ кВт};$

б) поток пара через ч. в. д. $D_{ч. в. д.} = 28 \text{ т/час};$ поток пара в отбор $D_{отб} = 10 \text{ т/час};$ поток пара в ч. н. д. и конденсатор

$$D_{ч. н. д.} = 28 - 10 = 18 \text{ т/час};$$

в) теплофикационная мощность

$$N_m \approx 700 \text{ кВт};$$

конденсационная мощность

$$N_k = 6000 - 700 = 5300 \text{ кВт};$$

г) проектируя точку А на линию $D_k = 0$, находим мощность ч. в. д.:

$$N_{ч. в. д.} = 3100 \text{ кВт}$$

и как разность:

$$N_{ч. н. д.} = N - N_{ч. в. д.} = 6000 - 3100 = 2900 \text{ кВт.}$$

43. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРОВЫХ ТУРБИН

На крупных электрических станциях вырабатывается, как правило, переменный электрический ток, имеющий 50 периодов в секунду. Для этого вал генератора тока должен делать 50 оборотов в секунду, или 3000 об/мин. Обычно валы турбины и генератора соединены между собой муфтой, так что один служит продолжением другого; таким

образом, и турбина вне зависимости от нагрузки должна делать 3000 об/мин; допускаются лишь незначительные отклонения от этого числа.

Чтобы соблюсти постоянство числа оборотов, мощность, вырабатываемая турбиной, должна соответствовать нагрузке потребителя. Если обнаружится несоответствие, например если нагрузка потребителя упадет, число оборотов будет стремиться расти.

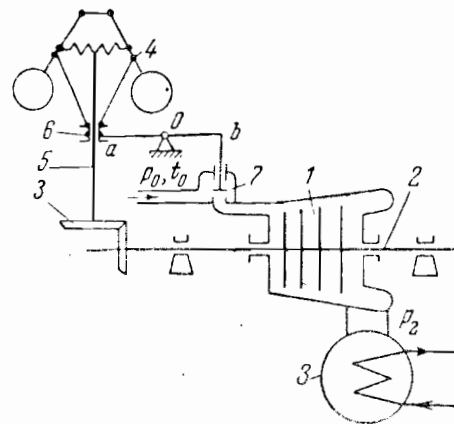
Для того чтобы восстановить число оборотов, необходимо уменьшить количество пара. Таким образом, количество пара, подаваемого в турбину, необходимо регулировать, для того чтобы поддерживать нужное число оборотов.

Простейшая схема автоматического регулирования показана на фиг. 123. На ней: 1 — паровая турбина; 2 — вал ее; 3 — конденсатор; 4 — центробежный регулятор; 5 — вал регулятора; 6 — муфта регулятора; 7 — регулирующий клапан.

Рассмотрим его работу.

Пусть нагрузка потребителя увеличилась; число оборотов вала начнет понижаться. Это вызовет понижение числа оборотов вала 5 центробежного регулятора, вследствие чего его грузы опустятся, а вместе с ними займет более низкое положение муфта 6. Рычаг ab повернется вокруг неподвижной точки O . Точка b поднимется, отчего увеличится сечение для прохода пара под клапаном 7; количество пара, поступающего в турбину, увеличится, и в результате число оборотов хотя и понизится немного, но удержится постоянным и будет соответствовать новой нагрузке турбины, но несколько отклонится от 3000 об/мин.

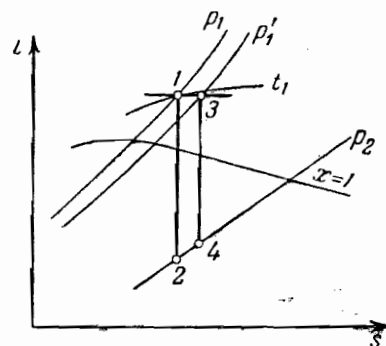
При изменении сечения для прохода пара изменяется не только количество пара, но и разность $h_0 = i_1 - i_2$, т. е.



Фиг. 123. Схема прямого регулирования. 1 — паровая турбина; 2 — вал ее; 3 — конденсатор; 4 — центробежный регулятор; 5 — вал регулятора; 6 — муфта регулятора; 7 — регулирующий клапан.

работа каждого килограмма пара. Происходит это потому, что когда пар проходит через суженное сечение, давление его падает. Это явление называется *м я т и е м*, или *д р о с с е л и р о в а н и е м*, пара.

По *is*-диаграмме можно установить, как изменяется при этом работа 1 кг пара. Для этого пользуются тем обстоятельством, что при дросселировании не меняется теплосодержание пара. Поэтому из точки 1 (фиг. 124),

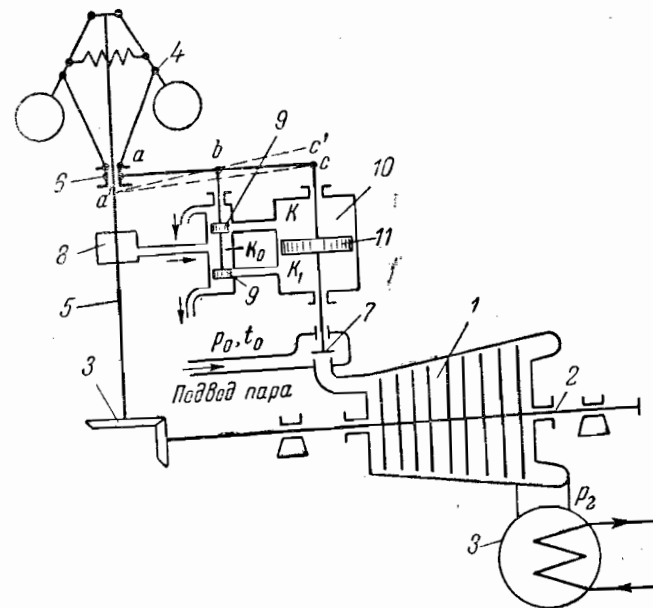


Фиг. 124. Процесс расширения пара в *is*-диаграмме при дросселировании его в регулирующем клапане.

характеризующей начальное состояние пара, поступающего в турбину, проводят линию, параллельную оси абсцисс, так, чтобы она пересекла изобару p_1' , характеризующую давление, которое имеет пар после дросселирования; в пересечении получается точка 3, соответствующая новому состоянию пара, с которым он поступает в турбину. Проведя из точки 3 адиабату 3-4, находим новое теплопадение: $h_0' = i_3 - i_4$, которое характеризует работу 1 кг пара в турбине, если перед поступлением он подвергся мятию (дросселированию). Как видно, в этом случае работа 1 кг пара меньше, чем если бы пар не подвергался мятию.

При полной нагрузке турбины клапан открыт так, что сечение для прохода пара наибольшее. При этом через него проходит расчетное количество пара. При уменьшении нагрузки клапан несколько опускается; это ведет к тому, что уменьшается количество пара, а вместе с тем происходит его дросселирование, отчего снижается работа 1 кг пара. От действия обеих этих причин уменьшается мощность, вырабатываемая турбиной. При этом способе регулирования, который называется *д р о с с е л ь н ы м*, мятию подвергается все количество пара; поэтому такой метод регулирования неэкономичен.

В описанной схеме регулятор при помощи рычага *ab* непосредственно воздействовал на регулирующий клапан. Это — *п р я м о е* регулирование. Оно может быть использовано лишь в турбинах небольшой мощности (до 50—60 квт). В более мощных турбинах усилие, требующееся



Фиг. 125. Схема непрямого регулирования паровой турбины.
1 — паровая турбина; 2 — вал ее; 3 — конденсатор; 4 — центробежный регулятор; 5 — вал регулятора; 6 — муфта регулятора; 7 — регулирующий клапан; 8 — масляный насос; 9 — золотники; 10 — исполнительный механизм регулятора; 11 — поршень исполнительного механизма.

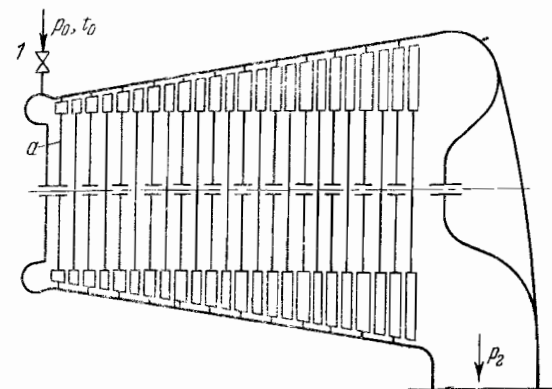
для подъема клапана, столь значительно, что приходится использовать особый исполнительный механизм (сервомотор), который и производит перестановку клапана, как только нарушится соответствие между нагрузкой потребителя и мощностью турбины и изменится число оборотов турбины. На фиг. 125 представлена схема непрямого регулирования. На ней цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 обозначены те же детали, что и на фиг. 123; 8 — масляный насос, приводимый в движение от вала регулятора 5. Под действием этого на-

сосо. масло поступает в камеру K_0 золотников 9, закрывающих каналы, которые соединяют эту камеру с камерами K и K_1 цилиндра исполнительного механизма 10. В цилиндре ходит поршень 11. Работа исполнительного механизма заключается в следующем. При соответствии между нагрузкой потребителя и мощностью турбины золотники 9 закрывают каналы, ведущие к камерам K и K_1 , и сообщения с камерой K_0 нет. Пусть теперь нагрузка турбины увеличилась. Это вызовет понижение числа ее оборотов, и грузы, а с ними и муфта 6 опустятся. При неподвижной в первый момент точке c (так как клапан 7 еще не пришел в движение) точка b , а с ней и золотники 9 опустятся, рычаг ac займет положение $a's$, указанное пунктиром. Масло из камеры K через канал пойдет на слив, а масло из камеры K_0 начнет под давлением, развиваемым масляным насосом, поступать в камеру K_1 . Это вызовет подъем поршня исполнительного механизма, а с ним и клапана 7; подвод пара увеличится. Вместе с тем поднимется точка c рычага ac при теперь уже неподвижной точке a' ; при этом поднимется точка b , а с ней и золотник 9; рычаг ac займет положение $a's'$; перетекание масла прекратится тогда, когда золотники закроют каналы; это произойдет тогда, когда изменившийся поток пара в турбине будет соответствовать мощности, равной нагрузке потребителя; число оборотов турбины окажется несколько иным, чем оно было раньше, но и теперь оно не намного будет отличаться от нормального для данной турбины.

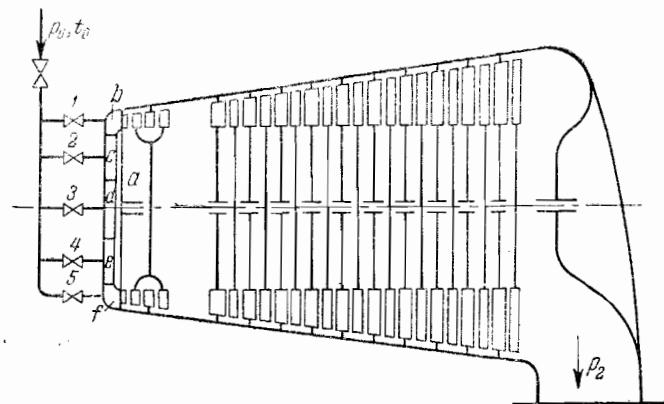
Схема турбины, в которой осуществлено описанное здесь дроссельное регулирование, представлена на фиг. 126. На ней диафрагма a несет сопловой аппарат первой ступени, к которому подводится весь пар через регулирующийся клапан 1. На него и воздействует описанная схема регулирования; при уменьшении нагрузки турбины клапан несколько опускается и весь пар подвергается дросселированию.

Для того чтобы избежать необходимости подвергать мятию весь пар, поступающий в турбину, сопловой аппарат первой ступени делят на ряд групп. Это показано на фиг. 127; здесь устроено пять групп; группы сопел имеют свои отдельные камеры b, c, d, e и f , к которым подводится пар через отдельные регулирующие клапаны 1, 2, 3, 4 и 5. При полной нагрузке они все открыты; при уменьшении нагрузки уменьшается количество пара только через один пя-

тый клапан и только в нем происходит мятие пара, тогда как все остальные открыты полностью. При дальнейшем уменьшении нагрузки пятый клапан полностью закрыт,



Фиг. 126. Схема парораспределения в турбине с дроссельным регулированием.

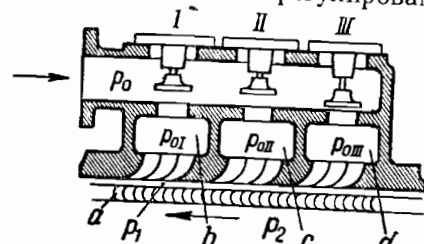


Фиг. 127. Схема парораспределения в турбине с сопловым регулированием.

а частично открыт четвертый клапан, и теперь только в нем происходит мятие пара, и т. д. Таким образом, при этом способе регулирования, называемом сопловым, имеется несколько регулирующих клапанов. При изменяющейся на-

грузке только в одном производится мятие пара; остальные клапаны полностью открыты или полностью закрыты.

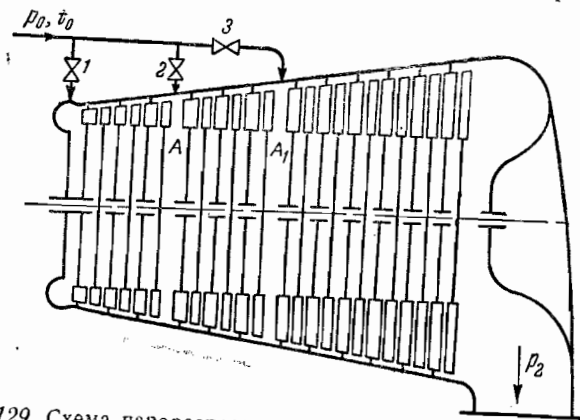
Этот способ регулирования более экономичен, чем предыдущий. На фиг. 128 показана схема конструктивного выполнения соплового регулирования при трех регулирующих клапанах. На этой схеме:



Фиг. 128. Схема соплового регулирования.

а — рабочее колесо; б, с и d — камеры, ведущие каждая к своей группе сопел; I, II, III — регулирующие клапаны каждой из групп сопел; в положении, указанном на схеме, мятие производит

ся клапаном III; клапаны I и II полностью открыты. При сопловом регулировании необходимо передавать усилие на ряд клапанов. Это осуществляется при помощи



Фиг. 129. Схема парораспределения в турбине при сочетании обводного регулирования с дроссельным.

поворотного исполнительного механизма; воздействие от его вала передается поочередно на несколько клапанов.

При обоих способах регулирования, дроссельном и сопловом, пар иногда через все сопла подают к первой ступени лишь при экономической мощности турбины. При

дальнейшем росте мощности до номинальной часть пара подают к одной из последующих ступеней А и А₁ (фиг. 129). Получается так называемое обводное регулирование.

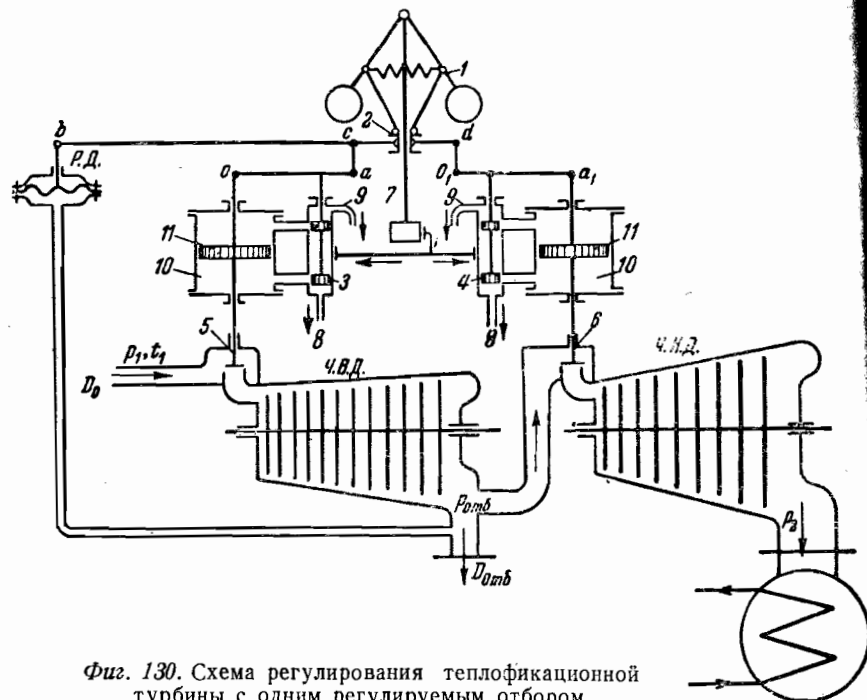
При полной нагрузке открыты (фиг. 129) три клапана: 1, 2 и 3. При снижении нагрузки уменьшается подача через клапан 3 и только в нем происходит дросселирование; оба других открыты полностью; при дальнейшем понижении клапан 3 совсем закрывается, а мятие подвергается пар, проходящий через клапан 2, и т. д.

44. РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИКАЦИОННОЙ ТУРБИНЫ С ОДНИМ ОТБОРОМ ПАРА

В соответствии с назначением турбины — вырабатывать 50-периодный электрический ток и подавать потребителю пар обусловленного давления — задачей регулирования ставится поддерживать вне зависимости от тепловой и электрической нагрузок постоянное число оборотов (в определенных небольших пределах изменения) и постоянное давление (также в определенных небольших пределах изменения).

На фиг. 130 представлена схема регулирования теплофикационной турбины с одним отбором; место отбора делит турбину на две части: ч. в. д. и ч. н. д. В отличие от регулирования конденсационной турбины здесь центробежный регулятор скорости 1 воздействует на два исполнительных механизма 10, связанных в отдельности с регулирующим клапаном 5 ч. в. д. и регулирующим клапаном 6 ч. н. д. На одном валу с регулятором сидит масляный насос 7, подающий масло в камеры золотников 3 и 4. Слив масла происходит по каналам 8 и 9. Давление отбора $P_{отб}$ поддерживается регулятором давления Р. Д. Это — наиболее распространенная схема так называемого связанного регулирования. В этой системе подаются два импульса на жесткий, представляющий собой одно целое рычаг bd : один — при изменении числа оборотов от центробежного регулятора; в этом случае изменяет свое положение муфта 2 и рычаг db перемещается относительно точки b , связанной с регулятором давления Р. Д.; точка b в этом случае неподвижна, так как она реагирует только на измене-

ние давления $p_{отб}$ в отборе; другой импульс при изменении давления в отборе — от регулятора давления $P. Д.$; в этом случае рычаг db перемещается относительно муфты 2, которая остается неподвижной, так как электрическая нагрузка, а следовательно, и число оборотов остаются неизмен-



Фиг. 130. Схема регулирования теплофикационной турбины с одним регулируемым отбором.

1 — скоростной вентилятор; 2 — муфта регулятора; 3 и 4 — поршни масляных золотников; 5 — регулирующий клапан ч. в. д. турбины; 6 — регулирующий клапан ч. н. д. турбины; 7 — масляный насос; 8 и 9 — сливные каналы; 10 — исполнительный механизм (сервомотор); 11 — поршень исполнительного механизма.

ными; при перемещении рычага bd изменяют свое положение точки b и d .

Рассмотрим действие системы регулирования для двух случаев: изменения электрической нагрузки и изменения тепловой нагрузки. Предположим, что потребление электрической нагрузки уменьшилось. Так как при этом создается превышение мощности турбины над нагрузкой потребителя, число оборотов станет увеличиваться, грузы регулятора 1

разойдутся и при неподвижной точке b рычаг bcd пойдет вверх, поднимая вместе с тем точки a и O_1 , а вместе с ними и поршни 3 и 4 масляных золотников. Масло из напорного трубопровода поступит в верхние камеры исполнительных механизмов 10, а из нижних камер оно будет сливаться; поршни 11, соединенные с клапанами 5 и 6, опустятся, в связи с чем уменьшатся сечения, через которые пар поступает в турбины, а вместе с этим уменьшится и количество пара. При опускании поршней 11 исполнительных механизмов 10 опустятся точки O и a_1 , вследствие чего станут опускаться и поршни 3 и 4 масляных золотников; действие регулятора прекратится тогда, когда эти поршни закроют проходные каналы для масла, что будет означать соответствие мощности турбины нагрузке потребителя.

При этом надо отметить, что отдельные части рычага bcd , а также рычаги Oa и O_1a_1 так подобраны, что изменение мощности всей турбины и распределение мощности между ч. в. д. и ч. н. д. не вызывают изменения давления в отборе при регулировании числа оборотов.

При увеличении электрической нагрузки потребителя система будет работать в обратном направлении.

Рассмотрим действие регулирования при импульсе от давления пара, отпускаемого потребителю. Предположим, что тепловая нагрузка увеличилась. Давление пара $p_{отб}$ у штуцера отбора вследствие этого уменьшится, и мембрана регулятора давления $P. Д.$ опустится, увлекая за собой точку b ; муфта 2 останется неподвижной, так как она реагирует только на импульс от числа оборотов, которое в рассматриваемом случае не изменяется; рычаг bcd начнет поворачиваться около неподвижной точки 2, причем точка b опустится, а d поднимется. Перемещение рычага bcd вызовет понижение точки c , что будет сопровождаться поступлением масла из напорного маслопровода в нижнюю камеру левого исполнительного механизма 10 и повышение точки d , что вызовет поступление масла из напорного маслопровода в верхнюю камеру правого исполнительного механизма 10; при этом поступление пара в ч. в. д. увеличится, а поступление пара в ч. н. д. — уменьшится; следствием этого будет увеличение поступления пара в отбор; изменения в подаче пара в обе части турбины вследствие специально подобранных размеров рычагов будут таковы, что

суммарная мощность турбины не изменится. Действие регулирования прекратится тогда, когда в отборе установится давление, соответствующее новому количеству отбираемого пара.

Система будет работать в обратном направлении при уменьшении тепловой нагрузки потребителя.

Рассмотренные схемы, широко распространенные в действующих турбинных установках, обладают рядом недостатков, вследствие чего в последние годы конструкторская мысль выдвинула ряд других схем регулирования.

В описанных схемах импульс передается при помощи рычагов, связанных между собой шарнирами, которые вследствие трения изнашиваются и от нагревания расширяются. Оба эти фактора вызывают затруднения в эксплуатации, вызывая уменьшение чувствительности и неточные действия регулятора. В новых системах регулирования рычажные связи регулирования заменяются гидравлическими.

В описанных схемах число оборотов регулируется центробежным регулятором, вал которого приводится в движение от вала турбины через зубчатую или червячную передачу; зубчатый масляный насос сидит на том же валу, что и центробежный регулятор. Шарнирные сочленения и трущиеся части в процессе работы изнашиваются, требуют сравнительно частого ремонта и замены. В новых системах так называемого гидродинамического регулирования центробежный регулятор и зубчатый масляный насос заменены центробежными насосами, насаженными непосредственно на вал турбины. Это привело к уменьшению трущихся частей.

Ряд новых схем регулирования паровых турбин, внедряемых в настоящее время на станциях СССР, разработан турбостроительными заводами и институтами (ВТИ, МЭИ).

45. ГАЗОВЫЕ ТУРБИНЫ

Газовая турбина, как и двигатель внутреннего сгорания, использует в качестве рабочего тела идеальный газ — продукты горения топлива. Она не имеет недостатков д. в. с., обусловленных возвратно-поступательным движением поршня; тем не менее пока еще нет условий, благоприятных тому, чтобы газовая турбина стала двигателем на централь-

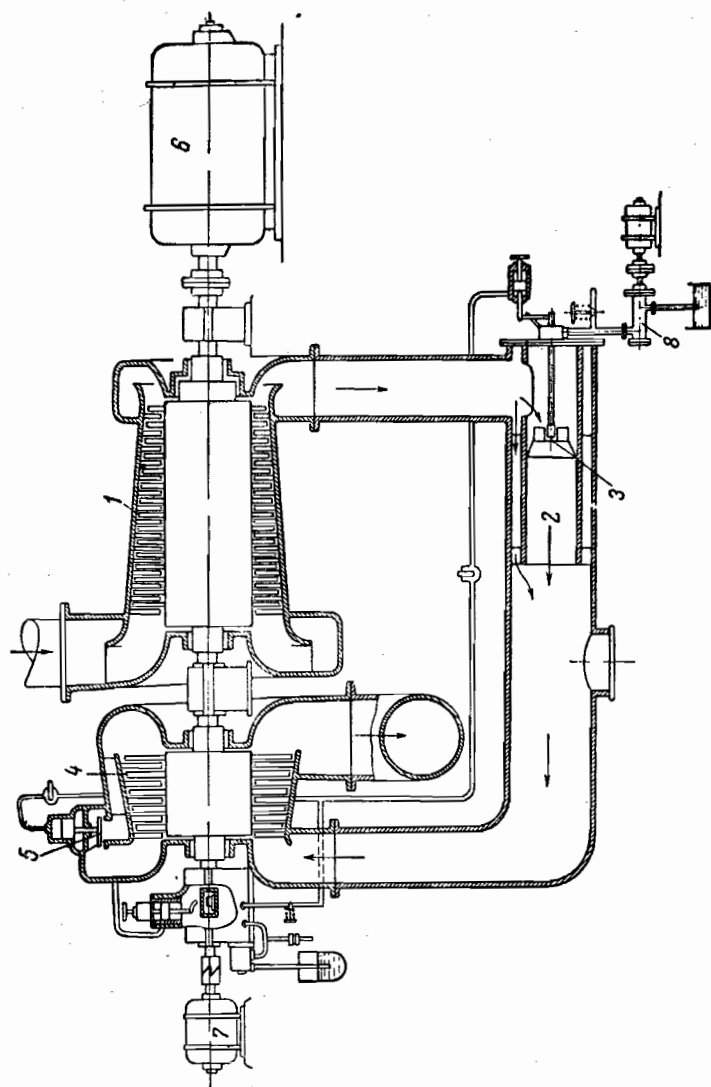
ных электрических станциях. Это вытекает из особенностей ее как двигателя.

Газотурбинный агрегат состоит из газовой турбины 4 и компрессора 1, сидящих на одном валу. Схема представлена на фиг. 131.

Собственно тепловым двигателем является турбина. Компрессор служит в качестве вспомогательной машины, назначение которой состоит в том, чтобы забирать из окружающей среды воздух, необходимый для горения топлива, сжимать его и при повышенном давлении нагнетать в камеру горения 2 агрегата. Туда же подается насосом жидкое топливо (или особым газовым компрессором — газообразное топливо). В камере сгорания происходит горение топлива, в результате чего получается рабочее тело — продукты горения высокой температуры ($1200—1500^{\circ}\text{C}$), неприемлемой по условиям прочности металлических лопаток газовой турбины, поскольку первым рядом лопаток приходится работать все время при этой температуре при отсутствии охлаждения, как это делается в д. в. с. Для возможности надежной работы лопаток продукты горения, выходящие из камеры горения, смешивают с холодным воздухом, идущим из компрессора. Получившаяся газовая смесь уже приемлемой температуры $600—800^{\circ}\text{C}$ поступает в газовую турбину 4, расширяется в соплах, а затем отдает лопаткам свою кинетическую энергию. Отработавшие газы через патрубок покидают газовую турбину. Часть механической энергии, выработанной турбиной, тратится на сжатие воздуха в компрессоре, остальная используется для вращения электрического генератора или какой-либо машины.

Использование твердого топлива в описанной схеме сильно затруднено, так как вместе с газами может увлекаться зола топлива, которая быстро истирает и приводит в негодность лопатки турбины.

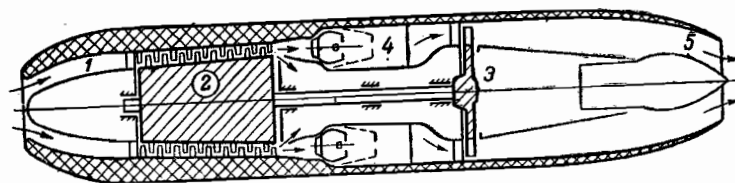
Газовая турбина имеет перед паровым двигателем ряд преимуществ; отпадает необходимость в паровом котле, конденсаторе, поэтому вся установка легче и меньше по размерам. По экономичности газотурбинные установки могут превосходить небольшие паросиловые установки, в особенности, например, на паровозах. Поэтому газовая турбина имеет перспективы к использованию на транспорте, на тех участках железнодорожного пути, где по тем или иным соображениям используется жидкое топливо. Однако



Фиг. 131. Схема газотурбинного агрегата.
1 — осевой компрессор; 2 — камера сгорания; 3 — форсунка; 4 — газовая турбина;
5 — обводной клапан; 6 — электрический генератор; 7 — пусковой
электродвигатель; 8 — топливный насос.

необходимость использовать дорогие и дефицитные жидкое и газообразное топлива пока затрудняют применение ее как двигателя на центральных электрических станциях. Газовая турбина как двигатель электростанций находит себе применение в тех промышленных предприятиях, где по условиям технологического процесса получается большое количество горючего газа, который может служить для газовой турбины топливом.

На электростанциях газовая турбина имеет также большие перспективы применения в связи с подземной газифи-



Фиг. 132. Схема турбореактивного авиационного двигателя.
1 — диффузор; 2 — компрессор; 3 — газовая турбина; 4 — камера
сгорания; 5 — выходное сопло.

кацией угля (см. § 28). Получающийся газ подземной газификации при сравнительно небольшой теплотворной способности экономически целесообразно не отправлять по трубам к местам потребления, а сжигать на месте добычи как топливо для газовых турбин.

В СССР над проблемой газовой турбины для электрических станций работает ряд институтов и заводов (Невский машиностроительный завод, Ленинградский металлический завод и др.).

Однако наибольшие перспективы к использованию газовой турбины на электрических станциях откроются, когда будет найден способ полной очистки продуктов горения твердого топлива от золы.

Наибольшее распространение газовая турбина получила в авиации как составная часть одного из типов реактивных двигателей. Схема такого реактивного двигателя представлена на фиг. 132. Принцип работы его заключается в следующем.

Воздух поступает слева через канал 1 в компрессор 2, приводимый во вращение газовой турбиной 3. Сжатый в компрессоре воздух направляется в камеру

сгорания 4, куда подается и топливо. Получающиеся продукты горения поступают на лопатки газовой турбины, приводящей в движение компрессор. По выходе из турбины газы обладают еще большой энергией. При выходе их из сопла 5 создается реактивная сила, направленная в противоположную движению газов сторону. Эта реактивная сила и создает поступательное движение всего аппарата (самолета, снаряда и др.).

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

39. Что показывает термический к. п. д.?
40. Расскажите, из каких процессов состоит цикл с подводом тепла при $p = \text{const}$.
41. Какие основные потери тепла имеются в двигателях внутреннего сгорания? Укажите их приблизительное численное значение.
42. По какому признаку различаются топлива, используемые в двигателях внутреннего сгорания?
43. Какие существуют способы смесеобразования?
44. Что такое степень сжатия и как она влияет на к. п. д. двигателя?
45. Какие существуют двигатели, работающие водяным паром? Каковы основные принципы их работы?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПРОРАБОТКИ

32. 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 $t_2 = 200^\circ \text{C}$?

Ответ: 49,3%; 63,3%; 38,8%.

33. Вычислить расход топлива на 1 л. с. ч. в двигателе, работающем на бензине с теплотой сгорания $Q_H^p = 10\,520 \text{ ккал/кг}$, если для него эффективный к. п. д. составляет 22%.

Ответ: 0,274 кг/э. с. ч.

34. Сравнить по экономичности два двигателя, из которых один расходует 0,22 кг/э. с. ч. нефти с $Q_H^p = 9\,800 \text{ ккал/кг}$, другой 0,20 кг/э. с. ч. с $Q_H^p = 10\,200 \text{ ккал/кг}$.

Ответ: первый расходует 2 160 ккал/э. с. ч., второй 2 040 ккал/э. с. ч.

ГЛАВА ПЯТАЯ ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

46. 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, баков, оборудования для очистки питательной воды, подачи топлива, удаления золы.

На каждой станции имеется топливный склад.

На фиг. 133 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 железнодорожными вагонами или вагонетками) подают в бункер, и из него оно по рукавам сползает в топку. Горячие газы, получившиеся в результате горения с температурой до $1\,200\text{—}1\,600^\circ \text{C}$, омывают трубки котла, а затем перегревателя. По выходе из котла газы имеют еще достаточно высокую температуру ($350\text{—}450^\circ \text{C}$). 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 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 обеспечения хорошего горения топлива подогреть воздух, поступающий в топку. Для этого устанавливают воздушный экономайзер (воздухоподогреватель), в котором воздух, проходя по устроенным для него каналам, отнимает тепло от газов, проходящих по другим, соседним каналам. Таким образом,

бина, конденсатор, конденсатный насос, питательный бак и т. д.

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, все аппараты для переключения тока и, наконец, здесь же помещаются трансформаторы для повышения напряжения электрического тока, если он передается на далекие расстояния (см. § 52).

Для схематического изображения паросиловой установки прибегают к условным обозначениям. Они приведены на фиг. 134.

Если применить эти условные обозначения, то схема простейшей паросиловой установки примет вид, указанный на фиг. 135.

Здесь 1 — котел с перегревателем; 2 — турбина с генератором электрического тока (турбогенератор); 3 — конденсатор; 4 — конденсатный насос; 5 — питательный бак; 6 — питательный насос; 7 — циркуляционный насос. Средами указано направление движения пара, конденсата, циркуляционной воды.

