

Б.Ф.БИЛИМОВИЧ **ТЕПЛОВЫЕ
ЯВЛЕНИЯ
В ТЕХНИКЕ**

ПОСОБИЕ
ДЛЯ УЧАЩИХСЯ

МОСКВА
«ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1981

ББК 22.36
Б61

Билимович Б. Ф.

Б 61 Тепловые явления в технике: Пособие для учащихся.—
М.: Просвещение, 1981.— 96 с., ил.

В книге рассказывается о техническом использовании тепловых процессов, изучаемых в курсе физики средней школы.

Б $\frac{60601-374}{103(03)-81}$ 264—80 4306021100

ББК 22.36
530.1

© Издательство «Просвещение», 1981 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Тепловые явления, о которых рассказывается в этой книге, имеют самое широкое распространение как в мире живой природы, так и в различных отраслях техники.

Главным источником энергии на Земле является Солнце. Благодаря теплообмену между Солнцем и Землей на нашей планете существуют условия, благоприятные для жизни. Под влиянием солнечного света и тепла растения живут и развиваются. А растительность — это пища для животных и человека, это одежда, топливо и строительные материалы.

Процессы теплообмена Солнца и Земли служат причиной возникновения ветров и облаков, дождей и туманов, они определяют температуру атмосферы в разное время суток и года, погоду и климат различных районов земного шара.

Тепловые явления играют исключительно важную роль в технике (например, в отопительных системах с их сложными котельными установками, насосами и разветвленной многокилометровой сетью паропроводов).

Современную промышленность и транспорт невозможно представить себе без тепловых машин. Так, поршневой двигатель внутреннего сгорания является энергетическим «сердцем» автомобиля и трактора, тепловоза и теплохода, танка и экскаватора; с помощью реактивных двигателей летают самолеты и ракеты; гигантские паровые турбины вращают роторы генераторов на электрических станциях и приводят в движение океанские суда-турбоходы.

Особенно большое значение имеют тепловые процессы в металлургической и металлообрабатывающей промышленности — при выплавке черных и цветных металлов, при отливке всевозможных деталей машин и их механической обработке

точением, фрезерованием, строганием, при их штамповке и прокатке.

Тепловые явления лежат в основе очень многих технологических процессов: сушки древесины, сушки, варки и пропаривания пищевых продуктов, пламенной сварки, резки и закалки металлов и др.

Многочисленные и разнообразные тепловые явления, происходящие в природе и используемые в технике, имеют общие законы. Знание этих законов позволяет ученым и инженерам решать важные практические задачи в различных областях техники — при расчете паровых котлов, тепловых электростанций, при проектировании отопительных систем. Без знания теории теплоты невозможно было бы производить строительные материалы и пластмассы, управлять работой ядерных реакторов, выделяющих громадные количества теплоты, рассчитывать ракеты и установленные на них сложнейшие приборы и аппараты, работающие на основе законов термодинамики.

С тепловыми явлениями человек сталкивается на каждом шагу, поэтому необходимо изучать закономерности, которым они подчиняются, знакомиться с принципом действия и устройством тепловых установок и машин.

Цель этой книги и состоит в том, чтобы познакомить учащихся средней школы с наиболее важными примерами технического использования тепловых процессов, изучаемых в курсе физики.

Читая книгу, можно для справок использовать следующую учебную литературу:

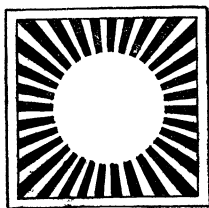
1. П е р ы ш к и н А. В., Р о д и н а Н. А. Физика. Учебник для 6—7 классов средней школы /Под ред. акад. И. К. Кикоина. М., Просвещение, 1980.

2. Б у х о в ц е в Б. Б., К л и м о н т о в и ч Ю. Л., М я к и ш е в Г. Я. Физика. Учебное пособие для 9 класса средней школы. М., Просвещение, 1980.

При ссылках на эти учебники первый из них обозначается в книге номером [1], второй — номером [2].

Рекомендуемая учебная литература

- | | |
|--------------|--|
| К главе I: | [1]. § 81—84; 90—94.
[2]. Гл. I § 1—3; гл. IV § 19—22. |
| К главе II: | [1]. § 85—89.
[2]. Гл. IV § 19—22. |
| К главе III: | [1]. § 128.
[2]. Гл. VII § 36; гл. III § 17; гл. IV § 19. |
| К главе IV: | [1]. § 95; 16, 103—112.
[2]. Гл. IV § 22—24; гл. V § 25—27. |
| К главе V: | [1]. § 96—102.
[2]. Гл. VI § 31, 32; гл. X § 77. |



ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОТЫ

Г Л А В А I

§ 1. Топливо

Современная промышленность и сельское хозяйство потребляют огромное количество энергии. Главную часть этой энергии составляет энергия ископаемого топлива. Топливо используется в отопительных, обжигательных, доменных, сталеплавильных, стекловарочных и прочих печах, в нефтеперегонных установках, в бесчисленных кипятильниках и нагревательных приборах, пищевой, кожевенной, текстильной промышленности, в тепловых машинах электростанций. Большое количество топлива (особенно жидкого) потребляет транспорт.

Топливом называют те горючие вещества, которые при сжигании выделяют значительное количество теплоты, достаточно широко распространены в природе, причем добыча их не связана с большими затратами, а продукты сгорания практически безвредны.

Ценность топлива определяется величиной, которая называется теплотой сгорания топлива, т. е. количеством теплоты, выделяемой 1 кг топлива при его полном сгорании.

Основными горючими элементами почти каждого вида топлива являются углерод и водород, которые входят в его состав в виде сложных соединений — углеводородов. Чем больше в топливе углерода и водорода, тем выше его теплота сгорания. Содержание в топливе серы, влаги, минеральных элементов (зола), называемых топливным балластом, характеризует засоренность топлива.

Главными видами топлива, которое используется в разных отраслях промышленности, являются ископаемый уголь, нефть, природный газ и торф.

Ископаемый уголь — наиболее распространенный вид топлива, в некоторых случаях его перерабатывают в другие более

ценные виды топлива — кокс, жидкое и газообразное горючее, он служит также ценнейшим сырьем для химической промышленности, производящей пластмассы, каучук, удобрения, ткани, питательные вещества, лекарственные препараты.

Существуют три вида ископаемых углей:

1. Антрацит — самый древний и ценный из ископаемых углей — содержит около 95 % углерода, теплота сгорания антрацита $q = 3,1 \cdot 10^7$ Дж/кг. В общих запасах ископаемого угля в СССР антрацит составляет около 5,5 %.

2. Каменный уголь содержит 75—90 % углерода, из всех ископаемых углей используется наиболее широко. Для каменного угля $q = 2,5 \cdot 10^7 \dots 2,8 \cdot 10^7$ Дж/кг.

3. Бурый уголь содержит 65—70 % углерода, обладает большой зольностью, поэтому применяется только как местное топливо; из него изготавливают бензин и керосин. Для бурого угля $q = 2 \cdot 10^7 \dots 2,2 \cdot 10^7$ Дж/кг.

К весьма ценным видам топлива относятся нефть и природный газ. Нефть представляет собой раствор твердых и газообразных углеводородов (соединений углерода с водородом) в жидких углеводородах. Природный газ — это газообразные углеводороды.

Из нефти, так же как и из угля, получают бензин, керосин и много других ценных химических продуктов, поэтому перерабатывать ее гораздо выгоднее, чем сжигать для отопления.

На газообразном топливе целиком работают многие крупные машиностроительные заводы, на сталелитейных заводах им отапливают печи, в которых выплавляется высокосортная сталь. Природный газ широко используется для отопления зданий, кухонных плит и других бытовых нужд.

По разведанным залежам торфа СССР является самой богатой страной мира. Содержание углерода в торфе не превышает 65 %. Главный недостаток этого вида топлива — его высокая зольность. На торфе работает ряд крупных электростанций, из него получают такие ценные химические продукты, как аммиак и деготь, торф используется как удобрение, торфяные плиты применяют в строительстве.

Среди различных видов топлива, используемых в технике, древесина занимает второстепенное место. Ее применяют главным образом для изготовления мебели и в качестве строительного материала.

Твердое топливо гораздо менее удобно для употребления, чем жидкое или газообразное. Его нужно подвозить и загружать в печь, оно дает при горении большое количество золы, которую приходится удалять из печи и вывозить из котельной.

Гораздо легче транспортировать жидкое горючее (например, нефть), которое подводят по трубам, впрыскивают в топку через особые приспособления, называемые форсунками, при этом оно

хорошо перемешивается с воздухом, что обеспечивает наиболее полное сгорание топлива и высокий КПД печи.

Еще более удобен для использования горючий газ. Его также можно перекачивать по трубам, при сгорании он совсем не дает золы, его более полно, чем жидкое топливо, можно перемешать с воздухом, и потому он горит при более высокой температуре.

Ископаемый уголь и торф образовались в результате длительного отмирания и разложения растительных организмов, существовавших на Земле в отдаленные геологические эпохи, и потому их называют органическим топливом. Образование каменноугольных месторождений особенно интенсивно происходило в течение каменноугольного периода 230—280 млн. лет назад. В это время жаркий тропический пояс нашей планеты покрывали густые вечнозеленые леса гигантских (высотой до 40 м) папоротников, хвощей, плаунов (см. цветную вклейку, рис. 1). Деревья погибали, на их месте вырастали новые леса, и этот продолжавшийся многие тысячелетия процесс рождения и отмирания растительности привел к образованию торфяников — огромного скопления тлеющих органических остатков. Когда земная кора опускалась, их заливало водой и заносило минеральными осадками, выносимыми в образовавшийся водоем реками и ручьями. Постепенно возрастая, толщина этих осадков достигала в ряде случаев нескольких километров. Вместе с этим замирала, а затем и вовсе прекращалась жизнедеятельность микроорганизмов, разлагавших органическую массу торфяника.