Фиг. 134. Условные обозначения для схемы паросиловой установки.

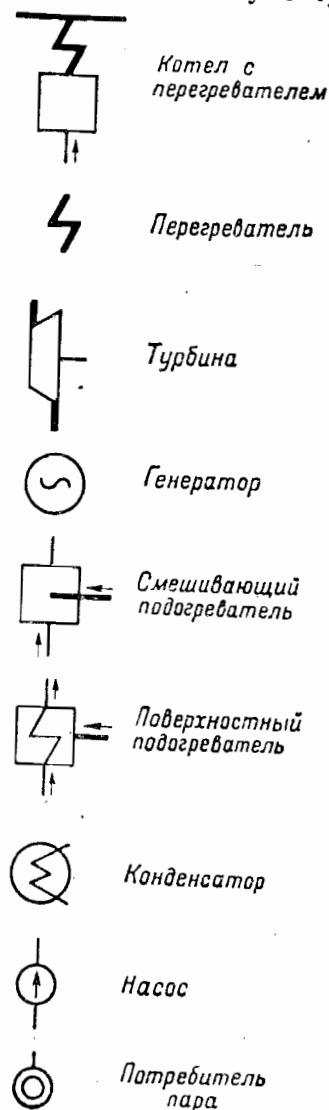
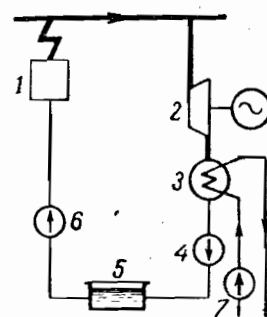
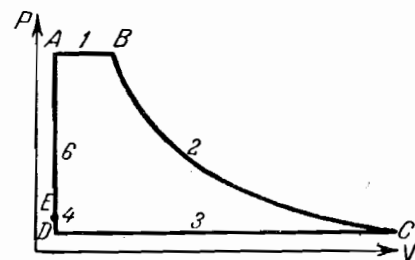


Схема эта упрощенная: в ней не показана установка для очистки добавочной питательной воды и др.

Рассмотрим теперь, что происходит с рабочим телом при прохождении его через описанные здесь агрегаты. Как и раньше, проследим это по $p-v$ -диаграмме (фиг. 136). Пусть точка E характеризует состояние воды, когда она находится в питательном баке. Отсюда она поступает в питательный насос, в котором давление поднимается до давления пара в котле (практически несколько



Фиг. 135. Схема паросиловой установки в условном обозначении.



Фиг. 136. Цикл простейшей паросиловой установки.

больше). Объем воды при этом не изменяется, так как вода почти несжимаема. Линия EA на фиг. 136 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); здесь 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. 136 указаны те же агрегаты, что и на схеме фиг. 135.

Описанная станция является простейшей паросиловой установкой; круговой процесс изменения состояния рабочего тела в такой простейшей паросиловой установке называется циклом Ренкина. На сооре-

Значение t можно найти, если из точки 2 дойти по изо-
баре p_2 до верхней пограничной кривой (точка 3) и про-
честь значение изотермы, проходящей через эту точку. Это
и будет значение t . Иначе значение t может быть найдено
по таблице насыщенного пара.

Рассмотрим, от каких факторов зависит термический
к. п. д. цикла простейшей паросиловой установки, опреде-
ляемый по формуле (110). Начальное теплосодержание i_1
пара, поступающего в двигатель, зависит от состояния пара,
т. е. от его давления p_1 и температуры t_1 . Конечное тепло-
содержание i_2 пара зависит от того, до какого давления p_2
расширяется 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
зависит от того, каковы давление и температура пара в на-
чальном состоянии (при поступлении в двигатель) и каково
давление его по выходе из двигателя (т. е. каково давле-
ние в конденсаторе).

Нетрудно установить, как именно влияют начальное со-
стояние пара и давление при выходе из двигателя на терми-
ческий 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 значения к. п. д. для ряда случаев,
различающихся только начальным давлением; для выявле-
ния влияния температуры пара нужно сделать те же расче-
ты, изменяя значение температуры; так же поступают, же-
лая найти влияние конечного давления пара (т. е. пара,
выходящего из турбины и поступающего в конденсатор).

В следующих ниже трех таблицах приведены подсчитан-
ные таким образом значения η , выявляющие влияние
параметров состояния пара на экономичность процесса пре-
ращения тепловой энергии в механическую. Из таблиц
видно, что *увеличение давления и температуры пара, по-
ступающего в двигатель, влечет за собой увеличение терми-
ческого к. п. д. цикла; благоприятным для η является и
уменьшение давления пара, выходящего из двигателя.*

Итак, для повышения экономичности превращения теп-
ла в работу в цикле простейшей паросиловой установки
требуется, чтобы в двигатель поступал пар максимально
возможных давления и температуры, а выходил из него —

Значения термического к. п. д. цикла простейшей паросиловой установки для различных начальных давлений

$p_1, \text{ ата}$	15	25	50	75	100	125
η_t	0,340	0,368	0,388	0,404	0,414	0,420

Для всех случаев принято: $p_2 = 0,04 \text{ ата}$; $t_1 = 400^\circ \text{ С}$.

Значения термического к. п. д. цикла простейшей паросиловой установки для различных начальных температур

$t, ^\circ \text{С}$	300	350	400	450	500	550
η_t	0,374	0,380	0,388	0,395	0,401	0,408

Для всех случаев принято: $p_1 = 50 \text{ ата}$; $p_2 = 0,04 \text{ ата}$.

Значения термического к. п. д. цикла простейшей паросиловой установки для различных конечных давлений

$p_2, \text{ ата}$	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: $p_1 = 50 \text{ ата}$; $t_1 = 400^\circ \text{ С}$.

возможно более низкого давления. Однако повышение на-
чальных параметров создает значительные трудности. Чем
выше давление, тем труднее и дороже построить двигатель,
котел и всю запорную аппаратуру для пара (вентили, за-
движки). В настоящее время считают целесообразным
строить самые крупные станции на начальное давление
пара 170—200 ата и выше. Для турбин, имеющих мощ-
ность 25—100 тыс. кВт, давление 90 ата принимают сейчас
в качестве стандартного давления. Для турбин меньшей
мощности стандартное давление составляет 35 ата.

Чем выше температура, тем труднее подобрать металлы,
которые не окисляются и сохраняют свою прочность при
высоких напряжениях. Приходится применять сплавы желе-
за со значительными количествами других дорогих и дефи-
цитных металлов. Наивысшая освоенная на наших электро-
станциях температура пара у турбин в настоящее время
составляет 550° С .

При входе в турбины с начальным давлением 90 *ат* температура пара установлена 500°С, для давления 35 *ат* — 435°С.

Эти значения параметров пара нельзя считать предельными. Советские научные учреждения и заводы для получения еще большей экономичности в настоящее время осваивают сверхвысокие параметры пара — давление 170—300 *ат* и температуру 550—600°С. Изыскиваются и другие пути экономии топлива на тепловых электрических станциях.

Минимальное давление в конденсаторе, ниже которого обычно не идут, для турбин составляет 0,03—0,04 *ат*. 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, что также не позволяет еще более снизить давление в конденсаторе.

Фиг. 138. Адиабатный процесс в *is*-диаграмме.

Рассмотрим теперь баланс тепла конденсационных станций. Для этого подсчитаем в качестве примера термический к. п. д. простейшей паросиловой установки, работающей при следующих параметрах пара (фиг. 138):

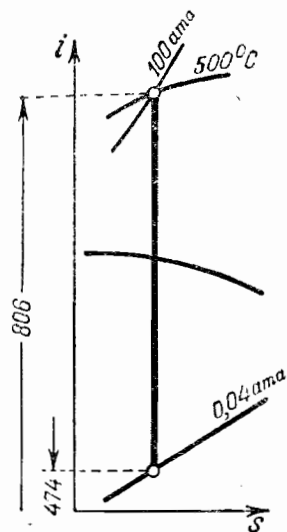
начальные параметры $p_1 = 100 \text{ ат}$, $t_1 = 500^\circ \text{С}$
конечное давление $p_2 = 0,04 \text{ ат}$

По *is*-диаграмме находим:

$$i_1 = 807 \text{ ккал/кг};$$

$$i_2 = 475 \text{ ккал/кг};$$

$$t = 23,6^\circ \text{С}.$$



На основании этих данных находим, что в механическую энергию превращается на 1 *кг* пара, поступающего в турбину, количество тепла, равное

$$h_0 = i_1 - i_2 = 807 - 475 = 332 \text{ ккал/кг}.$$

В котле на 1 *кг* пара подведено тепла

$$i_1 - t = 807 - 28,6 = 778,4 \text{ ккал/кг}.$$

Отсюда термический к. п. д. описанной установки составляет:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - t} = \frac{332}{778,4} = 0,427 = 42,8\%.$$

(Значения термических к. п. д. для стандартных параметров пара см. в примере 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 даже как греющее тело.

Если к тому же учесть неизбежные потери в котельной и машинном зале, то получится, что в конденсационной паросиловой установке используется 18—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. 139. 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 простейшему паросиловому циклу, на производство 1 *квтч* электрической энергии можно найти по формуле (92), а для действительной установки — по формуле (97).

Пример 25. Подсчитать значения термических к. п. д. цикла простейшей паросиловой установки для стандартных начальных параметров пара:

- 1) $p_1 = 15 \text{ ата}; t_1 = 350^\circ \text{С};$
- 2) $p_1 = 29 \text{ ата}; t_1 = 400^\circ \text{С};$
- 3) $p_1 = 35 \text{ ата}; t_1 = 435^\circ \text{С};$
- 4) $p_1 = 90 \text{ ата}; t_1 = 500^\circ \text{С};$
- 5) $p_1 = 170 \text{ ата}; t_1 = 550^\circ \text{С}.$

Конечное давление $p_2 = 0,04 \text{ ата}.$

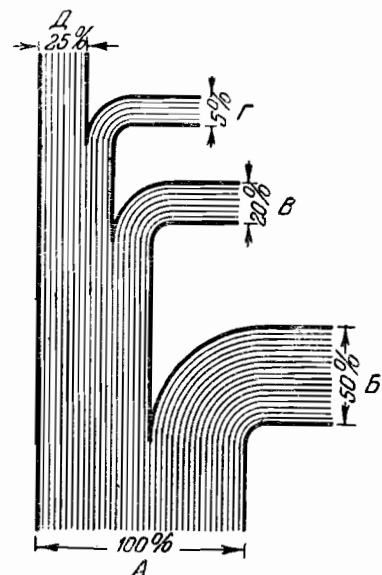
Проведя в is -диаграмме адиабаты расширения, находим, подставляя значения в формулу (92):

- 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) $\eta_t = \frac{810 - 476,5}{810 - 28,6} = 0,427;$
- 5) $\eta_t = \frac{818 - 462}{818 - 28,6} = 0,45.$

Количество топлива, которое нужно сжечь в топке котла для того, чтобы получить 1 *квтч* электрической энергии, называется удельным расходом топлива. Эта величина является важнейшим показателем работы электростанций. Для того чтобы найти удель-

ный расход топлива, нужно прежде всего знать расход пара d_s на 1 *квтч*, который вычисляют по формуле (97) или по данным специальных испытаний паровой турбины или машины. Подсчитаем, сколько тепла нужно израсходовать в котле, чтобы получить $d_s \text{ кг/квтч}$ пара.

Один килограмм питательной воды поступает в котел с теплосодержанием, численно почти равным температуре



Фиг. 139. Баланс тепла паросиловой установки.

воды t_g , а пар из котла выходит с теплосодержанием i_1 . Следовательно, для того чтобы получить в котле 1 *кг* пара, нужно к поступившему в котел 1 *кг* воды подвести тепла

$$i_1 - t_g \text{ ккал/кг}.$$

Так как для получения 1 *квтч* электрической энергии требуется $d_s \text{ кг/квтч}$ пара, то в котле требуется подвести к воде тепла

$$d_s(i_1 - t_g) \text{ ккал/квтч}.$$

Это тепло подводится к воде от горячих газов, получающихся при горении топлива.

Каждый килограмм топлива при полном сгорании выделяет количество тепла, равное низшей теплоте сгорания Q_n^p рабочего топлива.

Однако не все тепло Q_n^p можно в котле передать воде.

Как указывалось в § 31, только доля этого тепла, равная к. п. д. котельной установки $\eta_{к.у}$, используется полезно.

Для того чтобы найти количество тепла, которое передается воде при сгорании 1 *кг* топлива, нужно, очевидно, умножить Q_n^p на $\eta_{к.у}$. Итак, при сгорании 1 *кг* топлива рабочее тело в котле получает $Q_n^p \eta_{к.у} \text{ ккал/кг}$ тепла. Если для получения 1 *квтч* электрической энергии требуется $d_s(i_1 - t_g) \text{ ккал/квтч}$ тепла, то, очевидно, килограммов топлива для этого будет израсходовано столько, сколько раз $Q_n^p \eta_{к.у}$ содержится в произведении $d_s(i_1 - t_g)$.

Если теперь расход топлива на 1 *квтч* обозначить b_s , то получим:

$$b_s = \frac{d_s(i_1 - t_g)}{Q_n^p \eta_{к.у}} \text{ кг/квтч}. \quad (111)$$

В следующей таблице приводятся примерные значения к. п. д. и расхода условного топлива ($Q_n^p = 7000 \text{ ккал/кг}$) для различных паровых электростанций.

Характеристика оборудования	К. п. д. станции, %	Удельный расход условного топлива, кг на выработанный киловаттчас
Локомотивы на 10—12 ата, работающие без конденсатора	5—6	2,46—2,04
Локомотивы 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 (12—25 тыс. кВт)	22—23	0,56—0,53
Турбины на 29 ата и 400° С большой мощности (50—100 тыс. кВт)	24—25	0,51—0,49
Турбины на 90 ата и 500° С большой мощности (50—100 тыс. кВт)	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 теплотой сгорания $Q_n^p = 3200$ ккал/кг. Параметры пара, потребляемого турбиной: $p_1 = 30$ ата, $t_1 = 400^\circ$ 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 -диаграмме теплосодержание пара, характеризующего параметрами $p_1 = 30$ ата, $t_1 = 400^\circ$ С; оно составляет $i_1 = 715$ ккал/кг. По формуле (111) находим расход топлива на 1 кВтч:

$$b_g = \frac{d_g (i_1 - t_a)}{Q_n^p \eta_{к.у.}}$$

Подставляя сюда числовые значения, получим:

$$b_g = \frac{5,2(715 - 120)}{3200 \cdot 0,82} = \frac{5,2 \cdot 595}{3200 \cdot 0,82} = 1,18 \text{ кг/кВтч.}$$

Отсюда суточный расход топлива

$$B = 1,18 \cdot 400\,000 = 472\,000 \text{ кг/сутки.}$$

$$B = 472 \text{ т/сутки.}$$

48. 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 простейшей паросиловой установки конденсат, получаемый в конденсаторе, имеет температуру, равную температуре кипения воды при том давлении, при котором находится пар в конденсаторе. Если, например, принять, что давление в конденсаторе $p_2 = 0,04$ ата, то по таблице насыщенного пара можно определить, что температура кипения при этом составляет $t_2 = 28,6^\circ$ 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 лишь затем начинается процесс парообразования. Если, допустим, давление в котле $p_1 = 100$ ата, то теплосодержание воды в состоянии кипения составляет 334 ккал/кг. Теплосодержание же конденсата, поступающего в котел, по той же таблице равно 28,6 ккал/кг. Таким образом, чтобы 1 кг конденсата, поступающий в котел, довести только до состояния кипения, к нему нужно подвести тепла:

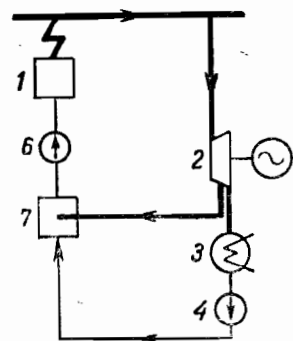
$$334 - 28,6 \approx 305 \text{ ккал/кг.}$$

Это тепло, как уже было сказано, в цикле простейшей паросиловой установки 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 $p_2 = 0,04$ ата, потому что его температура при расширении понизилась уже до $28,6^\circ$ 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 работы, 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



Фиг. 140. Схема паросиловой установки с регенеративным подогревом и смешивающим подогревателем.