Под действием очень большого (свыше 10^8 Па) давления вышележащих горных пород и высокой температуры торф, теряя воду, уплотнялся и подвергался сложным химическим превращениям, происходящим без доступа воздуха. В результате концентрация углерода в нем возрастала, а кислорода уменьшалась — торф превращался в каменный уголь.

Если рассматривать кусок каменного угля в микроскоп, его растительное происхождение становится очевидным: среди основной массы угля можно ясно различить мелкие обломки древесины и коры, обрывки листьев, пыльцу, споры и семена растений. Нередко в каменноугольном пласте хорошо видны растительные остатки и невооруженным глазом. Среди них иногда встречаются громадные окаменевшие стволы деревьев. Каменный уголь залегают в недрах земли в виде пластов между пластами других горных пород — глины, песчаников, известняка и т. д. В различных месторождениях встречаются как тонкие пласты угля, так и такие, мощность (т. е. толщина) которых достигает 20 и более метров. Например, в Канско-Ачинском угольном бассейне в Сибири близко к поверхности земли на 1000 км тянется пласт угля толщиной 100 м.

Чтобы добыть уголь, залегающий в недрах земли, надо прежде всего открыть к нему доступ. При неглубоком залегании

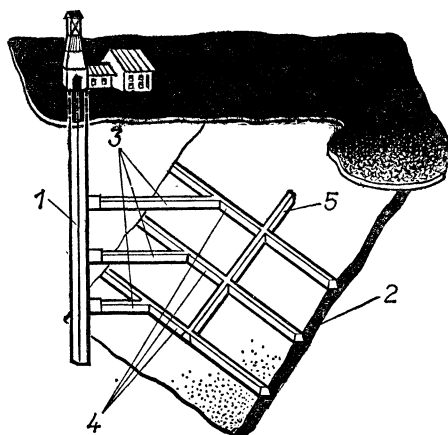


Рис. 1. Схема угольной шахты.

1000 м) уголь добывают с помощью подземных горных выработок (рис. 1). В этом случае с поверхности в глубь земли проводят ствол шахты 1, т. е. вертикальную выработку круглого или овального сечения. Ствол оборудуют мощными подъемными машинами, которые служат для транспортировки людей, подъема угля на земную поверхность и опускания в шахту различных механизмов и материалов.

От ствола шахты к угольному пласту 2 на разных уровнях по пустым горным породам проводят горизонтальные выработки 3. Чтобы подготовить пласт к добыче угля, его разрезают на прямоугольные участки системой пересекающихся под прямым углом коридоров — штреков 4 и уклонов 5. Разработка угля производится с помощью сложных машин — угольных комбайнов, которые подпиливают пласт, отбивают и грузят уголь на транспортеры, доставляющие его к откаточным штрекам. Там уголь попадает в вагонетки, в них его везут электровозом к шахтному стволу и поднимают на земную поверхность.

Несмотря на механизацию многих трудоемких работ, угольная промышленность требует огромных затрат человеческого труда. Кроме дробления угольного пласта и транспортировки угля, приходится производить много вспомогательных операций: очищать уголь от пустой породы, сортировать его, вентилировать шахту, откачивать заливающую ее воду и т. д. Многие из этих работ, как основных, так и вспомогательных, становятся ненужными при подземной газификации угля, идея которой была выдвинута гениальным русским химиком Д. И. Менделеевым. Этим способом разрабатываются тонкие угольные пласты, оставшиеся раньше под землей неиспользованными, так как в них нельзя разместить врубовые машины и другие механизмы.

и достаточной мощности угольного пласта уголь во многих случаях разрабатывают открытым способом. Для этого сначала с угольного пласта снимают пустые наносные горные породы. Вскрытый уголь вынимают экскаваторами, грузят в железнодорожные вагоны (см. цветную вклейку, рис. 2) и по рельсовым путям вывозят в угольный склад. Глубина открытых разработок нередко составляет 100 и более метров.

При большей глубине залегания угольных пластов (а она иногда превышает

Сущность газификации твердого топлива заключается в следующем. Когда твердое топливо (например, уголь или дерево) сгорает, выделяя энергию, весь содержащийся в топливе углерод соединяется с кислородом, образуя оксид углерода (IV) (углекислый газ). Если горение происходит при ограниченном доступе воздуха, углерод сгорает не полностью, а весьма значительная его часть образует более бедное кислородом соединение — оксид углерода (II) — газ, который может гореть и потому используется в качестве топлива.

Подземная газификация каменного угля, являющаяся крупным достижением советской техники *, производится так (рис. 2).

Вдоль угольного пласта 1 проводят две наклонные выработки 2 и 3. Внизу их соединяют между собой каналом 4, который называется огневым штреком, а сверху — с поверхностью буровыми скважинами 5 и 6. Выработки 2, 3 и 4 ограничивают ту часть пласта, которая предназначена для подземной газификации и называется панелью 7.

Чтобы разжечь уголь, в огневой штрек 4 помещают легковоспламеняющиеся горючие материалы. Затем в них закладывают взрывной патрон и поджигают его. Огонь распространяется по поверхности угля в огневом штреке. Для поддержания горения через скважину 5 компрессором 8 в огневой штрек вдувают воздух или кислород.

Воздушный поток омывает раскаленную поверхность горящего угольного пласта, при этом кислород соединяется с углем и образует горючий газ, состоящий из оксида углерода и соединений углерода с водородом.

Выгорание угольного пласта происходит постепенно, снизу вверх, отчего огневой штрек расширяется. Лежащая над выгоревшим пространством кровля (пласты глины, известняка и т. д.) периодически обрушивается, а образовавшиеся куски горной породы скатываются вниз.

Благодаря этому пространство около горячей поверхности пласта остается

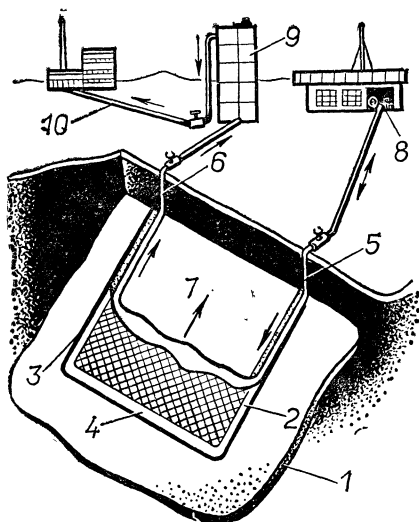


Рис. 2. Схема подземной газификации каменного угля.

* Лицензию на технологию подземной газификации угля приобрели у нашей страны Соединенные Штаты Америки.

свободным и сечение огневого штрека изменяется в среднем незначительно.

Полученный горючий газ по выработке 3 и скважине 6 поднимается на поверхность и поступает в специальный аппарат — скруббер 9, где он охлаждается и очищается от пыли, после чего по трубопроводу 10 направляется для переработки на химический комбинат или используется как топливо.

Специальные приборы, установленные под землей и на ее поверхности, определяют температуру горящего пласта и состав выходящего из недр земли горючего газа. По этим данным, уменьшая или увеличивая количество поступающего в пласт воздуха, регулируют процесс газификации.

Несмотря на то что при газификации некоторая часть угля сгорает, газификация выгодна, так как передавать горючий газ по трубопроводам гораздо удобнее и дешевле, чем перевозить твердое топливо по железной дороге.

В настоящее время в Советском Союзе по такому способу работают три станции подземной газификации угля — в Подмоскowie, Кузбассе и Средней Азии, которые ежегодно дают 1,5 млрд. м³ горючего газа.

Вопрос о том, как образовалась нефть, не выяснен еще до конца. Существуют две основные гипотезы о ее происхождении: органическая и неорганическая. Согласно первой гипотезе нефть образовалась из остатков погибших животных и растительных организмов, которые в течение тысячелетий накапливались на дне прибрежных участков древних морей. Эта органическая масса смешивалась с илесто-глиняным веществом, образуя особый студенистый ил, который в результате опускания земной коры оказывался погребенным под многометровым слоем осадочных горных пород. Под действием большого давления и высокой температуры земных недр, а также радиоактивных излучений из слоя этого ила выделялись смолистые и маслянистые соединения водорода и углерода. Наиболее подвижная и текучая часть этих соединений и представляет собой нефть и горючий газ, для которых теплота сгорания равна соответственно $4,4 \cdot 10^7$ и $4,62 \cdot 10^7$ Дж/кг.

Согласно неорганической гипотезе происхождения нефти она пришла снизу из глубоких земных недр, где в огромных количествах имеются оксиды углерода, уголекислота, водород и другие элементы, входящие в состав нефти. Из них под влиянием большого давления и высокой температуры и образовалась нефть и горючий газ.

Обычно нефть не остается на месте своего образования: под действием капиллярных сил и давления вышележащих горных пород вместе с водой и газами она по разломам и трещинам, пронизывающим земную кору, поднимается вверх ближе к земной поверхности. Пористые осадочные породы (пески и песчаники) не задерживают этого движения, но встречая на своем пути

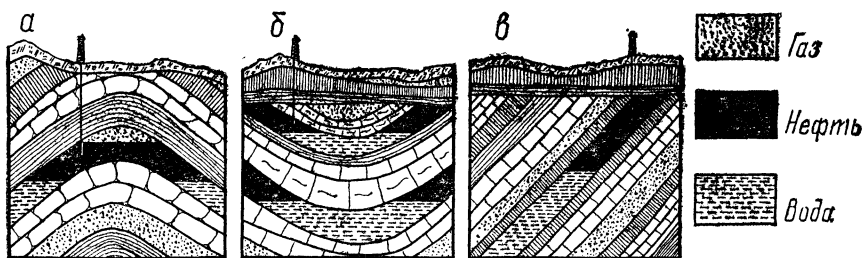


Рис. 3. Скопление нефти в складках и пластах горных пород.

плотные непроницаемые слои глины или соли, нефть останавливается и накапливается в складках осадочных горных пород, образуя нефтяные месторождения. Попадая в складку, обращенную выпуклостью вверх (рис. 3, а), нефть размещается в ее средней части, над нефтью располагается газ, под нефтью — вода.

В складке, обращенной выпуклостью вниз (рис. 3, б), нефть занимает ее крылья, а вода — центральную часть.

Месторождения нефти могут возникать и в плоских наклонных пластах осадочных горных пород (рис. 3, в).

Добывается нефть с помощью буровых скважин, которые бурят с поверхности земли до нефтеносного пласта. Вода и газы, окружающие пласты с нефтью, нередко оказывают на нее большое давление (до $2 \cdot 10^7$ Па), под действием которого она с большой скоростью выходит из буровой скважины, образуя нефтяной фонтан. Когда давление в пласте нефти падает, она перестает фонтанировать. После этого некоторое время нефть откачивают из скважины насосами. Наконец и насосы перестают помогать, хотя под землей остается еще много нефти. Тогда вокруг эксплуатационных скважин бурят нагнетательные скважины и накачивают через них в нефтяной пласт воду. Возрастающее давление воды передается по закону Паскаля на нефть, и из «угасших» скважин снова начинает бить нефть. Этим способом искусственного поддержания давления в пласте, получившим название законтурного заводнения, удается добыть до 80 % залегающей в земле нефти. При прежних способах ее извлекали менее 30 %.

Схема добычи нефти с помощью этого способа изображена на цветной вклейке (рис. 5). Из нее видно, что в данном случае используют воду, залегающую в водоносном слое 1, где она находится под давлением около $1,8 \cdot 10^7$ Па. Через скважину 2 вода вырывается на земную поверхность и давление ее падает до $3 \cdot 10^5$ Па. Насосная станция 3 гонит воду через скважину 4 вниз, и в нефтяной пласт 5 она попадает под давлением более $3,3 \cdot 10^7$ Па. Благодаря этому нефть через скважину 6 поднимается на поверхность. Насосная станция 7 направляет ее к цистернам 8, где нефть хранится. Насосная станция 10 перекачивает

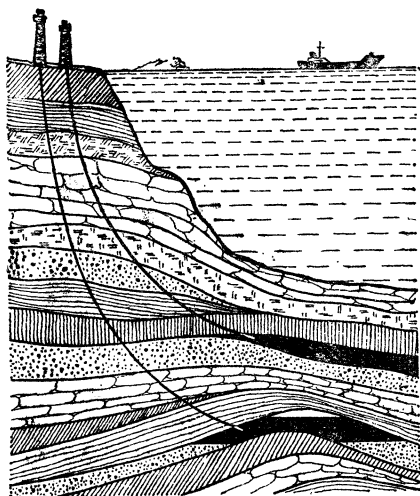


Рис. 4. Бурение направленных скважин.

нефть из цистерн и направляет ее в магистральный трубопровод 9.

При добыче нефти в нашей стране широко используется замечательный турбобур, изобретенный советским инженером М. А. Капелюшниковым.

Применение турбобура решило задачу бурения искривленных скважин, позволяющих вскрывать скопления нефти под дном моря (рис. 4) или густонаселенными районами (т. е. когда заложить скважину непосредственно над нефтяной залежью невозможно). С этой целью между турбобуром и концом колонны бурильных труб закрепляют короткую упругую, слегка изогнутую

стальную трубу, которая постепенно отклоняет турбобур в нужном направлении и искривляет скважину.

Торф обычно залегает на поверхности земли, и его добывают с помощью открытых разработок в основном фрезерным способом (в СССР этим способом добывается более 95 % общей промышленной добычи). Этот способ состоит в том, что верхний слой торфяной залежи срезают и измельчают особой перемещающейся машиной. Полученную торфяную крошку затем сгребают и сушат.

По подсчетам ученых, при современном уровне добычи разведанных запасов угля хватит на тысячи лет. Мировое потребление топлива каждые 20 лет возрастает примерно вдвое. А поскольку почти все добываемое топливо сжигается (лишь около 10 % нефти и газа потребляется в виде сырья), ежегодный выброс в атмосферу Земли веществ, образующихся при сжигании топлива (зола, оксидов серы, азота, углекислого газа), достигает огромных количеств, что вызывает значительное загрязнение окружающей среды.

Ограниченность ресурсов нефти и газа, а также загрязнение окружающей среды отходами ископаемого топлива ставят перед человечеством задачу освоения новых источников энергии — солнечной энергии, глубинной энергии земных недр и атомной энергии.

§ 2. Энергия излучения Солнца

Энергия Солнца принадлежит к постоянно возобновляемым, практически неисчерпаемым источникам энергии. При разработке высокоэффективных методов преобразования солнечной энергии в электрическую Солнце может обеспечить бурно растущее потребление электроэнергии в течение многих сотен лет.

Солнечная энергия является «чистой», т. е. ее потребление не связано со сложными технологическими процессами, которые дают вредные побочные продукты — ядовитые газы, золу, дым, загрязняющие окружающую среду.

Большое преимущество солнечных установок (по сравнению с установками, потребляющими обычное топливо) заключается в том, что они служат лишь преобразователями поступающей от Солнца энергии и не увеличивают содержание углекислоты в атмосфере, а потому не нарушают теплового равновесия нашей планеты.

Инженерная наука об использовании энергии Солнца, называемая гелиотехникой, в наши дни делает только свои первые шаги: создаются главным образом маломощные солнечные нагреватели. Наибольшее распространение получили солнечные нагреватели, работающие по принципу «горячего ящика». Схема такой установки изображена в разрезе на рисунке 5, а.

Установка состоит из деревянного ящика 1 с крышкой из оконного стекла 2. На дно ящика насыпан слой песка 3, в котором находится трубчатый змеевик 4. В змеевик поступает холодная вода из водопровода. Ящик ставят в наклонном положении стеклянной крышкой на юг. Солнечное излучение проникает через стеклянную крышку ящика и нагревает змеевик с водой и песок. Нагретый песок испускает невидимые лучи, которые оконное стекло (крышка ящика) не пропускает наружу. Кроме того,

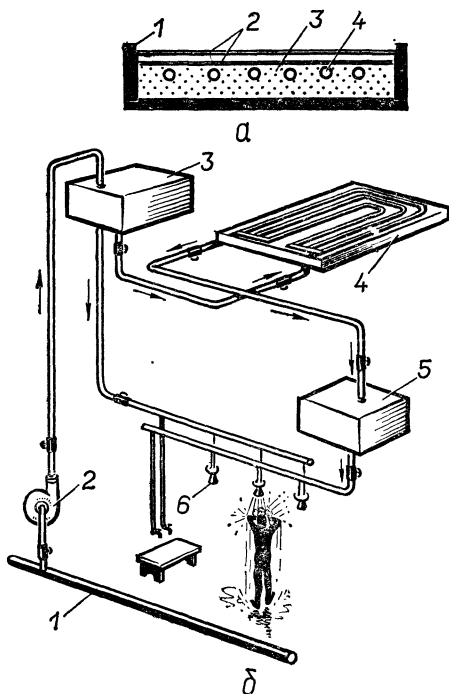


Рис. 5. Солнечная баня:

а) «горячий ящик»; б) схема установки: 1— водопровод; 2— насос; 3— бак с холодной водой; 4— «горячий ящик»; 5— бак с горячей водой; 6— душ.

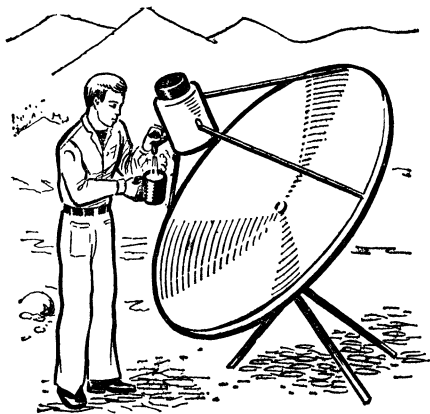


Рис. 6. Солнечная кухня.

стекло уменьшает тепловые потери от обдувания ветром. Поэтому песок, а от него вода в змеевике нагревается, причем их температура повышается на 40—50°С по сравнению с температурой окружающей среды. Из змеевика вода течет к месту потребления. По такому же принципу действуют солнечные нагреватели, обслуживающие бани (рис. 5, б), прачечные, кухни, камеры для сушки плодов, теплицы и опреснители воды.

Большое количество подобных солнечных нагревателей используется в Японии, Франции, США и других странах. В Советском Союзе солнечные нагреватели получили распространение в Грузии, Туркмении, Узбекистане и других южных районах нашей страны.

Гелиоустановки по большей части просты, дешевы, безопасны в пожарном отношении, а главное, используют даровую энергию и тем самым экономят ископаемое топливо.

Для получения высоких температур используют печи, концентрирующие солнечную энергию. Главной частью подобной солнечной печи (рис. 6) является большое параболическое зеркало, собирающее в своем фокусе падающие на него лучи, которые образуют яркое фокальное пятно. Средняя плотность энергии ω_1 в этом пятне во столько раз больше плотности ω падающего на зеркало солнечного излучения, во сколько раз площадь S_3 зеркала, умноженная на коэффициент r его отражения, больше площади $S_{\text{п}}$ фокального пятна, т. е.

$$\omega_1 = r \frac{S_3}{S_{\text{п}}} \omega.$$

Целый ряд установок, концентрирующих солнечную энергию, спроектирован и построен в Энергетическом институте имени Г. М. Кржижановского, в том числе солнечная кухня мощностью 800 Вт с зеркальным отражателем диаметром 1,2 м. На этой кухне можно готовить любые блюда и обеспечивать горячей пищей семью в 3—4 человека.