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 простейшим паросиловым циклом заключается в том, что у той части пара, которую 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. Кроме того, условия работы водяного экономайзера в котлоагрегате при по-

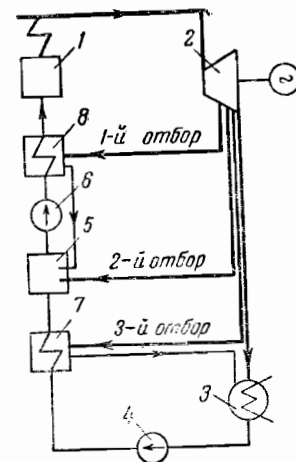
ступлении слишком высоко подогретой воды ухудшаются.

Поэтому подогрев конденсата, даже в установках высокого давления и большой мощности, редко доводят выше, чем до 215—230° С, а при среднем начальном давлении пара (35 *ата*) часто довольствуются и 150° С. Для получения максимальной выгоды нагрев конденсата совершают ступенями, устраивая несколько отборов, чтобы отбираемый пар совершил возможно большую работу в турбине. При среднем начальном давлении пара не делают более трех-четырех отборов, чтобы вся установка не получалась слишком сложной, дорогой и неудобной в эксплуатации; при высоком же давлении и большой мощности применяют пять—восемь отборов пара.

Подогреватели для конденсата могут быть смешивающими: в них конденсат и отбираемый из турбины пар смешиваются друг с другом. Чаще применяются поверхностные подогреватели, в которых смешения не происходит. Поверхностные подогреватели устроены так же, как и конденсаторы, т. е. в них имеется большое количество трубок, внутри которых проходит нагреваемый конденсат. Трубки снаружи омываются паром, поступающим из турбины.

Схема паросиловой установки с тремя отборами, двумя поверхностными подогревателями и одним смешивающим представлена на фиг. 141. На ней цифрами 1, 2, 3, 4 и 6 отмечены те же агрегаты, что и на фиг. 135. Дополнительно здесь означают: 5 — питательный бак (деаэратор); 7 — подогреватель низкого давления и 8 — подогреватель высокого давления.

Как видно из схемы, конденсат отборного пара третьего подогревателя поступает в конденсатор, где смешивается с конденсатом, поступающим из турбины. Вся эта смесь направляется в трубки третьего подогревателя, нагревается



Фиг. 141. Схема паросиловой установки с регенеративным подогревом при трех отборах.

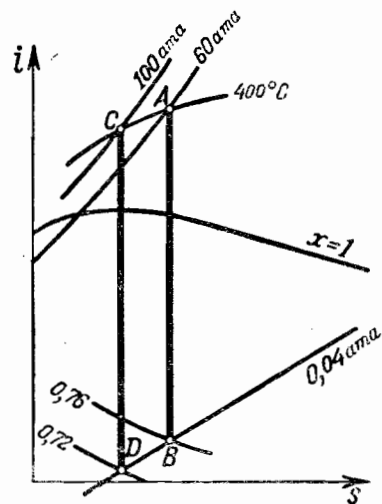
паром третьего отбора и в дальнейшем поступает во второй (смешивающий) подогреватель, куда поступает и конденсат отборного пара первого подогревателя. Весь этот конденсат нагревается паром второго отбора. Насосом весь образовавшийся конденсат подается в трубки первого подогревателя, где температура его повышается почти до температуры пара первого отбора. С этой температурой он и поступает в котельный агрегат.

В настоящее время регенеративный подогрев питательной воды является необходимым устройством на каждой паросиловой электростанции. Регенерация дает экономию топлива от 5 до 12%.

Вторичный перегрев пара. В § 46 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. Кроме того, кинетическая энергия летящих капель воды, ударяющих в стенки лопаток, плохо используется для вращения вала, так что экономичность турбины снижается.

Увеличение влажности пара с ростом давления хорошо видно, если изобразить в i - s -диаграмме процесс расширения пара в турбине. На фиг. 142 представлены два таких процесса. В одном случае линия AB представляет собой расширение пара от $p_1 = 60$ атм и $t_1 = 400^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,04$ атм. В другом случае линия CD представляет собой расширение пара от $p_1 = 100$ атм, $t_1 = 400^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,04$ атм. Как видно, эти два случая различаются по начальному давлению.

Вместе с тем из этой диаграммы видно, что начальному давлению $p_1 = 60$ атм соответствует в конце адиабатического расширения пара степень сухости $x_2 = 0,76$ (в действительном двигателе степень сухости получится выше); если же пар имеет начальное давление $p_1 = 100$ атм, то в конце расширения его степень сухости уже меньше и составляет $x_2 = 0,72$.

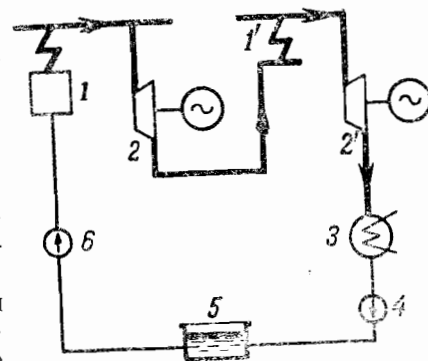


Фиг. 142. Понижение степени сухости пара при увеличении начального давления пара (i - s -диаграмма).

Для того чтобы еще более повысить экономичность паросиловой установки и вместе с тем избежать большой влажности пара (считается возможным иметь степень сухости не меньше 0,86—0,88) при высоком начальном давлении, прибегают к промежуточному (вторичному) перегреву пара. В этом случае весь процесс расширения пара между начальным и конечным давлениями разбивают на две части, соответственно чему и устанавливают две турбины: одну — высокого давления («предварительная» турбина), другую — низкого давления.

На фиг. 143 представлена схема станции со вторичным перегревом. На ней цифрами 1, 2, 3, 4, 5 и 6 показаны агрегаты такие же, как и на фиг. 135. Цифрой 1' обозначен вторичный перегреватель. Турбина высокого давления помещена слева (2), 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 $p_1 = 100$ атм, то в турбине высокого давления расширение производится приблизительно до $p_1' = 25$ атм. 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 теп-

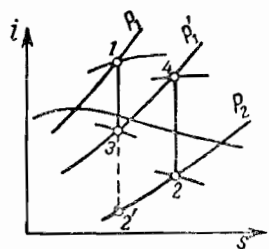


Фиг. 143. Схема паросиловой установки со вторичным перегревом пара.

ла 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 $p_1' = 25 \text{ ата}$ до $p_2 = 0,04 \text{ ата}$.

Изображенная на схеме фиг. 143 установка с двумя турбинами и двумя электрическими генераторами называется двухвальной.

Применяются и одновальные турбины с промежуточным перегревом пара. В этом случае ч. в. д. и ч. н. д. турбины сидят на одном валу и приводят в движение один общий генератор.



Фиг. 144. is -диаграмма расширения пара в цикле со вторичным перегревом.

Изобразим в is -диаграмме расширение пара в цикле со вторичным перегревом (фиг. 144). Линия 1-3 изображает адиабатное расширение пара в турбине высокого давления или ч. в. д. одновальной турбины. Так как вторичный перегрев происходит при $p = \text{const}$, то он изображится отрезком 3-4, идущим вдоль изобары $p_1' = 25 \text{ ата}$. 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 или ч. н. д. Процесс заканчивается в точке 2, которая дает возможность найти степень сухости в конце расширения при наличии вторичного перегрева.

В is -диаграмме хорошо видно, что конечная степень сухости при этом сильно повышается. Вместе с тем по 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 вторичный перегрев не производили бы, то степень сухости была бы много меньше, чем при наличии его.

Работа 1 кг пара в цикле со вторичным перегревом

больше, чем в цикле с теми же параметрами пара, но без вторичного перегрева. Это достигается за счет дополнительной подвода тепла. Отношение этой дополнительной работы к дополнительно подведенному теплу называют к. п. д. дополнительного цикла. Введение вторичного перегрева увеличивает к. п. д. цикла в том случае, если к. п. д. дополнительного цикла больше, чем к. п. д. цикла без вторичного перегрева. Достигается такое улучшение правильным выбором давления, при котором производится вторичный перегрев пара.

Введение вторичного перегрева пара не только предупреждает износ лопаток последних ступеней, но и уменьшает вредное влияние капель воды на экономичность и заметно увеличивает к. п. д. станции. Поэтому, несмотря на некоторое усложнение оборудования и условий эксплуатации, иногда промежуточный перегрев применяют, даже если и без него влажность пара в конце расширения не превосходит допустимой.

49. ТЕПЛОФИКАЦИЯ

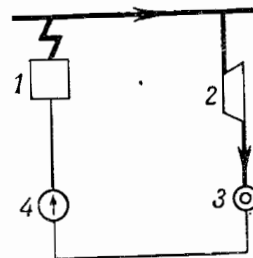
Изучая баланс тепла, выделяющегося при сгорании топлива на конденсационной станции, мы видим, что тепло на ней используется в очень малой степени. Только сравнительно незначительная часть его, примерно 25—30% (и то только на лучших станциях), полезно используется, превращаясь в механическую и затем электрическую энергию. Мы выяснили и причину такого низкого использования тепла топлива. Она заключается прежде всего в том, что преобразование тепла в механическую энергию ставит предел второму закону 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. Охлаждаю-

чая вода не может быть использована ввиду недостаточно высокой ее температуры. Таким образом, *отработавший на конденсационных станциях пар не годится ни для производственной работы, ни для нагревательных целей.*

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 *теплого 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 (15—30%), и поэтому количество механической энергии, выработанной отборным паром, мало. Большая часть требуемой электрической энергии вырабатывается за счет пара, поступающего после турбины 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 нужно тепло 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 такого 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 и 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 не пропадает, общее использование тепла увеличивается. В итоге получается значительная экономия топлива по сравнению с тем расходом топлива, который потребовался бы, если бы электрическая энергия вырабатывалась на конденсационной станции, а пар, необходимый предприятию, производился в отдельной котельной, т. е. при раздельной выработке тепловой и электрической энергии.



Фиг. 145. Схема паро-силовой установки, имеющей турбину с противодавлением.

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:

$$p_1 = 35 \text{ ата}, t_1 = 450^\circ \text{C}.$$

Давление отработавшего пара $p_2 = 2$ ата.

Схема станции, здесь описанной, изображена на фиг. 145.

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:

$$\frac{10,03 - 7,22}{10,03} \cdot 100 = 28,1 \%$$

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 отпавляется для использования.

Такой способ называется комбинированным способом производства электрической и тепловой энергии.

Комбинированный способ производства электрической и тепловой энергии является основой теплофикации, 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 электриче-

ской 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 в 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.

Эти директивы успешно выполняются.

Начало развития теплофикации в СССР относится к 1925 г., но уже перед Великой Отечественной войной по мощности теплоэлектроцентралей и длине тепловых сетей наша страна была первой в мире.

Дальнейший рост теплофикации и строительства ТЭЦ был предусмотрен пятилетним планом восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг.

В исторических решениях XIX съезда КПСС по развитию народного хозяйства в пятом пятилетии (1951—1955 гг.) вновь имеется указание: «Обеспечить строительство теплоэлектроцентралей и теплосетей для осуществления широкой теплофикации городов и промышленных предприятий».

50. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Есть несколько типов установок, служащих для выработки электрической энергии. В крупных промышленных районах электростанции по преимуществу строят вблизи мест добычи топлива, к месту же потребления 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 на случай аварии или на время ремонта) 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 блок-станциями.

Станций, работающих 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. 145 изображена схема станции, на которой установлена турбина с противодавлением. На этой схеме обозначены: 1 — котел; 2 — турбина с противодавлением; 3 — производство, потребляющее пар из турбины; 4 — питательный насос.

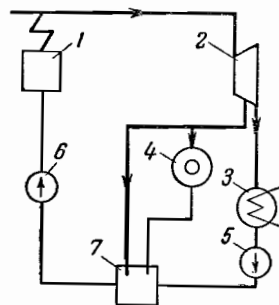
Однако турбины с противодавлением большей частью неудобны для ТЭЦ по следующим соображениям. Весь пар, выходящий из турбины, направляют на производство, и поэтому электрическая мощность, развиваемая этими турбинами, зависит от количества пара, требующегося для производства. В тех случаях, когда сокращается 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 на нужды самой станции. Остальной пар направляют в конденсатор, который работает при обычном давлении, например $p_2 = 0,04$ атм. 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. 146 изображена схема станции, на которой установлена турбина с отбором. На этой схеме обозначены: 1 — котел; 2 — турбина с отбором; из отбора берут пар для производства и регенеративного подогревателя; 3 — конденсатор; 4 — тепловой потребитель; 5 и 6 — насосы; 7 — подогреватель (деаэратор).

В дореволюционной России использовались на электростанциях 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).



Фиг. 146. Схема паросиловой установки, имеющей турбину с отбором пара.

В годы, предшествовавшие Великой Отечественной войне, начался переход на более высокие параметры пара и был построен ряд станций, использующий 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—500° С (перед турбинами).

В настоящее время в СССР практически решается проблема перехода на еще более высокие параметры пара, вплоть до 300 *ата* и 600° С.

В примере 25 показан рост экономичности цикла простейшей паросиловой установки 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 экономии 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 пробле-

ме водоподготовки, изучено поведение металла и т. п. Советская теплотехника догнала и во многих вопросах оперегнала зарубежную технику строительства и эксплуатации электростанций.

В истекшем пятилетии совершалось широкое внедрение в практику эксплуатации электростанций автоматического регулирования тепловых процессов, причем к концу пятилетия была закончена в основном автоматизация питания котлов и на 50% осуществлена автоматизация процессов горения. Еще в большем масштабе автоматизировались гидроэлектростанции. В текущем пятилетии работа по автоматизации продолжается. Автоматическое регулирование дает увеличение к. п. д. станции, понижает 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 свои места.

Дальнейшим развитием этого метода явилось создание в 1954 г. проектов и начало работ по изготовлению блочных котлов, т. е. таких, в которых отдельные части — топочная камера, барабан, перегреватель, экономайзер и др. — состоят из блоков, изготавливаемых непосредственно на заводе и доставляемых в готовом виде на строительную площадку.

Блочный метод монтажа и изготовления котельных агрегатов значительно уменьшает время строительства станции и удешевляет ее.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

46. Расскажите по чертежу электростанции, как она работает; укажите путь топлива, газов, воды, пара.
47. Изобразите схему цикла простейшей паросиловой установки и расскажите, как происходит изменение состояния рабочего тела в нем.
48. Напишите формулу термического к. п. д. цикла простейшей

паросиловой установки и расскажите, что означают в нем отдельно числитель и знаменатель.

49. От каких факторов и как зависит термический к. п. д. цикла простейшей паросиловой установки?

50. Как нагревается конденсат в цикле простейшей паросиловой установки и как в регенеративном цикле?

51. Изобразите схему регенеративного цикла и расскажите, как происходит изменение состояния рабочего тела в нем.

52. Какова цель введения вторичного перегрева? Расскажите по схеме цикла с вторичным перегревом, какие процессы совершает рабочее тело?

53. В чем отличие ЦЭС от ТЭЦ? Какая основная потеря тепла в ЦЭС и на что используется это тепло на ТЭЦ?

54. Почему обычно не может быть использовано тепло циркуляционной воды на ЦЭС?

55. Изобразите схему станции с комбинированным и раздельным производством электрической и тепловой энергией.

56. Укажите, как работают станции с турбинами с противодавлением, почему ухудшается в зимний период вакуум в них и на какие цели используется охлаждающая вода в этот период времени?

57. Почему турбина с отбором является наиболее удобной для электростанций? Какие потоки пара в ней имеются?

58. В чем заключается сущность комбинированного метода производства тепла и электрической энергии?

59. Какие электрические станции называются коммунальными?

60. Каково назначение блок-станций; при каких условиях их работа наиболее благоприятна в экономическом отношении?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПРОРАБОТКИ

35. Определить по i -с-диаграмме адиабатное теплопадение, если начальные параметры пара, поступающего в двигатель:

$$p_1 = 40 \text{ ага} \text{ и } t_1 = 460^\circ \text{С},$$

а конечное давление

$$p_2 = 0,04 \text{ ага}.$$

Как будет изменяться теплопадение, если без изменения конечного давления и начальной температуры начальное давление станет равным 50, 60, 70, 80, 90, 100 ага?

Как изменится теплопадение, если без изменения начального и конечного давлений начальная температура станет равной 420, 500°С?

36. Найдите термический к. п. д. цикла простейшей паросиловой установки, если рабочее тело в нем изменяет свое состояние от

$$p_1 = 40 \text{ ага} \text{ и } t_1 = 400^\circ \text{С}$$

до

$$p_2 = 0,04 \text{ ага}.$$

Ответ: 0,366.

37. Как изменится термический к. п. д. цикла (задача 36), если, оставив прежними значения p_2 и t_1 , взять $p_1 = 60 \text{ ага}$? Как изменится он, если, не меняя p_1 и p_2 , взять $t_1 = 500^\circ \text{С}$; как изменится η , если, не меняя p_1 и t_1 , взять $p_2 = 0,06 \text{ ага}$?