Другая крупная солнечная установка с диаметром зеркала 10 м была сооружена этим же институтом в Ташкенте. Пар этой установки ежедневно давал в опреснителе около 1 т пресной воды, производил в холодильнике до 250 кг льда, применялся для отопления лаборатории и для различных исследований.

Солнечные печи дают возможность получать весьма высокие температуры — до 3500—3700 °С, что позволяет доводить до плавления почти все тугоплавкие материалы, даже платину.

В выплавленном таким способом металле удается избавиться от примесей и загрязнений, неизбежных при других методах плавки.

В настоящее время в СССР, США и других странах ведутся работы над проектами солнечных энергетических станций, т. е. солнечных энергетических установок, отличающихся повышенной мощностью (до тысячи киловатт). Поскольку КПД солнечных установок пока еще низок, каждая гелиостанция должна быть снабжена системой зеркал, обладающих громадной площадью. Так, например, для этой цели можно использовать систему зеркал 1 (см. цветную вклейку, рис. 4), смонтированных на тележках, которые автоматически передвигаются по концентрическим рельсовым путям в соответствии с перемещением Солнца. В центре площадки, окруженной этими рельсами, расположена 40-метровая башня, на вершине которой установлен вращающийся паровой котел 2. Солнечные лучи, отражаясь от зеркал, падают на стенки котла и нагревают находящуюся в нем воду, обращая ее в пар. Пар используется в паровой турбине 3, приводящей в действие генератор электрического тока 4. Пока наземное использование гелиоустановок ограничено. Создавать мощные солнечные энергетические станции экономически невыгодно, во-первых, из-за их высокой стоимости, во-вторых, из-за ограничений, накладываемых климатическими условиями. Гелиоустановки могут работать только в районах, где бывает много солнечных дней. Их действие зависит от метеорологических условий, времени года, времени суток (ночью они не работают). Для бесперебойного получения энергии солнечные станции необходимо дублировать станциями иного типа или снабжать аккумуляторами.

Дальнейшее развитие гелиотехники пойдет, видимо, по пути прямого превращения солнечной энергии в энергию электрическую, с помощью полупроводниковых солнечных электробатарей, КПД которых уже сейчас достигает 10—15 %. Такие батареи широко используются и отлично работают на всех советских спутниках и космических кораблях.

§ 3. Геотермальные источники

Тепловые запасы земных недр так велики, что почти не поддаются учету. Наша планета непрерывно отдает глубинную энергию в мировое пространство, причем эти потери, достигающие $8,3 \cdot 10^{20}$ Дж в год, восполняются в основном за счет распада радиоактивных элементов, неравномерно распределенных в земной толще.

В вопросе о происхождении глубинной энергии Земли еще много неясного, так как проникнуть в земные недра и изучить их очень трудно. Предельная глубина буровых скважин, с помощью которых исследуют земные недра, составляет всего 7,7 км, это около $\frac{1}{800}$ длины земного радиуса.

Измеряя температуру горных пород в буровых скважинах, установили, что с увеличением глубины она возрастает через каждые 30 м примерно на один градус. Непосредственное измерение температуры на глубинах, превышающих 8 км, невозможно, о ней судят на основании косвенных данных. Так, например, температура лавы, изливаемой вулканическими кратерами, около 1000 °С, поэтому можно предполагать, что в вулканических очагах горные породы нагреты до 1000—1300 °С.

По мнению ученых-геофизиков, температура Земли на глубине 20 км достигает 600 °С, на глубине 100 км 1400 °С, на глубине 1000 км 2000 °С, а температура земного ядра не превышает 6000 °С.

Использование глубинных геотермальных источников является важнейшей проблемой современной техники. Особенно большое значение имеет ее решение для зоны вечной мерзлоты, охватывающей почти половину территории нашей страны. Эти районы, в которых добывается золото, олово, вольфрам и многие другие полезные ископаемые, очень бедны топливом, а подвоз его обходится дорого. Выведенную на поверхность с большой глубины горячую воду можно использовать для отопления и водоснабжения жилых и производственных помещений, для теплиц и многих других целей.

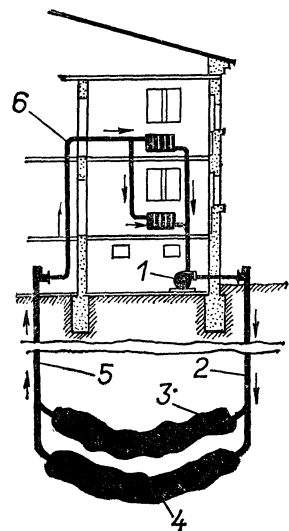


Рис. 7. Схема использования глубинного тепла Земли.

Идея получения подземной энергии заключается в следующем (рис. 7). На некотором расстоянии друг от друга бурят две скважины глубиной 3—4 км. На такой глубине горные породы имеют температуру 100—150 °С. Внизу скважины соединяют большими камерами, играющими роль парового котла. С помощью насоса 1 через скважину 2 в камеры 3 и 4 накачивают воду, здесь она нагревается до 100—150 °С. Горячая вода и пар, в который она частично превращается, через вторую скважину 5 выходят на поверхность земли и направляются потребителю, например, в обогреватели 6 помещения.

Подобным же способом можно заставить работать электростанцию мощ-

ностью до 10 млн. кВт. Чтобы получить достаточное количество пара для такой крупной станции, надо нагнетать воду насосами на глубину 7—10 км, где температура достигает 300—400 °С. Полученный пар с температурой 300—350 °С и давлением в несколько сотен атмосфер, поднявшись на поверхность, будет вращать турбины электростанции.

Из-за высоких температур и громадных давлений в недрах Земли бурение глубоких скважин и особенно устройство подземных камер связано с большими техническими трудностями. Но эти трудности преодолимы, и можно думать, что осуществление описанного здесь метода использования глубинной энергии — дело недалекого будущего.

Все работающие сейчас геотермальные электростанции расположены в районах современного вулканизма. Здесь не нужны сверхглубинные скважины, так как на глубине 2—3 км температура достигает 400—600 °С, а в некоторых местах поток пара и воды при температуре 100—200 °С в виде фонтанов (гейзеров) извергается из Земли.

Подземные термальные воды довольно широко используются для хозяйственных целей и получения электрической энергии в Италии, Японии, Франции и других странах с ограниченными запасами топлива. Так, например, столица маленькой северной страны — Исландии полностью переведена на отопление геотермальными водами. Самая крупная геотермальная электростанция мощностью 150 тыс. кВт действует в Новой Зеландии. В Италии геотермальные электростанции общей мощностью 350 тыс. кВт вырабатывают около 6 % всего потребляемого страной в год количества электричества.

В Советском Союзе наиболее выгодными районами для получения и использования энергии термальных вод являются Камчатка, Курильские острова, Северный Кавказ и Западная Туркмения. На Северном Кавказе самый крупный подземный термальный бассейн расположен около Кизляра. Горячая вода бассейна поступает на предприятия города, ею обогревается более половины жилых домов и теплицы, в которых выращивают овощи и цветы.

На рисунке 8 изображена схема советской геотермальной электростанции мощностью 5 тыс. кВт, построенной на Камчатке около горной речки Паужетки. Станция использует пароводяную смесь, поступающую с глубины 400 м из насыщенного термальными водами пласта 1 через буровую скважину 2. Температура смеси на выходе из скважины 150—200 °С, давление на ее устье $2 \cdot 10^5$ — $4 \cdot 10^5$ Па. Пар отделяется от ненужной для работы турбины воды в сепараторе 3 и поступает в турбину 4, которая приводит в действие электрогенератор 5. Отделенная от пара горячая вода идет по трубопроводу 6 на отопление зданий и другие бытовые нужды. Из турбины отработавший пар попадает в конденсатор 7. В него насосом 8 нагнетается холодная вода, которая

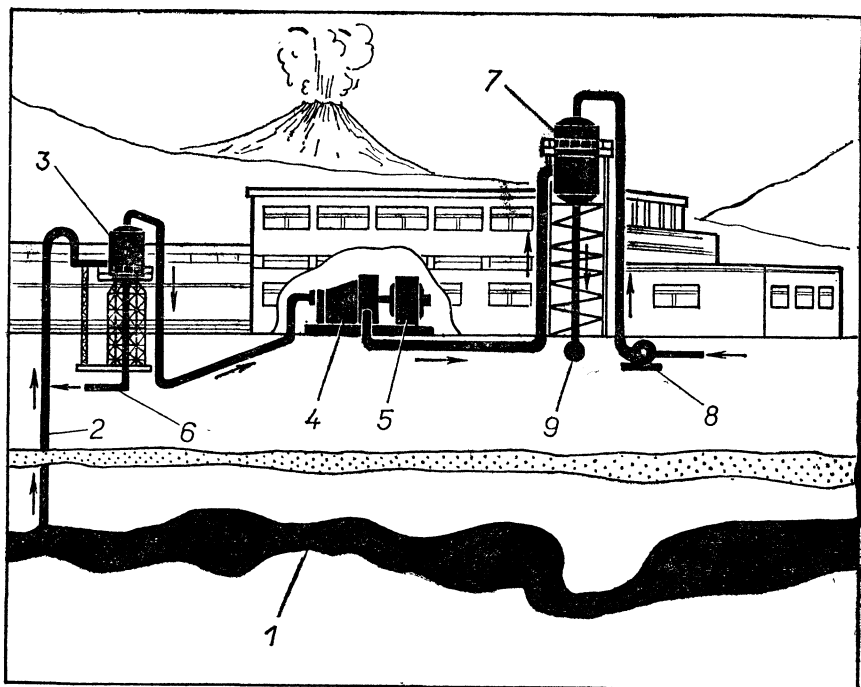


Рис. 8. Схема геотермальной электростанции.

распыляется и, смешиваясь с паром, конденсирует последний. Полученный конденсат сливается в трубопровод 9.

В скором времени мощность Паужетской электростанции предполагают увеличить.

Геотермальные электростанции не нуждаются в топливе, благодаря чему им не нужны подъездные пути для его доставки, топливные склады, громоздкие топки и котлы. Поэтому стоимость электроэнергии, вырабатываемой такими станциями, в 10—15 раз ниже, чем стоимость энергии, которую дают обычные дизельные электростанции.

Можно думать, что глубинная энергия займет важное место в энергетике будущего, однако в настоящее время геотермальная техника развита еще слабо. Это вызвано тем, что сверхглубокое бурение только начинают осваивать, а районы современного вулканизма мало населены и труднодоступны. Глубинные воды нередко насыщены минеральными солями и дают осадок, разъедающий и засоряющий трубы. Главная же причина, задерживающая развитие геотермальной техники, состоит в том, что для работы мощных турбогенераторов необходим пар с температурой порядка 500—600 °С и давлением 10^7 — $2,5 \cdot 10^7$ Па, температура же используемых в настоящее время термальных пароводяных смесей значительно меньше этих пределов.

§ 4. Ядерное горючее

В недрах нашей планеты хранятся громадные запасы ядерного горючего — урана и тория, которые по подсчетам специалистов в 15 раз превышают запасы обычного органического топлива. Однако подавляющая масса ядерного топлива чрезвычайно рассеяна в земной коре — оно входит в состав обычных гранитов и базальтов и в ничтожно малой концентрации (около 3 мг/т) содержится в морской воде. Если же учитывать только то ядерное горючее, добыча которого экономически выгодна, то его запасы будут примерно равны доступным для добычи запасам органического топлива.

Ядерное топливо только условно можно назвать «горючим». Выделение энергии из урана и тория происходит не за счет их горения, т. е. соединения с кислородом, а в результате деления их атомов.

Ядерное топливо обладает исключительно высокой энергоемкостью. Так, например, при делении атомов 1 кг урана освобождается $8,4 \cdot 10^{13}$ Дж энергии, в то время как при сгорании 1 кг каменного угля выделяется всего лишь $3 \cdot 10^7$ Дж. Следовательно, 1 кг урана при освобождении энергии, запасенной в его ядрах, может заменить 2800 т каменного угля. Для перевозки такого количества угля понадобилось бы более 45 большегрузных железнодорожных вагонов.

Путь к практическому использованию атомной энергии был найден в 1939 г. Было обнаружено, что нейтрон (частица, входящая в состав атомных ядер), попадая в ядро атома урана-235 (^{235}U), вызывает его деление на два новых ядра (осколка), которые разлетаются со скоростью 3000—4000 км/с. Следовательно, деление ядра урана сопровождается выделением больших количеств энергии.

Кроме осколков, делящееся урановое ядро испускает 2—3 новых вторичных нейтрона, движущихся со скоростью 10 000—15 000 км/с. Каждый такой нейтрон, встретив на своем пути новое ядро урана, может его разделить. Однако, если кусок урана мал, большинство вторичных нейтронов пробегает путь от места своего возникновения до границ уранового куска и выходит за его пределы, не успев вызвать новых делений. Если же масса урана равна или больше так называемой критической массы, вторичные нейтроны вызывают деление урановых ядер и порождают новые осколки и новые нейтроны. Этот процесс, называемый цепной реакцией, быстро нарастает, происходит мгновенное выделение ядерной энергии — мощный взрыв.

Критическая масса для урана составляет несколько десятков килограммов. Так как плотность урана велика (примерно 19 г/см^3), такое количество урана имеет малый объем, из него можно сделать шар радиусом всего около 10 см. Цепной процесс деления атомных ядер в куске чистого урана-235 начинается под

действием внутренней неустойчивости его ядер или случайных нейтронов, образованных космическими лучами.

Чтобы в реакторах — установках для использования атомной энергии — цепная реакция протекала постепенно, без взрыва, в толщу урана погружают стержни из кадмия, активно поглощающего нейтроны. Вдвигая или выдвигая эти стержни, можно регулировать скорость цепной реакции.

В природном уране урана-235 содержится всего лишь 0,7 %, остальные 99,3 % приходятся на долю урана-238. Поведение этих двух сортов урана при «обстреле» их нейтронами различно. Ядра атомов урана-238 делятся только очень быстрыми нейтронами, обладающими значительной энергией. Ядра атомов урана-235 делятся не только быстрыми, но и медленными нейтронами.

Нейтроны, возникающие при самопроизвольном делении в природном уране, обычно не могут вызвать деление ядер урана-238, которые их поглощают без деления. Встреча же нейтронов с ядрами урана-235 происходит чрезвычайно редко. Таким образом, природный уран, в основном состоящий из урана-238, никакой опасности взрыва не представляет.

Выделение изотопа урана-235 из природного урана обходится очень дорого, поэтому для осуществления цепной реакции и получения атомной энергии берут природный уран, обогащенный ураном-235, и заставляют возникающие в нем нейтроны проходить через вещество, замедляющее их движение, например через графит или воду. Вероятность попадания такого медленного («теплого») нейтрона в ядро атома урана-235 примерно в 500 раз больше, чем быстрого, поэтому большая часть тепловых нейтронов поглощается не в ядрах урана-238, а в ядрах урана-235 и вызывает их деление. Благодаря таким искусственно замедленным нейтронам в обогащенном уране (за счет урана-235) может происходить цепная реакция. При этом некоторая часть нейтронов, освобождающихся при делении ядер урана-235, поглощается ураном-238, который после ряда ядерных реакций превращается в другой очень ценный химический элемент — плутоний. Атомные ядра плутония, как и ядра урана-235, поглощая нейтроны, расщепляются с выделением ядерной энергии, и потому плутоний тоже является ядерным горючим и может служить для осуществления цепной реакции.

Для получения атомной энергии используется также торий. С этой целью из него искусственно получают другой химический элемент — уран-233, который, подобно урану-235 и плутонию, может служить ядерным горючим.

Начало применению ядерной энергии в мирных целях было положено в Советском Союзе в 1954 г., когда вступила в строй первая в мире атомная электростанция (АЭС) мощностью 5000 кВт, построенная в городе Обнинске под Москвой под руководством выдающегося советского физика академика И. В. Курчатова.

Особенно большое значение имеют АЭС для развития энергетики нашего Крайнего Севера. Такую станцию можно построить в любом месте — вдали от источников топлива и даже воды. Ведь охлаждать атомный реактор можно с помощью жидких металлов (натрия, калия, свинца), которые при этом не расходуются. Почти не расходуется и вода, циркулирующая в контуре паровой турбины. Очень дешево обходится транспортировка ядерного горючего. В самом деле, для работы реактора мощностью 1 млн. кВт, вырабатывающего в год 7 млрд. кВт·ч электроэнергии, требуется всего 30 т слабо обогащенного урана в год. Доставить такое количество топлива в самые отдаленные районы можно без особого труда, даже самолетом.

В настоящее время во всем мире насчитывается более 200 атомных электростанций. Самой мощной в Европе является Ленинградская АЭС. Мощность ее двух атомных реакторов составляет 2 млн. кВт. На ее счету уже многие миллиарды выработанной электрической энергии. Чтобы получить такое же количество энергии на тепловых электростанциях, понадобилось бы ежегодно 11 млн. т угля, т. е. примерно 140 000 вагонов; ядерного же топлива (урана) расходуется всего несколько десятков тонн.

Схема атомной электростанции изображена на рисунке 9. Станция состоит из двух контуров: реактора *A* и турбоэлектрического агрегата *B*. В активной зоне *1* реактора, снабженного

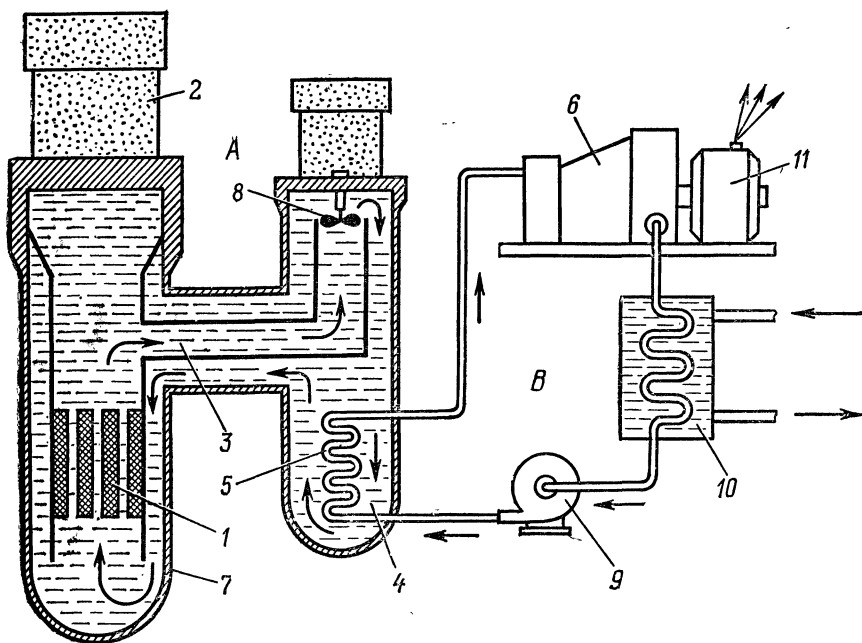


Рис. 9. Схема АЭС на медленных нейтронах.

стальным корпусом 7, расположены блоки из природного урана, обогащенного до 2,5—5 % ураном-235. Здесь происходит цепной процесс деления урана-235, захват нейтронов ураном-238 и превращение его в плутоний. В крышке 2 реактора установлена система стержней из кадмия, регулирующая скорость цепной реакции. Вода 3, циркулирующая через активную зону 1, служит замедлителем и теплоносителем, т. е. она замедляет нейтроны, проходящие через нее из одного блока в другой, и переносит энергию из контура А в контур В. Именно поэтому такие реакторы называются водо-водяными реакторами на медленных нейтронах. Это наиболее распространенный в нашей стране тип реакторов. В реакторе вода нагревается до высокой температуры и, проходя теплообменник 4, превращает в пар высокого давления воду, циркулирующую через змеевик 5 контура В. Этот пар приводит в действие турбину 6, соединенную с электрогенератором 11. Циркуляции воды в контурах способствуют насосы 8 в зоне А и 9 в зоне В.