38. Вычислить расход пара в установке, работающей по циклу Ренкина, если $p_1 = 90 \text{ ага}$, $t_1 = 480^\circ \text{С}$, $p_2 = 0,04 \text{ ага}$, $\eta_{\text{ро}} = 0,78$.

Ответ: 3,42 кг/квтч.

39. Установка мощностью 12 500 квт расходует при полной нагрузке 5,0 кг/квтч пара. Топливом служит подмосковный уголь с $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 3000 \text{ ккал/кг}$. Котельная работает с $\eta_{\text{к.у}} = 0,82$. Начальные параметры пара $p_1 = 35 \text{ ага}$, $t_1 = 435^\circ \text{С}$. Температура питательной воды 145°С. Определить часовой расход топлива при полной нагрузке.

Ответ: 16,8 т/час.

40. Испытанием установлено, что среднесуточный расход пара турбиной составляет 4,6 кг/час. Определить среднесуточный часовой расход топлива, если в одном случае параметры пара

$$p_1 = 20 \text{ ага}, \quad t_1 = 340^\circ \text{С}, \quad p_2 = 0,04 \text{ ага},$$

а в другом

$$p_1 = 60 \text{ ага}, \quad t_1 = 420^\circ \text{С}, \quad p_2 = 0,04 \text{ ага}.$$

Для обоих случаев принять

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 2800 \text{ ккал/кг}, \quad t_{\text{н.в}} = 120^\circ \text{С}, \quad \eta_{\text{к.у}} = 0,84.$$

51. КОМПОНОВКА ТЕПЛОВОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Проектирование и строительство электрических станций — одна из важнейших сторон выполнения единого народнохозяйственного плана развития страны. При проектировании используются типовые проекты электростанций, разработанные государственными проектными организациями, и стандартное серийное оборудование, изготовленное на отечественных заводах. При сооружении электростанций применяются скоростные методы возведения строительной части и блочный метод монтажа оборудования; это обеспечивает экономичность сооружения станции.

Производство электрической энергии и ее потребление тесно связаны с нормальным течением всей жизни страны, ее промышленностью, транспортом, бытом населения. Перерыв в электроснабжении, хотя бы кратковременный, нарушает работу промышленности и жизнь населения; наряду с надежностью и бесперебойностью ставится задача пода-

вать электроэнергию определенного напряжения и тепло при заданных параметрах рабочего тела.

Но этим не исчерпываются требования к эксплуатации станции: производство и распределение электрической и тепловой энергии должны происходить очень экономично, т. е. при минимальных удельных расходах топлива на отпущаемую энергию и минимальном количестве обслуживающего персонала на станции.

Как уже указывалось, советские электростанции используют низкосортные топлива, часто многозольные и содержащие серу. Наличие золы и сернистых соединений в продуктах сгорания может создать большие неудобства для окружающего населения и привести к гибели зеленых насаждений. Высокие температуры рабочих тел, используемых на электростанции, создают большие неудобства для персонала станции. Поэтому работа электрической станции должна удовлетворять санитарно-гигиеническим требованиям, разработанным соответствующими государственными органами для создания нормальных условий жизни окружающего населения и персонала электростанции.

При проектировании электростанции после определения мощности и рода топлива, на котором она будет работать, необходимо выбрать площадку для нее и решить вопрос о компоновке основного оборудования, турбин и котлов.

Выбор площадки для постройки электростанции определяется в основном расположением главных потребителей нагрузки — тепловой и электрической, местом добычи топлива для электростанции, условиями водоснабжения. ЦЭС строятся большей частью в местах добычи топлива, а электрическая нагрузка по проводам высокого напряжения передается к местам ее потребления. Напротив, ТЭЦ строятся большей частью вблизи теплового потребителя, а топливо подвозится по железнодорожным или водным путям.

Таким образом, выбор площадки для ЦЭС и ТЭЦ делается в основном с точки зрения удобства и дешевизны доставки топлива, подачи электроэнергии и тепла потребителям, наличия источников водоснабжения.

Расположение ТЭЦ в центрах потребления тепла часто вызывает необходимость строить их в городах, а это требует завоза в города больших количеств топлива, вывоза золы, что связано с некоторым ухудшением гигиенических условий; часто это вызывает постройку громоздких соору-

жений для охлаждения циркуляционной воды при отсутствии естественных источников водоснабжения (рек, озер).

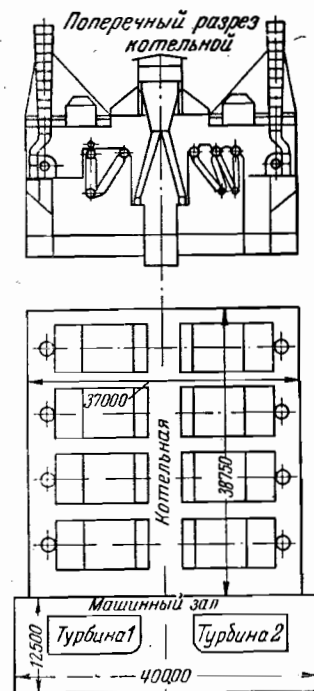
Для того чтобы не строить ТЭЦ в городах, в последнее время выдвинута проблема дальнего теплоснабжения, при котором ТЭЦ выносятся за черту города или возводятся в местах добычи топлива, что связано иногда с удалением ее на 20 км и более от города. Благоприятное решение этой проблемы расширит область использования ТЭЦ.

Компоновка тепловой части станций в основном определяется состоянием техники котло- и турбостроения и способом сжигания выбранного типа топлива.

В восстановительный период мощности котельных агрегатов по сравнению с мощностями турбин были малы, и станции строились с перпендикулярным расположением осей котельного и машинного залов. Котельная была большей частью двухрядной. На фиг. 147 представлена такая компоновка с расположением фронтов котлов внутрь котельной, а на фиг. 148 фронты котлов обращены к продольным стенам котельной.

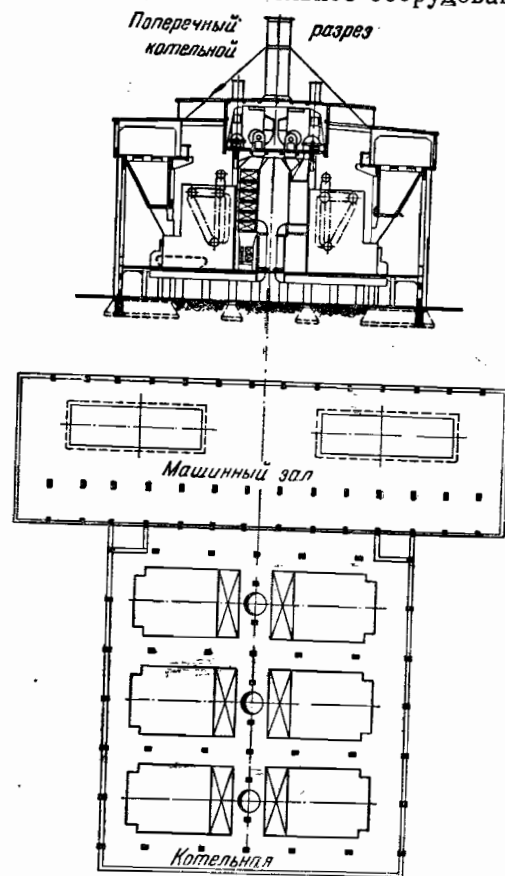
С увеличением мощностей котлов стали строить станции с параллельным расположением осей машинного зала и котельной, причем сначала котельная была двухрядной, а затем — однорядной. Таким образом, типовой компоновкой в настоящее время служит компоновка с параллельным расположением осей машинного зала и однорядной котельной.

При такой компоновке удобно производить расширение станции; паропроводы получают коротким. Турбогенераторы в машинном зале устанавливаются параллельно оси здания.



Фиг. 147. Двухрядная котельная с внутренним бункерным помещением.

Кроме машинного и котельного залов, на станции имеется многоэтажное помещение, называемое этажеркой; в нем размещается вспомогательное оборудование (деаэра-



Фиг. 148. Двухрядная котельная с наружным бункерным помещением.

тор, насосы, подогреватели и др.); котельная имеет бункерное помещение. На фиг. 149 показаны два примера применяющихся компоновок главного здания электростанции.

В одном из них, предназначенном для пылеугольного сжигания с шахтными мельницами,

этажерка и бункерное помещение располагаются между машинным залом и котельной, как это показано на разрезе станции, представленном на фиг. 149,а. В другом (фиг. 149,б) — в случае шаровых мельниц — бункерное помещение (с шаровыми мельницами в первом этаже) расположено с одной, а этажерка — с другой стороны котельной. В обоих примерах фронт котлов обращен к машинному залу; золоулавливающие устройства, помещения дымососов и дымовая труба расположены на уровне земли, что облегчает здание и тем самым удешевляет его.

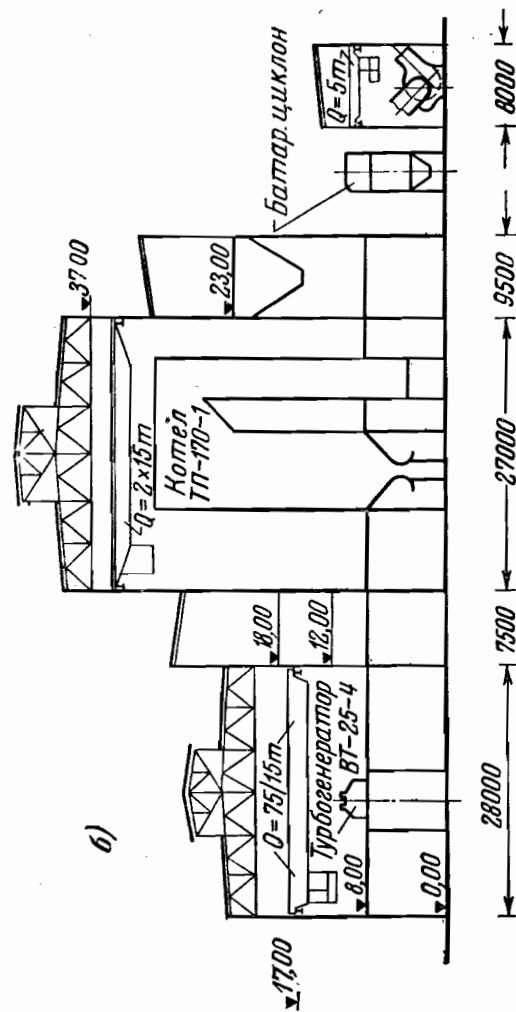
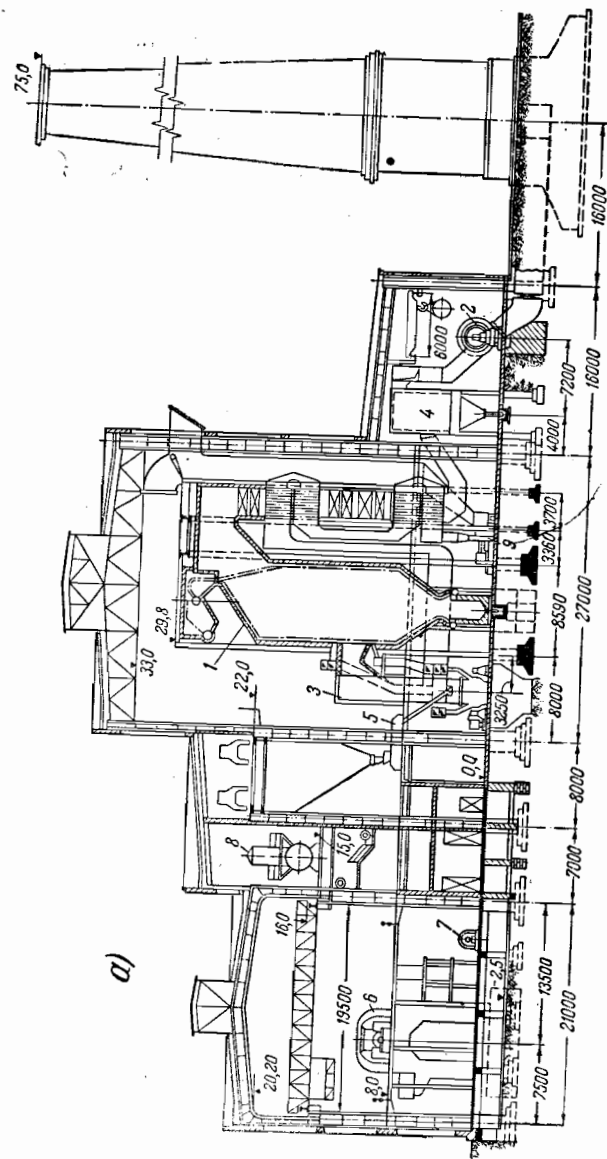
52. ТОПЛИВОПОДАЧА, ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ, ЗОЛОУДАЛЕНИЕ, ВОДОСНАБЖЕНИЕ

Подача топлива и его хранение на крупных электрических станциях при использовании низкосортных топлив представляют большие трудности. Станция мощностью 300 000 квт потребляет около 4 000 т/сутки условного топлива. В зависимости от рода топлива определяются условия подачи и хранения его. Так, на торфяных электростанциях создаются особые запасы на случай возникновения трудностей доставки во время снежных заносов. Значительные запасы в количестве до 6-месячных создаются на электростанциях, использующих дальнепривозное топливо, подвозимое по водным путям. При расположении угольной электростанции вблизи места добычи топлива создается месячный запас топлива.

Топливные склады механизуются; они оборудованы разного типа кранами и погрузочными устройствами. Разгрузка и обратная погрузка топлива совершаются без затрат тяжелого физического труда.

На крупных электростанциях топливо обычно доставляется железнодорожными вагонами непосредственно в бункерное помещение; в случае если бункеры полны, топливо направляется на склад. Подача со склада в котельную полностью механизирована. Для этого используются ковшевой элеватор, ковшевые конвейеры, ленточные транспортеры.

На крупных торфяных электростанциях вагоны с торфом подаются к разгрузке в бункеры по канатной эстакаде. По ней же разгруженные вагоны спускаются вниз.



Фиг. 149. Схемы компоновки тепловых электрических станций.

a — схема компоновки крупной конденсационной электростанции высокого давления. 1 — котел ТП-230; 2 — дымосос; 3 — шахтная мельница; 4 — газоочистка; 5 — ленточный питатель; 6 — турбогенератор 50 000 кет; 7 — питательный насос; 8 — деаэратор и питательные баки; 9 — дутьевой вентилятор.

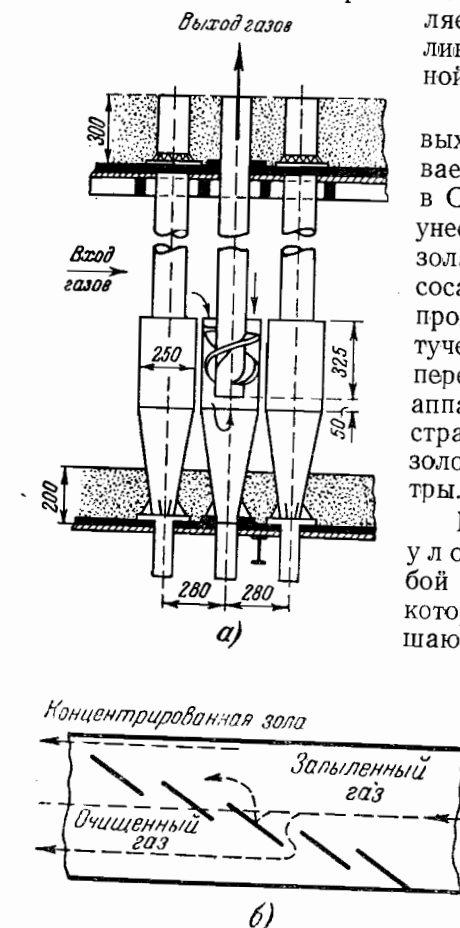
б — схема компоновки станции с расположенным деаэрационной этажерки и бункерного помещения с разных сторон котельной.

Уже указывалось, что продукты горения должны быть очищены от вредных примесей. Это в особенности представляет трудную задачу, если топливо сжигается в виде угольной пыли и содержит серу.

Проблема очистки дымовых газов широко разрабатывается научными институтами в СССР. Так как летучая, т. е. унесенная дымовыми газами, зола истирает лопасти дымососа, то аппараты, в которых производится улавливание летучей золы, устанавливаются перед дымососами. Из таких аппаратов наибольшее распространение получили циклонные золоуловители и электрофильтры.

Циклонный золоуловитель представляет собой цилиндрический кожух, в котором дымовые газы совершают винтовое движение. Возникающая при этом центробежная сила отжимает частицы золы к периферии, вследствие чего они выпадают из газов и в дальнейшем удаляются.