Как показывают исследования, медленные нейтроны поглощаются не только ураном-238, но и различными примесями, а также замедлителем. В силу этого в реакторе почти весь уран-238 остается неиспользованным.

Захват быстрых нейтронов примесями во много раз меньше, чем поглощение медленных нейтронов. Это позволило ученым создать реакторы на быстрых нейтронах без замедлителя. С помощью подобных реакторов, которые не только расходуют, но и наращивают горючее, можно будет перерабатывать в плутоний и использовать почти весь природный уран.

Схема реактора на быстрых нейтронах показана на рисунке 10. Так как в природном уране цепная реакция на быстрых нейтронах идти не может, в активной зоне 1 реактора используют уран с большим содержанием урана-235 (до 50 % и выше). Образующиеся здесь в результате цепной реакции нейтроны проникают в накопитель 2, окружающий активную зону и состоящий из урана-238. Последний поглощает нейтроны и постепенно превращается в новое ядерное горючее — плутоний, масса которого может в 1,5—2 раза превышать массу «сгоревшего» урана-235.

В реакторах на быстрых нейтронах для регулировки цепной реакции нельзя применять стержни из кадмия: это вещество активно поглощает только медленные нейтроны. Поэтому в таких реакторах регулировку производят добавлением в активную зону небольших количеств ядерного горючего.

В качестве теплоносителя 3 в реакторе используют вещества, слабо поглощающие нейтроны, например жидкий натрий или сжатый углекислый газ. Циркуляция теплоносителя через реактор и теплообменник 4 поддерживается насосом 5. Циркулирующая через змеевик 6 теплообменника вода обращается в нем в пар, который вращает паровую турбину.

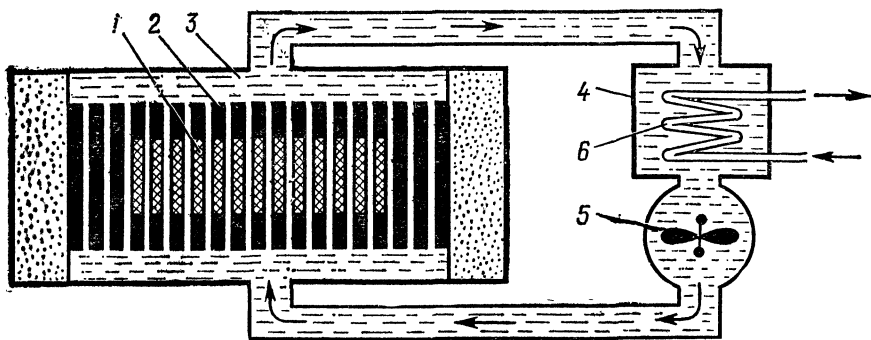


Рис. 10. Схема реактора на быстрых нейтронах.

В недалеком будущем атомные реакторы на быстрых нейтронах, несомненно, получат широкое распространение, что позволит увеличить ресурсы ядерного горючего во много раз.

Задачи

1. Термическая печь имеет КПД 30% и потребляет в час 10 м^3 горючего газа с теплотой сгорания $3,6 \cdot 10^7 \text{ Дж/м}^3$. Найти массу стальных деталей, нагреваемых в печи на 500°C за это время. Удельная теплоемкость стали $0,46 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$.

2. Определить КПД солнечного нагревателя, в котором за 7 ч нагревается 2000 л воды от 15 до 60°C . Нагреваемая поверхность перпендикулярна солнечным лучам и имеет площадь 200 м^2 . Количество энергии, поступающей от Солнца за 1 мин на 1 м^2 поверхности Земли, перпендикулярной солнечным лучам, равно $w = 83 \text{ кДж/(м}^2 \cdot \text{мин)}$.

3. Плотность энергии солнечных лучей, падающих на зеркало солнечной печи, $w = 83 \text{ кДж/(м}^2 \cdot \text{мин)}$. Площади зеркала и фокального пятна, образованного сфокусированными лучами, соответственно равны 10 м^2 и 25 см^2 . Коэффициент отражения зеркала $r = 95\%$. Определить плотность энергии, сконцентрированной в фокальном пятне.

4. Геотермальная электростанция имеет мощность $P = 30\,000 \text{ кВт}$. Какое количество каменного угля она сберегает в сутки, если на обычных тепловых электростанциях в электрическую энергию превращается 20% энергии сожженного топлива? Теплота сгорания каменного угля $3 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$.

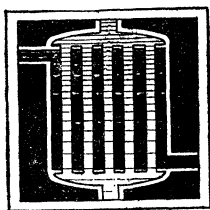
5. Электрогенераторы атомной электростанции имеют мощность $210\,000 \text{ кВт}$, что составляет 27,6% мощности реактора станции. Какое количество урана-235 расходует реактор в сутки, если при делении 1 кг урана-235 выделяется энергия $A = 8,4 \cdot 10^{13} \text{ Дж/кг}$?

Ответы

$$1. m = \frac{\eta V q}{c \Delta t}, m = 470 \text{ кг.} \quad 2. \eta = \frac{\rho V c \Delta T}{w t S}, \eta = 5,4\%. \quad 3. w_1 = r \frac{S_3}{S_{\Pi}} w,$$

$$w_1 = 3,15 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{мин}}. \quad 4. m = \frac{P t}{\eta q}, m = 432 \text{ т.} \quad 5. m = \frac{P t}{\eta A},$$

$$m = 0,78 \text{ кг.}$$



ТЕПЛОБМЕН

Г Л А В А II

§ 1. Виды теплообмена и его регулирование

Передачей теплоты или теплообменом называется переход внутренней энергии от одного тела к другому в результате теплового контакта (соприкосновения) без совершения работы.

Изучение тепловых явлений показывает, что передача теплоты в пространстве осуществляется тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Теплопроводность — один из видов переноса теплоты (энергии теплового движения микрочастиц) от более нагретых частей тела к менее нагретым, приводящий к выравниванию температуры.

Посредством этого вида теплообмена происходит, в частности, передача теплоты через стенку дома в зимнее время. Так как температура внутри дома выше, чем вне его, наиболее интенсивное тепловое колебательное движение совершают частицы, образующие внутреннюю поверхность стенки. Сталкиваясь с частицами соседнего более холодного слоя, они передают им часть энергии, в результате чего движение частиц и этого слоя, оставаясь колебательным, становится более интенсивным. Так от слоя к слою растет интенсивность колебаний частиц, а следовательно, и их внутренняя энергия. Таким образом, при теплопроводности перенос энергии в теле осуществляется в результате непосредственной передачи энергии от частиц (молекул, атомов, электронов), обладающих большей энергией, частицам с меньшей энергией.

С помощью теплопроводности теплота может передаваться в твердых, жидких и газообразных телах. Самой большой теплопроводностью обладают металлы. Это объясняется тем, что переносчиками внутренней энергии здесь, кроме молекул, являются свободные электроны. Хуже проводят тепло дерево, стекло, жи-

вотные и растительные ткани; еще меньшую теплопроводность имеют жидкости (за исключением жидких металлов, например ртути) и газы. Так, воздух в тысячи раз хуже проводит тепло, чем железо.

Конвекция — это такая передача внутренней энергии, которая осуществляется перемещением слоев жидкости или газа от места с более высокой температурой к месту с более низкой температурой. Так, например, если открыть форточку нагретой комнаты, поток выходящего из нее теплого воздуха унесет с собой молекулы с более интенсивным колебательным движением, чем принесет поток входящего холодного воздуха. Следовательно, здесь внутренняя энергия переносится вместе с молекулами, т. е. с веществом.

Конвекция наблюдается только в жидкостях и газах, молекулы которых способны перемещаться на значительные расстояния относительно друг друга.

Конвективное движение происходит обычно под действием архимедовых сил и сил тяжести: от нагревания слой жидкости или газа становится менее плотным и потому всплывает наверх, а его место занимает более холодный и плотный слой. Такая конвекция называется свободной.

В технике движение жидкостей и газов часто осуществляется с помощью насосов и вентиляторов. В этом случае конвекцию называют вынужденной.

Третий широко распространенный в природе вид теплообмена, при котором передача внутренней энергии от одного тела к другому осуществляется посредством электромагнитных волн разных длин, называется излучением. Таким способом, например, энергия Солнца передается через безвоздушное космическое пространство Земле.

В телах, на которые падают солнечные лучи, происходит превращение энергии излучения во внутреннюю энергию, благодаря чему эти тела нагреваются.

Свойством испускать тепловые электромагнитные волны обладает не только Солнце, но и все окружающие нас тела. Они непрерывно обмениваются энергией, излучая и одновременно поглощая ее. Если поглощенная телом энергия больше потерянной им энергии, тело нагревается, если меньше — охлаждается; если тело излучает и поглощает одинаковое количество энергии, его температура остается неизменной.

Наиболее часто нагревание и охлаждение тел происходит посредством всех трех видов теплопередачи или двух из них. Так, например, передача внутренней энергии раскаленных газов топке в воде, циркулирующей в трубах парового котла, осуществляется главным образом посредством излучения. В момент соприкосновения топочных газов с трубами теплота передается с помощью теплопроводности, а поскольку эти газы в топке перемещаются, то и конвекцией.

Теплообмен играет исключительно важную роль в различных областях техники. В одних случаях он используется для нагревания материалов в технологических процессах — выплавке металлов, варке стали, обжиге кирпича, сушке древесины и др.; в других — для охлаждения доменных, мартеновских и медеплавильных печей, камер сгорания и лопаток реактивных и газотурбинных двигателей, что предохраняет их от перегрева и разрушения. Охлаждению, например, подвергаются металлические детали после отливки или механической обработки, газы при их сжижении.

В ряде случаев теплообмен между телами является нежелательным, и тогда его стараются затруднить. Так, например, чтобы избежать охлаждения и конденсации пара в цилиндре паровой машины, последний окружают теплоизолирующим слоем («рубашкой»).

Регулирование теплообмена является одной из основных задач строительной техники. В холодное время года теплота теряется помещением в силу теплопроводности стен и просачивания через них воздуха, уходит вместе с нагретым воздухом через вентиляционные каналы и щели. Чтобы температура в жилых и производственных помещениях соответствовала нормальным условиям жизни и деятельности человека, необходимо уменьшить эти потери. С этой целью стены домов делают из материалов с малой теплопроводностью — естественных (дерева, камыша, различных видов торфа, пемзы, пробки) или искусственных (кирпича, бетона, пенопласта и др.). Теплоизолирующие свойства этих материалов различны (рис. 11).

Широкое распространение в настоящее время получили каркасные здания, на постройку которых требуется гораздо меньше материалов, чем для зданий других типов. Основу каркасного здания составляет металлический или железобетонный каркас, играющий в здании ту же роль, которую выполняет скелет в организме животных: воспринимает нагрузку. На каркасе укрепляют стены из теплоизолирующих пористых материалов. Поры таких материалов заполнены воздухом, поэтому они имеют сравнительно небольшой вес и плохо проводят тепло, так как теплопроводность воздуха очень мала, а конвекция воздуха в пористых материалах невозможна.

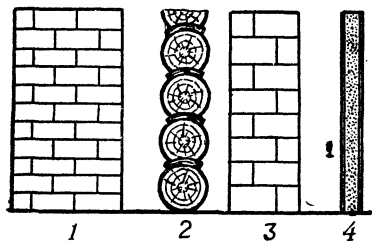


Рис. 11. Сравнительная толщина стен с одинаковой теплозащитой: 1 — кирпич; 2 — дерево; 3 — специальный «теплый» бетон; 4 — пробка.

При изготовлении теплоизоляционных материалов в заготовленную массу вводят пузырьки воздуха. Для этого ее взбивают или добавляют специальную пену либо вещества, которые, вступая в химическую реакцию с заготовленной смесью, выделяют пузырьки газа.

Некоторые пористые теплоизоляционные строительные материалы изготавливают термическим способом. Например, при производстве пеностекла стеклянный порошок смешивают с небольшим количеством размельченного известняка, засыпают в металлические формы и нагревают. При температуре 550—600 °С стеклянный порошок расплавляется, образуя сплошную массу. Когда температура достигает 750—780 °С, начинается разложение известняка, из которого выделяются газы. Вспучивая расплавленную массу, они придают ей пористость. После застывания образуется материал, сохраняющий все свойства обычного стекла: негорючесть, стойкость по отношению к влаге и кислотам и т. д. В то же время этот материал обладает новыми замечательными качествами: он прочен, легко поддается обработке — пилится, строгается, не трескается, когда в него забивают гвозди.

Использование теплоизоляционных материалов в промышленном и гражданском строительстве не только удешевляет, но и увеличивает полезную площадь помещений, повышает их огнестойкость и звуконепроницаемость.

Изоляция от нагревания — это одна из важных задач, которые приходится решать при постройке зданий в зоне вечной мерзлоты. Первые каменные дома, возводимые на вечной мерзлоте, через год-два разрушались сами собой без видимых причин. Понадобилось время, чтобы выяснить причину таких аварий. Оказалось, что твердая как камень зимой земля в летнее время под действием солнечных лучей и теплоты самого жилья оттаивает и размягчается до глубины 1,5—2 м. В этом разжиженном слое постройка начинает «тонуть», дает неравномерную осадку, стены трескаются и разрушаются.

После долгих и трудных исследований инженеры северного города Норильска нашли выход — стали строить здания на сваях.

Постройка начинается с бурения в мерзлой земле скважин диаметром около 50 см и глубиной 11—17 м. В готовую скважину на ее треть наливают теплый песчано-глинистый раствор и опускают в него железобетонную сваю длиной 12—18 м. Тяжелая свая выдавливает раствор до самого верха скважины. Он обволакивает сваю и через некоторое время замерзает. На таких крепко-накрепко вмёрзших в грунт сваях возводят здание, для 5-этажного дома их нужно от 120 до 180 штук.

Покоящийся на сваях дом не касается земли (рис. 12), солнечные лучи не проникают в его основание, воздух изолирует почву под домом от теплоты самого жилья, а ветер проветривает и охлаждает ее. В результате температура верхнего слоя грунта под зданием не превышает 2 °С, а у основания свай он никогда не оттаивает. В настоящее время в Советском Союзе на вечной мерзлоте построены электростанции и горно-обогатительные комбинаты, рудники и шахты. Крупные города нашего Севера (такие, как Норильск и Якутск) с возведенными на вечной мерзлоте

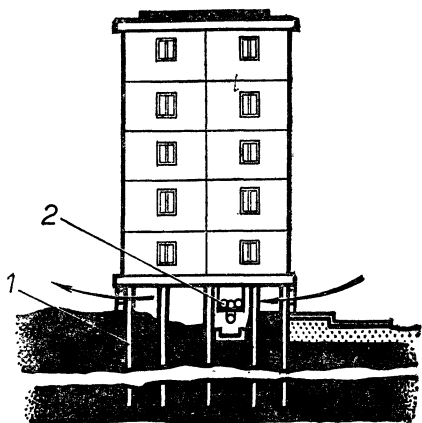


Рис. 12. В зоне вечной мерзлоты дома строят на сваях:

1 — сваи; 2 — водопровод, газ и канализация.

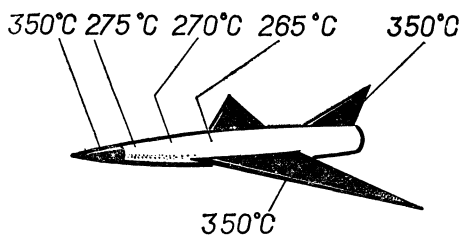


Рис. 13. Распределение температур по обшивке летящего самолета.

летящего со скоростью 3200 км/ч на высоте 15 км. При таких высоких температурах плавится органическое стекло, защищающее кабину летчика от потока воздуха, а при скорости 4000 км/ч плавится и дюралюминий — широко распространенный в самолетостроении материал. Поэтому у скоростных самолетов обшивку и детали, подвергающиеся действию высоких температур, делают не из дюралюминия, а из стали или высокопрочных сплавов титана. Кроме того, внутреннюю поверхность обшивки охлаждают воздухом, жидким топливом или водой.

Опасен разогрев космического корабля, когда он, приземляясь, входит в плотные слои атмосферы со скоростью около 8 км/с. При этом температура воздуха, омывающего корабль, доходит до 7000 °С. Наиболее распространенный способ тепловой защиты спутников и космических кораблей состоит в том, что их обшивка покрывается слоем материала, который от нагревания оплавления

многоэтажными благоустроенными домами почти ничем не отличаются от горбов южных широт.

Потребность в отводе теплоты возникает при обработке металлов резанием. Главным источником теплоты является здесь место соприкосновения стружки с резцом, так как именно в этом месте работа силы трения идет на нагревание резца и обрабатываемой детали, причем их температура может превысить 1000 °С. Чтобы предохранить резец и изделие от разрушения, их охлаждают, непрерывно поливая эмульсией — смесью воды (имеющей большую удельную теплоемкость) с небольшим количеством мыла, керосина и других смазывающих и уменьшающих трение веществ.

Трение о воздух является причиной нагревания движущихся в нем самолетов и космических кораблей. На рисунке 13 показано распределение температур по обшивке скоростного самолета,

ется (например, стекловидный материал пирекс) или испаряется, но не плавится (графит, нафталин, тефлон). Это уменьшает приток к оболочке внутренней энергии, часть которой расходуется на оплавление и испарение.

Охлаждение ракетных двигателей осуществляется с помощью конвекции жидкого горючего или жидкого окислителя, которые в них используются. Во время работы двигателя (рис. 14) в его камеру сгорания 1 непрерывно впрыскивается горючее и вещество, богатое кислородом, — окислитель. Соединяясь с кислородом окислителя, горючее сгорает, а образовавшиеся при этом газы с большой скоростью выходят через сопло 2, создавая реактивную тягу.

При горении развивается температура 3000—4000 °С. Под действием столь высокой температуры все материалы не только теряют свою прочность и плавятся, но даже могут кипеть. Поэтому стенки камеры сгорания и сопла необходимо защищать от струи горячего газа и охлаждать, чтобы они не разрушались. Для уменьшения притока теплоты к стенкам камеры сгорания и сопла и снижения температуры их внутреннюю поверхность покрывают тугоплавкими материалами (керамикой, графитом, карбидами металлов). С этой же целью через «рубашку» 3 двигателя пропускают горючее, попадающее в «рубашку» по трубопроводу 4 (или окислитель, идущий по трубопроводу 5), которое, прежде чем попасть в камеру сгорания, охлаждает его стенки. Благодаря этому охлаждаемый двигатель может работать в течение десятков минут.

Значительно труднее, чем жидкостные ракетные двигатели, охлаждать двигатели, работающие на твердом топливе. В этом двигателе весь заряд твердого топлива располагается в камере сгорания. Для защиты ее стенок от прогорания заряду топлива придают такую форму, чтобы он сам затруднял передачу тепла к стенкам камеры сгорания. Например, в двигателе, изображенном на рисунке 15, твердое топливо имеет форму полого цилиндра. При работе двигателя топливо 1 горит только по своей внут-

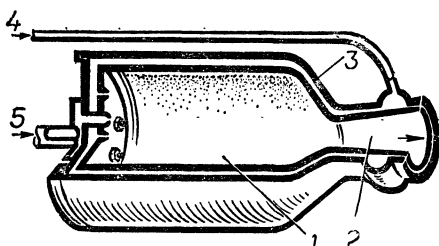


Рис. 14. Схематическое изображение разреза жидкостного реактивного двигателя.