Эффективно работают батарейные циклоны, составленные из очень большого числа циклонов малого диаметра. Три элемента такого циклона показаны на фиг. 150, а. до 70—75% пыли из



Фиг. 150.

а — батарейный циклонный золоуловитель;
б — схема работы жалюзийного золоуловителя ВТИ.

Батарейные циклоны улавливают газов.

Компактные, так называемые жалюзийные золоуловители разработаны ВТИ. В них отделение золы от газов получается при поступлении газов на наклонно поставленные лопасти — жалюзи. При этом газы проходят между лопастями, а зола по инерции отлетает и скапливается в выходной части камеры, откуда она и удаляется (фиг. 150, б). Такие золоуловители можно установить в газоходах котла и тем самым защитить от вредного воздействия золы хвостовые поверхности котельного агрегата.

В электрофильтрах зола осаждается на металлических пластинах и проволоках под действием электрического постоянного тока высокого напряжения. При периодических встряхиваниях зола отделяется и удаляется. Электрофильтры дают более тонкую очистку (до 90—95%) дымовых газов; они дороги по стоимости и занимают много места.

Чтобы летучая зола меньше засоряла окружающую местность, менее концентрированно оседала и распространялась на большую площадь, строят высокие дымовые трубы. Однако постройка высокой трубы при многозольных топливах не может быть единственным мероприятием. Оно должно сочетаться с установкой специальных золоулавливающих аппаратов.

В СССР проведены большие работы по удалению серы из дымовых газов. В сооружаемых для этого установках получается ценный продукт — сера.

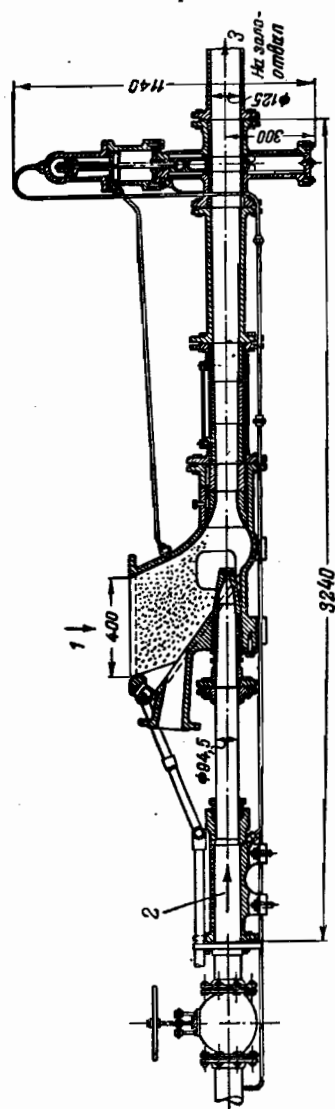
На крупных электрических станциях, сжигающих по большей части многозольные топлива, удаление золы и шлаков, скопившихся в золовых бункерах, механизировано. Используется по преимуществу гидравлический способ золоудаления. Сущность его заключается в том, что зола и шлаки спускаются в каналы, по которым они водой уносятся за пределы котельной. Золосливная вода должна иметь давление 4—6 ат; в некоторых системах, как, например, в получившей большое распространение системе инж. Б. А. Москалькова (фиг. 151), вода находится под давлением 25 ат. При таком давлении вода не только служит для смыва, но и раздробляет шлак.

Зола и шлаки в дальнейшем по трубам направляются в золоотвалы.

Центральные электрические станции нуждаются в значительных количествах воды. Больше всего ее требуется

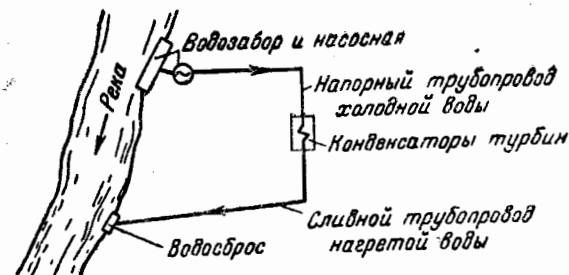
для конденсаторов паровых турбин, в которых вода отнимает скрытую теплоту парообразования от пара. Получившийся из пара конденсат направляется в котельный агрегат, а вода, служащая для конденсации, так называемая циркуляционная вода, возвращается в источник водоснабжения. Станция мощностью $300\,000$ квт потребляет около $60 \cdot 10^3$ м³/час воды.

Системы водоснабжения бывают двух типов: прямоточные и оборотные. В прямоточных системах (например, реке) вода, поступившая на станцию, после использования возвращается обратно в реку и уносится течением (фиг. 152,а). В оборотных же системах вода используется многократно; для этого после использования она подвергается охлаждению, которое производится в предназначенных для этого естественных и искусственных водоемах, через которые проходит вода от места выхода со станции до места входа (фиг. 152,б), или в специальных устройствах — градирнях (фиг. 152,в), брызгальных бассейнах (фиг. 152,г), где вода проходит через сопла и разбрызгивается; при падении она охлаждается, затем собирается и вновь поступает к конденсаторам. Оборотные системы водоснабжения используются

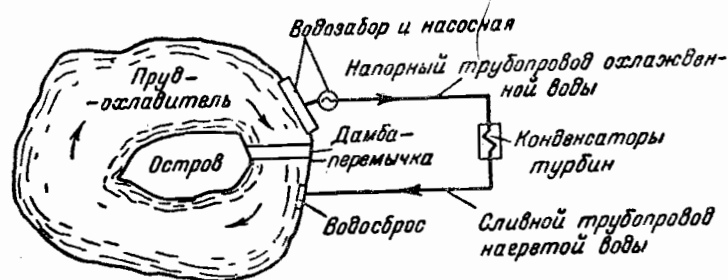


Фиг. 151. Гидроаппарат Б. А. Москалькова.

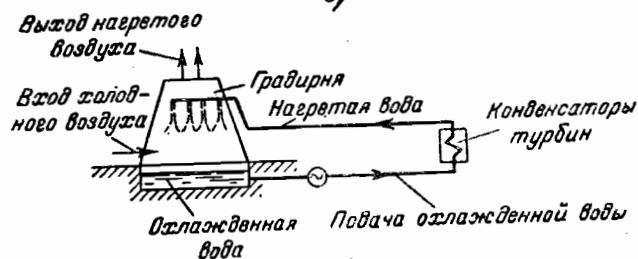
1 — поступление шлака; 2 — подача сывной воды; 3 — выход гидрооловой смеси.



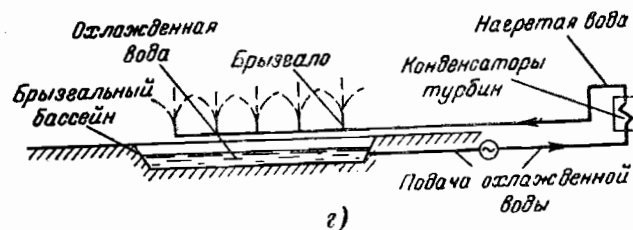
а)



б)



в)



г)

Фиг. 152. Схема водоснабжения для конденсаторов на электростанциях.

а — прямоточное водоснабжение; б — оборотное прудовое водоснабжение; в — оборотное водоснабжение с градирнями; г — оборотное водоснабжение с брызгальными бассейнами.

при отсутствии вблизи станции реки с подходящим расходом воды или если подача воды на станцию должна потребовать больших затрат электроэнергии, например, если она расположена на высоком берегу реки.

Циркуляционная вода должна подвергаться механической, а иногда и химической обработке, чтобы не засорять конденсаторы посторонними примесями.

53. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Снабжение предприятий и населения данного района электроэнергией в СССР в основном производится от крупных электрических станций, соединенных между собой линиями высокого напряжения. Совокупность таких станций образует районную энергетическую систему. Часто от тепловых электрических станций предприятия и население в централизованном порядке снабжаются теплом для нужд технологических процессов и отопления зданий.

В энергетическую систему входят также устройства для распределения энергии — подстанции, к которым подается энергия от электростанций, и распределительные устройства потребителей, получающих энергию от подстанций. Энергетическая система имеет диспетчерский пункт управления.

Объединение станций и потребителей в одну систему дает большой экономический эффект, так как позволяет наиболее выгодно с народнохозяйственной точки зрения распределять нагрузку между станциями: загружать в первую очередь гидростанции (при достаточном количестве воды), а из тепловых станций — те, которые работают на местном низкосортном топливе, а среди них — те, которые располагают наиболее экономичным оборудованием.

Если в энергетическую систему входят гидростанции и тепловые электрические станции, это дает возможность широко маневрировать мощностями тех и других станций для производства ежегодных ремонтов: загружать гидростанции в периоды большой приточности рек, производя в это время ремонт тепловых агрегатов; обратное распределение нагрузки будет в периоды малой приточности рек.

Для энергетической системы выгодно и то, что она объединяет разнообразных потребителей электроэнергии —

заводы с различной сменностью (одна, две, три смены) и различным временем начала работы, транспорт, освещение. Благодаря этому потребная мощность энергии по часам дня (график нагрузки) делается более или менее равномерной, что выгодно для электроснабжающей системы, так как мощность ее равномерно используется в течение суток. Объединение электростанций вместе с тем повышает надежность электроснабжения, снижает расходы на создание резервных мощностей.

Все энергетические системы — это системы трехфазного переменного тока, получившего развитие после изобретения выдающимся русским инженером М. О. Доливо-Добровольским в 1889—1900 гг. трехфазных генераторов и трехфазных трансформаторов. Трехфазный ток в совокупности с трехфазными асинхронными двигателями, также изобретенными Доливо-Добровольским, оказался наиболее удобным для передачи электроэнергии на далекие расстояния и широкого внедрения ее в промышленность.

Как уже указывалось, первая крупная районная электрическая станция в России была построена в 1914 г. Р. Э. Классоном; вместе с тем это была первая в мире крупная электростанция, работавшая на торфе. Мощность ее составляла 10 000 квт. Электроэнергия, вырабатываемая ею, передавалась в Москву по линии передачи напряжением 70 000 в.

Развитие энергетических систем началось после Великой Октябрьской социалистической революции.

В послевоенные годы энергетика Советского Союза все больше вступает на путь соединения между собой отдельных энергетических систем (см. § 2).

Появление таких межрайонных энергетических систем создает основы для организации в ближайшем будущем единой высоковольтной сети, сначала Европейской части, а в дальнейшем и всего Советского Союза. Технической базой для нее будут высоковольтные линии передачи от Куйбышевской и Сталинградской ГЭС, а в дальнейшем от ГЭС на сибирских реках.

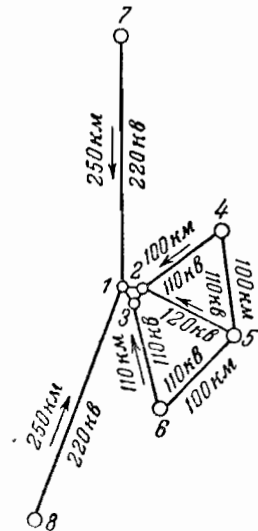
Экономические и эксплуатационные выгоды от образования единой высоковольтной сети еще более разительны, чем те, которые были указаны для районной энергетической системы, ибо единая высоковольтная сеть организует в одно

целое все народное хозяйство страны и представляет собой завершение электрификации всей страны в ее высшей форме — задачи, поставленной В. И. Лениным.

Создание единой высоковольтной сети в особенности выгодно при огромной территории, которой обладает Советский Союз, так как это позволяет распространить на весь Союз возможность использования дешевой электроэнергии, получаемой на многоводных реках, расположенных часто в местах, где промышленность пока еще слабо развита. Это позволяет наиболее благоприятным образом размещать промышленные предприятия, причем решение этого вопроса уже не зависит от вопросов топливоснабжения и им не ограничивается; достигается экономия сжигаемого топлива; наиболее целесообразно используются сырьевые ресурсы, уменьшаются транспортные расходы по сырью и, таким образом, улучшаются условия для развития производительных сил страны.

Размещение электрических станций и подстанций, направление высоковольтных линий в районной энергетической системе определяются местами сосредоточения электрических и тепловых нагрузок, расположением мест залежей топлива и русел текущих в данном районе рек. При сосредоточении потребителей энергии на сравнительно небольшой территории, наличии залежей топлива и крупных рек в некотором отдалении от нее конфигурация линий, соединяющих станции района, может быть такой, как показано на фиг. 153.

Направление потоков электроэнергии показывает, что потребитель энергии расположен на сравнительно небольшой площади, на которой построены три электростанции 1, 2 и 3; так как они расположены в населенных пунктах, то экономически выгодно построить их в виде теплоэлектроцентралей. Станции 4, 5 и 6 расположены в местах залежей топлива; здесь потребление электрической и тепловой энергии незначительное, поэтому станции 4, 5 и 6 построены

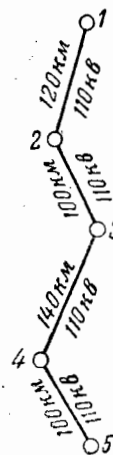


Фиг. 153. Схема расположения станций и сетей (первый тип).

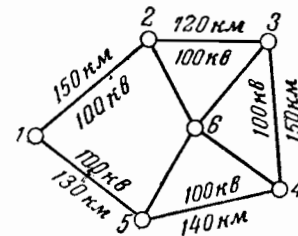
как конденсационные станции и передают свою энергию в места ее потребления.

Станции 7 и 8 расположены на далеком расстоянии от мест сосредоточения нагрузки; такое положение их может быть оправдано, если здесь протекают реки достаточно большой приточности; таким образом, 7 и 8 — это гидростанции.

Станции 4, 5 и 6 имеют линии передачи в промышленный район, но, кроме того, они соединены между собой; это обеспечивает большую надежность питания промышленного района. На фиг. 153 указаны возможные расстояния и напряжения линий передач.



Фиг. 154. Схема расположения станций и сетей (второй тип).



Фиг. 155. Схема расположения станций и сетей (третий тип).

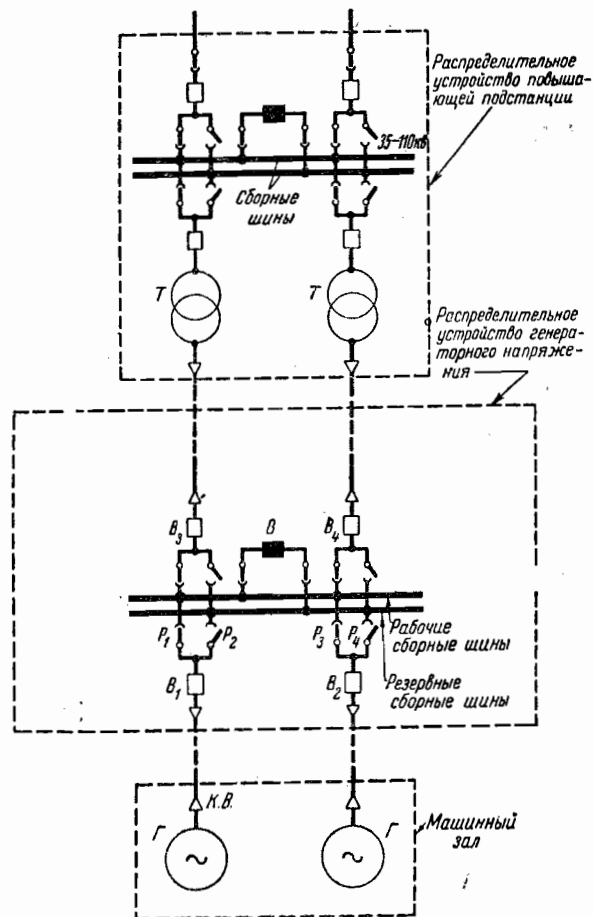
При расположении потребителей и источников топливоснабжения вдоль крупной реки или горного хребта электрические станции с соединяющими их линиями передачи располагаются вдоль линии нагрузок, как это показано на фиг. 154.

При равномерном распределении потребителей в районе станции с соединяющими их линиями образуют своеобразную решетку (фиг. 155).

На рассмотренных схемах показаны станции и соединяющие их линии. Потребители питаются от станций или подстанций. На фиг. 153, 154 и 155 подстанции не показаны.

Если электрическая станция снабжает энергией предприятия прилегающего к ней района и в то же время передает часть своей энергии в высоковольтную сеть энергетической системы, она имеет два распределительных

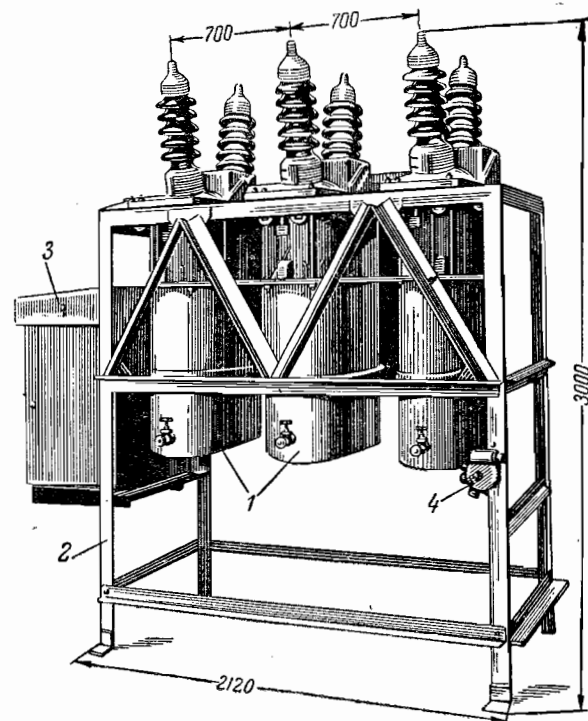
устройства (фиг. 156). Так называют помещения, в которых располагаются все оборудование и приборы, необходимые для нормального распределения (канализации) электрической энергии. Одно распределительное устройство имеет напряжение электрического тока, вырабатываемого генератором. На крупных электростанциях в СССР генера-



Фиг. 156. Схема электрических соединений станции с двумя распределительными устройствами.

Г — генератор; КВ — кабельная воронка; Р — разъединитель; В — высоковольтный выключатель; Т — трансформатор.

торное напряжение составляет в зависимости от мощности электрического генератора 6, 11 и 16 кВ (киловольт) (взяты округленные значения). Электрический ток, вырабатываемый генераторами, при помощи кабелей (изолированные провода) подается на сборные шины (неизолированные про-

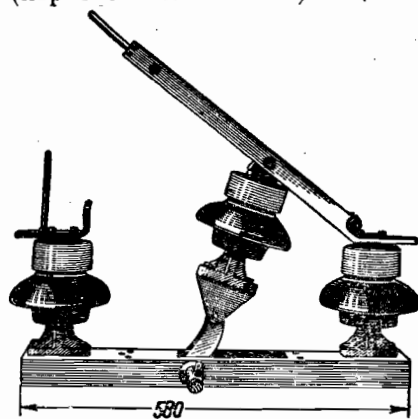


Фиг. 157. Высоковольтный выключатель.

1 — овалы баки; 2 — стальная рама; 3 — привод; 4 — лебедка для опускания баков.

вода) и с них чаще всего кабелями, а иногда и воздушными линиями отправляется в распределительную сеть потребителей (6 или 10 кВ). Сборные шины обычно выполняются двойными: одна система находится в работе, другая — в резерве на случай ремонта первой. Кабели и линии присоединяются к сборным шинам при помощи высоковольтных выключателей и разъединителей. Высоковольтные выключатели (фиг. 157) предназна-

чены для включений и выключений под нагрузкой в условиях эксплуатации, т. е. когда линии находятся под напряжением; высоковольтные выключатели предназначены действовать и автоматически от специального прибора (релейная защита) при возникновении повреждения (короткого замыкания) в цепи электрического тока. Управление выключателем производится на расстоянии.



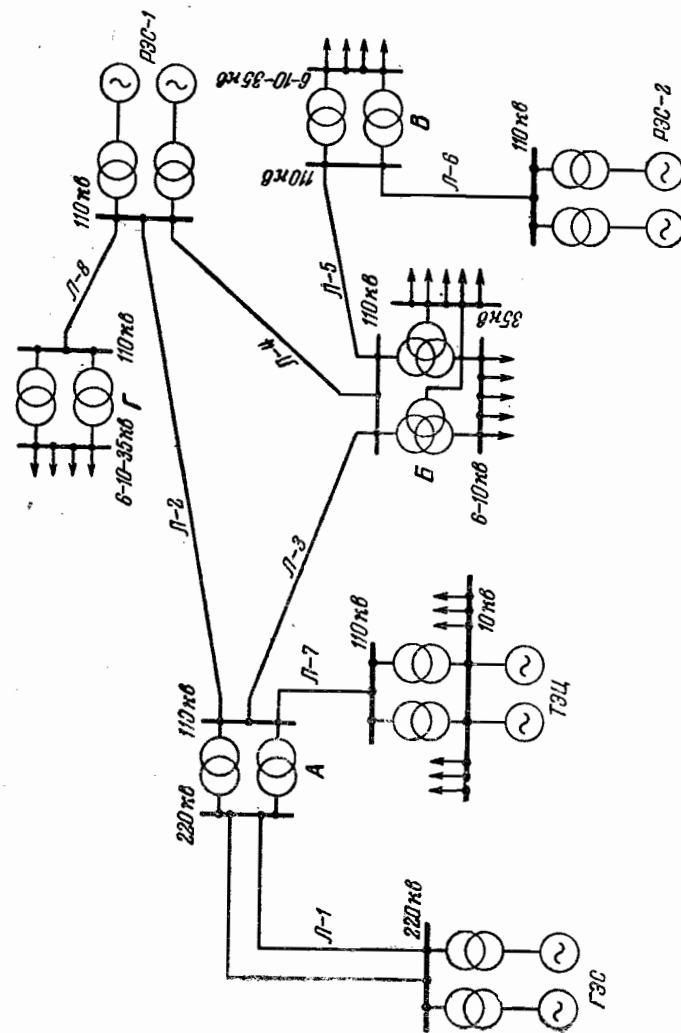
Фиг. 158. Разъединитель (одна фаза).

Для полной надежности при ремонтных работах линия должна быть отсоединена приспособлением, дающим видимое отключение, чего нет у высоковольтных выключателей. Видимое отключение дает разъединитель (фиг. 158), включать или отключать который можно только после отключения высоковольтного выключателя. На рассматриваемой схеме (фиг. 156) два генератора имеют высоковольтные выключатели B_1 и B_2 . К каждой системе сборных шин идет по одному разъединителю P_1, P_2, P_3, P_4 ; из них P_1 и P_3 — на рабочие шины, P_2 и P_4 — на резервные (отсоединены). Обе системы шин могут быть соединены между собой при помощи высоковольтного выключателя, что облегчает производство переключений во время эксплуатации.

В высоковольтной сети энергетической системы приняты напряжения 35, 110 и 220 кВ в зависимости от расстояния, на которое передается энергия. Поэтому напряжение тока, вырабатываемого электрическим генератором, надо преобразовать. Для этого используют трансформаторы. Вместе с другой аппаратурой они устанавливаются в отдельном распределительном устройстве. Здесь также имеются высоковольтные выключатели, разъединители, двойная система сборных шин и соединительный высоковольтный выключатель.

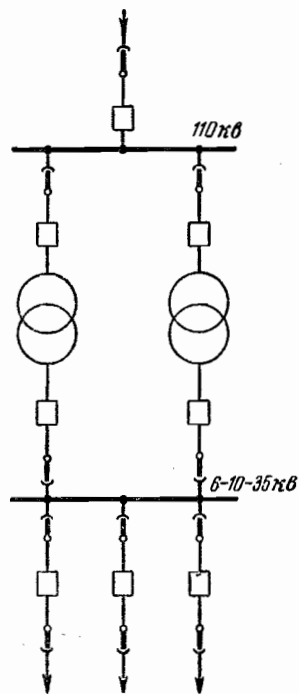
На фиг. 159 показана более подробная схема энергетической системы типа схемы на фиг. 155. Ряд станций, из

них одна гидростанция, одна ТЭЦ и две конденсационные работают на общую сеть, образующую высоковольтное кольцо линиями Л-2, Л-3 и Л-4 с напряжением 110 кВ. Гидростанция, не имеющая собственных потребителей, подает энергию линиями Л-1 напряжением 220 кВ через под-



Фиг. 159. Принципиальная схема энергосистемы.

станцию *А*, на которой установлены трансформаторы 200/110 кВ. ТЭЦ имеет своих потребителей, на что указывают кабели, отходящие от шин генераторного напряжения. Остальная энергия через трансформаторы при помощи линии Л-7 напряжением 110 кВ поступает через подстанцию *А* в высоковольтное кольцо. На схеме показаны три подстанции, присоединенные к высоковольтному кольцу: подстанция *Б*, на которой стоят трансформаторы; каждый из них имеет три обмотки соответственно напряжениям 110, 35 и 10 (или 6) кВ. С шин 35 и 10 (или 6) кВ отходят линии и кабели в распределительную сеть потребителя. На подстанциях *В* и *Г* стоят двухобмоточные трансформаторы. Районные электрические станции РЭС-2 и РЭС-1 своих потребителей не имеют, поэтому у них нет распределительных устройств на генераторном напряжении, а имеются только распределительные устройства повышающих подстанций, при этом РЭС-1 подает ток непосредственно в кольцо, а РЭС-2 — через проходную подстанцию *В*. На схеме (фиг. 159) для упрощения не показаны высоковольтные выключатели и разъединители. На фиг. 160 более подробно показана схема подстанции *Г* с аппаратурой для переключений.



Фиг. 160. Схема электрических соединений высоковольтной трансформаторной подстанции.

Оперативное руководство работой электрических станций и подстанций, соединенных между собой линиями высокого напряжения, в силу единства процесса, распространенного на большую территорию, требует централизации и сосредоточения в одних руках.

Местом, откуда исходят распоряжения о том, как должны работать станции и подстанции, и куда стекаются сведения об этой работе, т. е. сведения о состоянии, в котором находится оборудование, количестве и качестве выраба-

тываемой электроэнергии, служит диспетчерский пункт системы, а все оперативное руководство текущей работой системы осуществляется дежурным диспетчером системы.

В основном в обязанности дежурного диспетчера входит распределение мощностей между станциями, в том числе и гидростанциями, в зависимости от запасов воды, регулирование напряжения в заданных пунктах ее, пуск и останов основного оборудования электростанций, руководство всеми переключениями на электростанциях и в сетях высокого напряжения, ликвидация аварий, возникающих в основной высоковольтной сети и на электростанциях.

Диспетчеру подчиняется весь оперативный персонал станций и подстанций, через который диспетчер осуществляет руководство всей энергетической системой.

Для быстрой ориентировки при переключениях в сети на диспетчерском пункте, как правило, имеется сигнальный щит, на котором нанесена схема всей энергетической системы с основным оборудованием станций, подстанций и сетей (турбогенераторы, трансформаторы, выключатели).

Для суждения о работе системы диспетчерский пункт должен быть оборудован приборами, которые показывают мощности станций, напряжения электрического тока в основных пунктах сети, частоту переменного тока. Показания на приборы передаются на большие расстояния как по проводам, так и по радио.

Диспетчерский пункт должен быть также оборудован установками телеуправления для производства наиболее важных операций в основной системе.

Диспетчерский пункт должен иметь надежную телефонную и радиосвязь со всеми станциями и подстанциями для возможности быстрой передачи распоряжений подчиненному ему оперативному персоналу.

Когда данная энергетическая система значительно расширяется, диспетчеру становится трудно сноситься непосредственно со всеми станциями и подстанциями; тогда в системе выделяются отдельные районы, для управления которыми учреждаются свои районные диспетчерские пункты, подчиненные диспетчеру. Районные диспетчеры получают распоряжения от диспетчера системы и передают его персоналу своего района.

Для быстроты проведения операций на диспетчерских пунктах должны быть инструктивные материалы, предусматривающие порядок проведения тех или иных типовых мероприятий.

При образовании межрайонных объединений создаются объединенные диспетчерские управления, осуществляющие руководство основной сетью межрайонного объединения и обменом потоками мощностей между отдельными системами, входящими в межрайонное объединение.

54. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Каждая тепловая электрическая станция характеризуется в первую очередь значением своей установленной мощности. Так называют сумму номинальных мощностей, установленных на станции машин:

$$N_{уст} = N_1 + N_2 + N_3 + \dots \quad (112)$$

Здесь $N_1, N_2, N_3, \dots$ — номинальная мощность каждой из машин.

Одним из показателей работы станции служит годовое количество энергии, выработанное всеми машинами станции, которое обозначается $\mathcal{E}$ *квтч/год*, а если это теплоэлектроцентраль, — то и годовым количеством тепла, отпущенного потребителю, $Q_{отп}$ *млн. ккал/год*.

Одной из важнейших характеристик работы станции, оценивающих ее с точки зрения использования основного оборудования, служит число часов использования $T_{уст}$ установленной мощности станции. Эту характеристику можно вычислить так:

$$T_{уст} = \frac{\mathcal{E}}{N_{уст}}. \quad (113)$$

Зная $T_{уст}$, можно вычислить коэффициент использования установленной мощности станции:

$$k_u = \frac{T_{уст}}{8760}. \quad (114)$$

Здесь 8760 — максимально возможное число часов работы станции, равное $24 \cdot 365 = 8760$ *час/год*.

Благоприятным считается для станции, если значения k_u колеблются в пределах 0,65 — 0,75. Превышенные значения этого коэффициента означают, что станция имела недостаточное время для ревизий и ремонтов агрегата; меньшие значения означают недоиспользование установленного оборудования.

Благоприятное для станций число часов использования установленной мощности лежит в пределах

$$T_{уст} = 5500 \div 6500 \text{ час/год}.$$

Экономичность станции в первую очередь характеризуется ее к. п. д. $\eta_{ст}$, который представляет собой отношение выработанной ею энергии к энергии, выделившейся при горении топлива. Для конденсационной станции, продукцией которой является только электрическая энергия, выработанная энергия составляет 860 $\mathcal{E}$ *ккал/год*, а количество тепла, выделившегося при горении израсходованного топлива, составляет Q_n^p *В ккал/год*, где B *кг/год* — количество сожженного топлива. Таким образом, для конденсационной станции

$$\eta_{ст} = \frac{860\mathcal{E}}{BQ_n^p}. \quad (115)$$

Этот показатель можно брать и за иной, чем год, промежуток времени, например месяц, сутки, смена.

Для теплофикационной станции, вырабатывающей два вида продукции — электрическую и тепловую энергию, можно составить аналогичный показатель, включив в числитель сумму энергий обоих видов; полученное отношение называют коэффициентом использования тепла топлива. Обозначив его буквой $k_{мон}$, можно написать:

$$k_{мон} = \frac{860\mathcal{E} + Q_{отп}}{BQ_n^p}. \quad (116)$$

Этот коэффициент не полностью характеризует совершенство работы станции, так как в числителе берется сумма электрической и тепловой энергий, неравноценных между собой по затратам тепла топлив на каждую из

них. Кроме того, он не дает представления об экономичности выработки каждого вида продукции в отдельности; поэтому для характеристики работы теплоэлектроцентрали пользуются и другими коэффициентами.

По методу оценки экономичности теплоэлектроцентралей, принятому в Министерстве электростанций, среди коэффициентов важнейшими служат коэффициент полезного действия по выработке электроэнергии $\eta_{ТЭЦ}^э$ и коэффициент полезного действия по выработке тепла $\eta_{ТЭЦ}^т$.

Для вычисления той и другой характеристик необходимо предварительно знать расход топлива на станции в отдельности на тепло, отпускаемое потребителям, и на выработку электрической энергии.

Если общий расход топлива на теплоэлектроцентрали составляет B , а на продукцию, отпущенную тепловому потребителю, израсходовано B_m , то количество топлива $B_э$, израсходованное на выработку электрической энергии составит:

$$B_э = B - B_m. \quad (117)$$

Для конденсационной станции $B_m = 0$, поэтому для нее $B_э = B$.

Для формулы (117) B_m определяется из отношения

$$\frac{B_m}{B} = \frac{Q_{отн}}{D_{мэ}(i_n - i_{н.в})}, \quad (118)$$

где $Q_{отн}$ — количество тепла, отпускаемое со станции потребителям;

$D_{мэ}$ — количество пара, поступающее из котельной в машинный зал; определяется особым расчетом или по приборам;

$i_n - i_{н.в}$ — разность теплосодержаний пара и питательной воды.

Таким образом, дробь, стоящая справа, представляет собой долю тепла, отпущенного потребителю, к теплу, подведенному к турбинам.

Теперь к. п. д. по выработке электрической энергии $\eta_{ТЭЦ}^э$ может быть представлен как отношение выра-

ботанной электрической энергии $860\mathcal{E}_{выр}$ к энергии $B_эQ_n^p$, выделившейся при горении топлива, затраченного для этой цели, т. е.

$$\eta_{ТЭЦ}^э = \frac{860 \mathcal{E}_{выр}}{B_эQ_n^p}, \quad (119)$$

а к. п. д. по выработке тепловой энергии $\eta_{ТЭЦ}^т$ может быть представлен как отношение отпущенного потребителю тепла $Q_{отн}$ к энергии $B_mQ_n^p$, выделившейся при горении топлива, затраченного для этой цели, т. е.

$$\eta_{ТЭЦ}^т = \frac{Q_{отн}}{B_mQ_n^p}. \quad (120)$$

Другой важнейшей характеристикой работы электрической станции с точки зрения ее экономичности служат удельный расход условного топлива на 1 *квтч* выработанной электрической энергии и удельный расход условного топлива на 1 млн. *ккал* отпущенного потребителю тепла.

Расход тепла на выработку 1 *квтч* электрической энергии, очевидно, составит:

$$q_э = \frac{B_эQ_n^p}{\mathcal{E}} \text{ ккал/квтч}, \quad (121)$$

а расход условного топлива

$$b_э^{усл} = \frac{q_э}{7000} = \frac{B_эQ_n^p}{\mathcal{E} \cdot 7000} \text{ кг/квтч}. \quad (122)$$

Расход тепла на станции на 1 *ккал* тепла, отпущенного потребителю, составит:

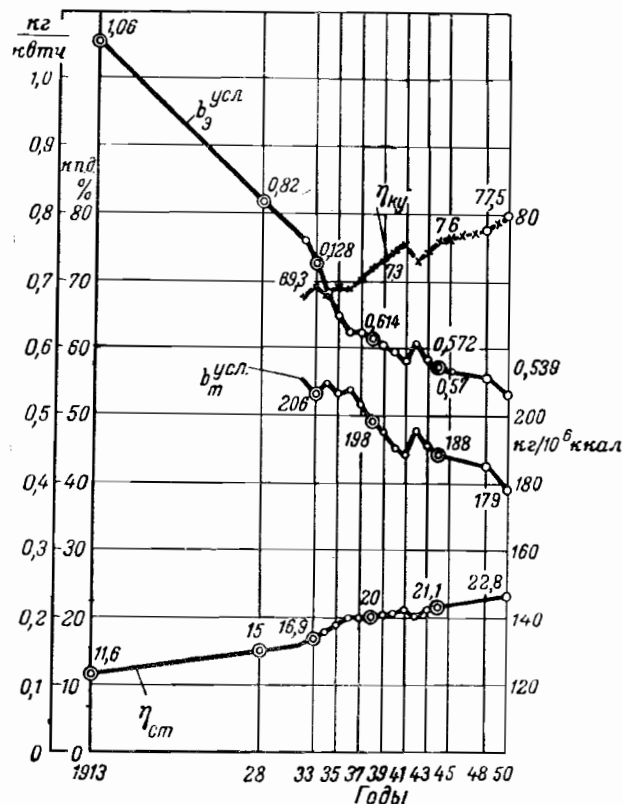
$$q_t = \frac{B_mQ_n^p}{Q_{отн}} \text{ ккал/ккал}. \quad (123)$$

Соответственно находим расход условного топлива на 1 *ккал* тепла, отпущенного потребителю:

$$b_t^{усл} = \frac{q_t}{7000} = \frac{B_mQ_n^p}{Q_{отн} \cdot 7000} \text{ кг/ккал}. \quad (124)$$

Обычно этот расход вычисляют не на 1 ккал, а на 1 млн. ккал, отпущенных потребителю. Очевидно, он составит:

$$b^m = \frac{B_m Q_n^p \cdot 10^6}{7000 Q_{отп}} = \frac{143 B_m Q_n^p}{Q_{отп}} \text{ кг/млн. ккал.} \quad (125)$$



Фиг. 161. Среднегодовые удельные расходы условного топлива и к. п. д. производства тепла и электроэнергии на электрических станциях Министерства электростанций.

Экономичность тепловых электрических станций Советского Союза неизменно из года в год повышается. Об этом свидетельствует улучшение показателей их работы. На

фиг. 161 представлены данные по расходу условного топлива на выработку электрической энергии и на 1 млн. ккал тепла, отпущенного с теплоэлектроцентралей, и к. п. д. станций и котельных установок, находящихся в ведении Министерства электростанций. Дополнительно к этим данным нужно отметить, что в 1951 г. расход условного топлива составил 531, в 1952 г. — 0,519, а в 1953 г. — 508 г/квтч.

Рассмотрение графиков показывает, что расход условного топлива уменьшился больше чем в 2 раза по отношению к дореволюционному времени.

55. СТОИМОСТЬ СООРУЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И СЕБЕСТОИМОСТЬ ЭНЕРГИИ

Стоимость сооружения электрической станции выясняют в процессе ее проектирования путем составления смет на каждый ее цех. Опыт проектирования электрических станций показывает, что стоимость сооружения станции в сильной степени зависит от ряда показателей ее и в первую очередь от установленной мощности, числа и единичных мощностей основного оборудования и рода сжигаемого топлива. Для общей ориентировки в стоимостях сооружения конденсационных станций приводим ¹ кривую зависимости стоимости сооружения конденсационной электрической станции, работающей на антрацитовом штыбе, от мощности ее (фиг. 162).

Подробное рассмотрение вопроса о стоимости сооружения тепловых электрических станций показывает, что стоимость их резко уменьшается при увеличении мощности до 150 000—200 000 квт, а в дальнейшем снижается слабо; при данной мощности станции она стоит тем меньше, чем больше единичная мощность турбин и котлоагрегатов.

Себестоимость электроэнергии в основном составляется из расходов на топливо, заработную плату, амортизацию здания, оборудования и ремонт. Примерное распределение этих составляющих себестоимости показано в таблице, приведенной на стр. 338.

Как видим, наибольшая составляющая — это расход на топливо; поэтому повышение экономичности работы паро-

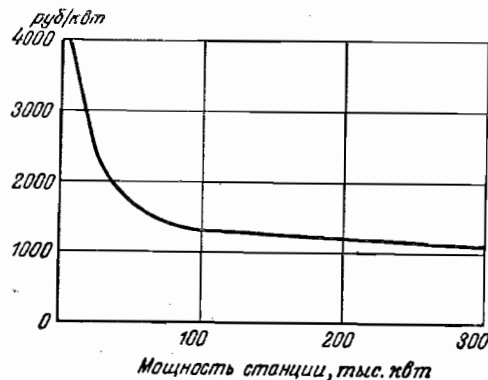
¹ Материал для этого параграфа заимствован из книги Е. О. Штейнгауза «Вопросы энергоснабжения в планировке городов» (§ 6 и 7 гл. 5).

Составляющие себестоимости электроэнергии

Статья расходов	%
Топливо	40—70
Зароботная плата	15—20
Амортизационные расходы	10—12
Прочие	20—25

вых турбин, котлов и улучшение тепловой схемы электростанции должно быть основной заботой ее персонала.

По отношению к количеству вырабатываемой продукции денежные расходы на электрической станции могут быть,



Фиг. 162. Удельные капиталовложения в сооружение конденсационных электростанций при типовой структуре станции и средних условиях сооружения (уголь—антрацитовый штыб).

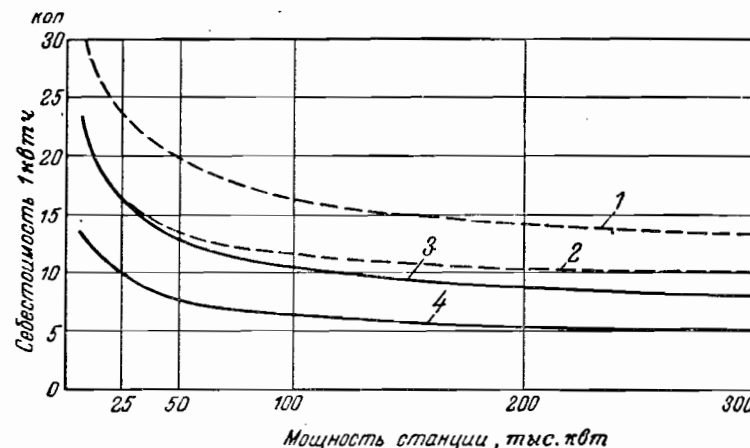
хотя и не совсем точно, разделены на постоянные и переменные.

Постоянные расходы не зависят, а переменные зависят от количества выработанной энергии.

К постоянным денежным расходам относятся в основном амортизационные расходы, отчисляемые для восстановления сооружений и оборудования после их износа; сюда же относятся расходы по содержанию административного аппарата, налоги, сборы, расходы по благоустройству и пр.

К переменным расходам относится в основном расход на топливо; сюда же надо отнести расходы на текущий ремонт, расходы на эксплуатационный персонал, расходы на различного рода эксплуатационные материалы.

Удельная себестоимость энергии, т. е. себестоимость 1 квтч электрической энергии и стоимость



Фиг. 163. Себестоимость электрической энергии на конденсационной станции.

Станция среднего давления при твердом топливе: 1 — число часов использования 3 000 час/год; 2 — то же 6 000 час/год. Станции высокого давления при твердом топливе: 3 — число часов использования 3 000 час/год; 4 — то же 6 000 час/год.

1 млн. ккал тепла, очевидно, тем меньше, чем выше выработка продукции на станции, так как в этом случае составляющая постоянных расходов меньше.

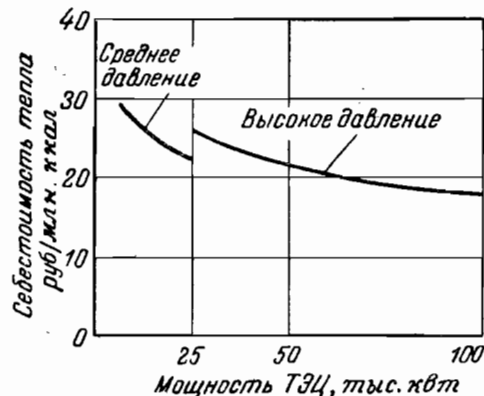
На фиг. 163 приведены значения себестоимостей электроэнергии на конденсационных станциях, использующих твердое топливо и имеющих число часов использования 3 000 и 6 000 час/год.

Рассмотрение кривых показывает, что себестоимость снижается при увеличении мощности станции, числа часов использования и переходе на высокие параметры пара.

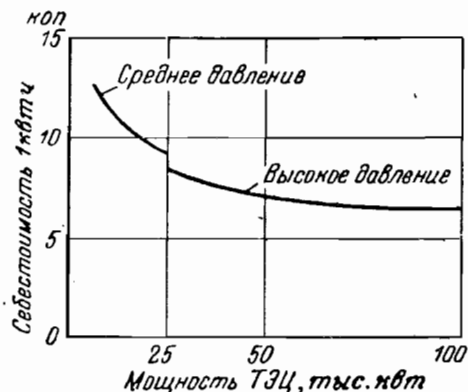
На фиг. 164 и 165 приведены себестоимости электрической и тепловой энергии на ТЭЦ, имеющих один регулируемый отбор для целей отопления.

Для обоих случаев принята стоимость условного топлива 75 руб/т.

Пример 27. Теплоэлектроцентр с установленной мощностью 100 000 кВт выработала $\mathcal{E} = 600\,000\,000$ кВтч/год электрической энер-



Фиг. 164. Себестоимость выработки электроэнергии на ТЭЦ.



Фиг. 165. Себестоимость выработки тепла на ТЭЦ.

гии и отпустила $Q_{отп} = 750\,000$ млн. ккал/год тепла. Под котлами сожжено $B = 1\,000\,000$ т/год топлива с теплотой сгорания $Q_n^p = 2\,400$ ккал/кг. Определить: 1) число часов использования установленной электрической мощности станции; 2) коэффициент использования установленной мощности; 3) коэффициент использования тепла топлива; 4) удельный

расход условного топлива на выработку электрической энергии, считая, что удельный расход условного топлива на тепло, отпускаемое потребителю, составляет $b_m^y = 175$ кг/млн. ккал; 5) $\eta_{ТЭЦ}^{\mathcal{E}}$ и $\eta_{ТЭЦ}^m$.

1. Число часов использования установленной электрической мощности станции

$$T_{уст} = \frac{\mathcal{E}}{N_{уст}} = \frac{600\,000}{100\,000} = 6\,000 \text{ час/год.}$$

2. Коэффициент использования установленной мощности станции

$$k_u = \frac{T_{уст}}{8\,760} = 0,685.$$

3. Коэффициент использования тепла топлива

$$k_{топ} = \frac{860\mathcal{E} + Q_{отп}}{BQ_n^p} = \frac{860 \cdot 600\,000\,000 + 750\,000\,000\,000}{1\,000\,000\,000 \cdot 2\,400} = \frac{126,6 \cdot 10^{10}}{240 \cdot 10^{10}}; \\ k_{топ} = 0,526.$$

4. Расход условного топлива на станции по формуле (55) составляет:

$$B_y = \frac{B_{\mathcal{E}} Q_n^p}{7\,000} = \frac{1\,000\,000 \cdot 2\,400}{7\,000} = 343\,000 \text{ т/год.}$$

Расход условного топлива на тепло, отпущенное тепловому потребителю, по условию задачи составит:

$$B_m = Q_{отп} b_y^m = 750\,000 \cdot 175 = 135\,000\,000 \text{ кг/год} = 131\,000 \text{ т/год.}$$

Расход условного топлива на производство электрической энергии

$$B_g = B - B_m = 343\,000 - 131\,000 = 212\,000 \text{ т/год.}$$

Удельный расход условного топлива на электрическую энергию составляет:

$$B_y^{\mathcal{E}} = \frac{212\,000\,000}{600\,000\,000} = 0,354 \text{ кг/кВтч.}$$

5. Коэффициент полезного действия ТЭЦ по выработке электрической энергии

$$\eta_{ТЭЦ}^{\mathcal{E}} = \frac{860\mathcal{E}}{B^{\mathcal{E}} Q_n^p} = \frac{860 \cdot 600\,000\,000}{212\,000\,000 \cdot 7\,000} = 0,348.$$

Коэффициент полезного действия ТЭЦ по выработке тепловой энергии

$$\eta_{ТЭЦ}^m = \frac{750\,000 \cdot 10^6}{131\,000\,000 \cdot 7\,000} = 0,82.$$

Латинский алфавит

Обозначения букв	Названия букв	Обозначения букв	Названия букв
A, a	а	N, n	эн
B, b	бэ	O, o	о
C, c	цэ	P, p	пэ
D, d	дэ	Q, q	ку
E, e	э	R, r	эр
F, f	эф	S, s	эс
G, g	гэ (же)	T, t	тэ
H, h	ха (франц. аш)	U, u	у
I, i	и	V, v	вэ
J, j	йот	W, w	дубль-вэ
K, k	ка	X, x	икс
L, l	эль	Y, y	игрек
M, m	эм	Z, z	зэт

Таблица 1

Удельные веса различных веществ (кг/м³)

Алюминий	2 700	Керосин (0° C)	800
Железо	7 800	Ртуть (0° C)	13 600
Медь	8 900	Спирт (0° C)	790
Платина	21 500	Азот¹	1,25
Дерево	600	Воздух¹	1,29
Чугун	7 000	Кислород¹	1,42
Вода (4° C)	1 000	Углекислый газ¹	1,97

¹ При температуре 0° C и давлении 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	Аргентум	Ag	108
Алюминий	Aluminium	Алюмйнийум	Al	27
Углерод	Carboneum	Карбонеум	C	12
Медь	Cuprum	Купрум	Cu	64
Железо	Ferrum	Феррум	Fe	56
Водород	Hydrogenium	Хидрогениум	H	1
Азот	Nitrogenium	Нитрогениум	N	14
Кислород	Oxygenium	Оксигениум	O	16

Таблица 3
Молекулярные веса некоторых газообразных тел

Название газа	Химическая формула	Молекулярный вес
Водород	H ₂	2
Кислород	O ₂	32
Азот	N ₂	28
Оксид углерода	CO	28
Углекислый газ	CO ₂	44
Водяной пар	H ₂ O	18
Метан	CH ₄	16

Таблица 4

Теплоемкость твердых и жидких тел (ккал/кг град)

Алюминий	0,22	Вода	1,0
Сталь (чугун)	0,11	Керосин	0,51
Медь	0,09	Ртуть	0,03
Платина	0,03	Спирт	0,58
Марганец	0,5		

Таблица 5

Теплоемкость газообразных тел (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 6

Температура и теплота плавления некоторых тел

Тела	Температура плавления, °C	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 7
Температура кипения и теплота парообразования (при нормальном давлении) для некоторых тел

Тела	Температура кипения, °С	Скрытая теплота парообразования, ккал/кг
Спирт	78	202
Вода	100	539
Ртуть	357	68
Эфир	35	90

Насыщенный водяной пар

Таблица 8

Давление, ата	Температура кипения, °С	Удельный объем сухого насыщенного пара, v''	Скрытая теплота парообразования, ккал/кг	Теплосодержание жидкости, ккал/кг	Теплосодержание 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
200	364	0,0062	150	431	581

Таблица 9

Нижшая теплота сгорания
рабочих топлив (ккал/кг)

Дрова	3 200
Торф	3 000
Подмосковный уголь	3 000
Каменный уголь	5 000—7 000

Таблица 10

Топливо	RO ₂ макс
Дрова	20,0
Торф	19,4
Подмосковный уголь	19,3
Антрацит	20,0
Мазут	15,5