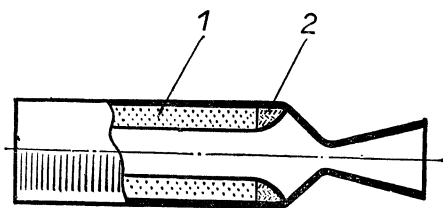


Рис. 15. Схематическое изображение ракетного двигателя на твердом топливе:

1 — основной заряд топлива; 2 — топливо с низкой температурой горения.

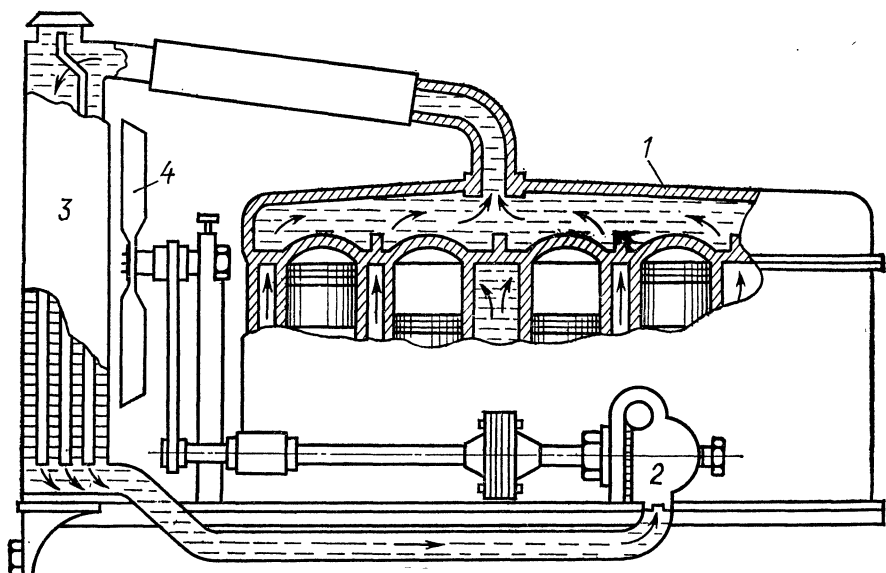


Рис. 16. Схема жидкостного охлаждения автомобильного двигателя. ренной поверхности, благодаря чему стенки камеры ограждаются от действия горячих газов слоем топлива.

Обладая большой теплоемкостью, вода является наиболее подходящим теплоносителем для охлаждения автомобильных двигателей внутреннего сгорания (рис. 16). При сгорании топлива в цилиндре такого двигателя развивается температура до 1000°C . Цилиндры двигателя имеют металлическую оболочку — «рубашку» 1, через которую насос 2 непрерывно прогоняет воду. Из рубашки вода поступает в радиатор 3, представляющий собой теплообменник, состоящий из системы трубок, в которых вода передает полученную от двигателя теплоту окружающему воздуху. Для этого служит и вентилятор 4.

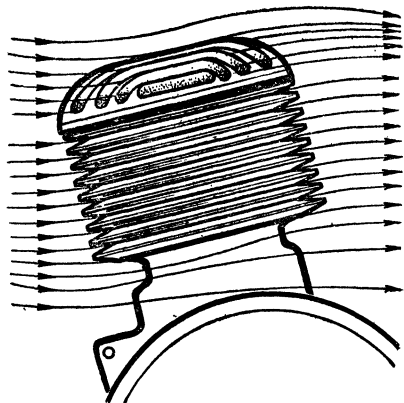


Рис. 17. Схема воздушного охлаждения цилиндра двигателя.

Двигатели мотоциклов обычно имеют воздушное охлаждение. Для охлаждения цилиндр двигателя снабжают ребрами (рис. 17). При движении мотоцикла поток наружного воздуха обдувает ребра и отбирает энергию с их поверхности. Благодаря ребрам, которые увеличивают поверхность цилиндра, его теплоотдача возрастает в 5—6 раз.

§ 2. Котельные агрегаты и тепловые установки

Для получения пара в современных паросиловых установках применяются котельные агрегаты. Такой агрегат состоит из котла и топки. В топке сжигается топливо, а выделяющаяся при этом энергия передается через стенки котла воде и пару.

Различают три основных вида топок: слоевую, факельную и вихревую.

Слоевая топка (рис. 18, а) пригодна для сжигания крупнокускового топлива. Дрова, уголь или торф помещают на колосниковую решетку топки и постепенно сжигают. Слоевая топка имеет простое устройство, действует безотказно, в ней можно сжигать низкосортное топливо. Поэтому ее широко используют в отопительных печах, а в прежнее время устанавливали на паровозах и пароходах. Однако она имеет низкий КПД и почти не допускает механизации при загрузке в нее топлива.

В большинстве современных крупных энергетических паросиловых установок применяют более экономичные факельные топки (рис. 18, б). В такую топку топливо вводится в распыленном или газообразном состоянии, и оно, попадая в газоздушный поток, сгорает в нем, образуя гигантский факел пламени, в центре которого температура достигает 1500°C .

Самой экономичной, однако, является вихревая, или циклонная, топка (рис. 18, в). В топку, имеющую шарообразную форму, нагнетается воздух и подается распыленное топливо. Струи воздуха сообщают ему вращательное движение, и оно сгорает во взвешенном состоянии. Несгоревшие частицы топлива увлекаются газовым вихрем к стенкам топки и остаются в ней до тех пор, пока полностью не сгорают. В центре топки имеется отверстие, через которое уходят продукты сгорания. Подача топлива в факельные и вихревые топки механизирована.

Чтобы сжигание топлива в топке любого вида было экономичным, необходимо обеспечить в ней хорошую тягу. Тяга не должна быть слишком малой (так как в этом случае для горения не хватит кислорода) и слишком сильной (лишний воздух снизит температуру горения). В бытовых отопительных печах тягу в топке создают трубами; в современных промышленных топках тяга регулируется не трубами, а вентиляторами и даже компрессорами.

Большие котельные установки потребляют в час до 25—50 т мелкой угольной пыли, которая вдвухается в топку и, смешиваясь с воздухом, сгорает на лету. Чтобы пыль успела полностью сгореть, она должна пройти

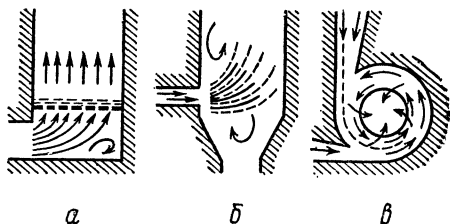


Рис. 18. Виды топок:
а) слоевая; б) факельная; в) вихревая.

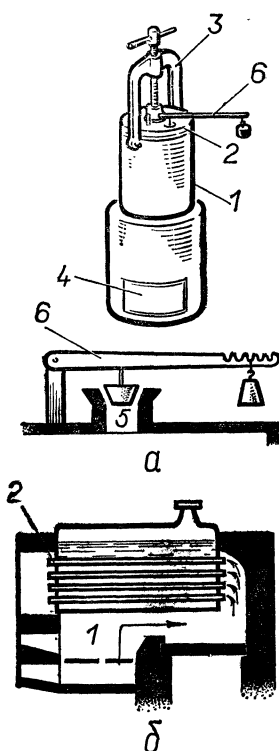


Рис. 19. Виды котлов:
 а) котел Папена; б) котел
 с дымогарными трубами.

длительный путь. Поэтому высота современных топок иногда превышает 20 м, т. е. достигает высоты 4—5-этажного дома; площадь основания топок нередко составляет 80—100 м².

Первый паровой котел, получивший практическое применение, был изобретен французским ученым Дени Папеном в 1680 г. Котел (рис. 19, а) представлял собой вертикально установленный барабан, т. е. цилиндр 1, с плоским дном и массивной крышкой 2, прикрепляемой к нему натяжной скобой 3. Под котлом была расположена топка 4. Котел имел предохранительный клапан 5, который тоже был изобретен Папеном и используется до наших дней. Клапан, запирающий выходное отверстие котла, расположен между точкой опоры рычага б и подвешенным к нему грузом. Когда давление пара достигает опасного предела, пар, преодолев сопротивление груза, поднимает клапан, выходит из котла и давление в котле понижается до нормы.

На протяжении XVIII—XX вв. конструкция паровых котлов постепенно изменялась. Один из путей усовершенствования и повышения экономичности котлов состоял в том, что к торцам котельного барабана прикрепляли трубы, «омываемые» снаружи водой. Так возникли котлы с дымогарными трубами (рис. 19, б). Топка 1 у этих котлов помещается под котлом, а продукты горения (горячие газы), выйдя из топки, сначала скользят по нижней части котла, потом проходят через дымогарные трубы 2, затем по сторонам котла и, наконец, выходят в дымовую трубу. Подобными котлами снабжали пароходы, паровозы и локомотивы.

Большое распространение в современной технике благодаря своим достоинствам получили водотрубные котлы (рис. 20). В этих котлах вода циркулирует по системе, состоящей из большого количества изогнутых трубок 1—2, концы которых присоединены к цилиндрическим барабанам 3 и 4. Вода, питающая котел, поступает в него через трубу 5, трубы 1—2 омываются снаружи горячими газами. Пучок труб 1 расположен в топочной камере б, вода в них кипит и частично превращается в пар, образуя пароводяную смесь. Пучок труб 2 находится вне топки, поэтому вода в них холоднее и имеет большую плотность, чем в трубе 1. Благодаря разности гидростатических давлений в обоих

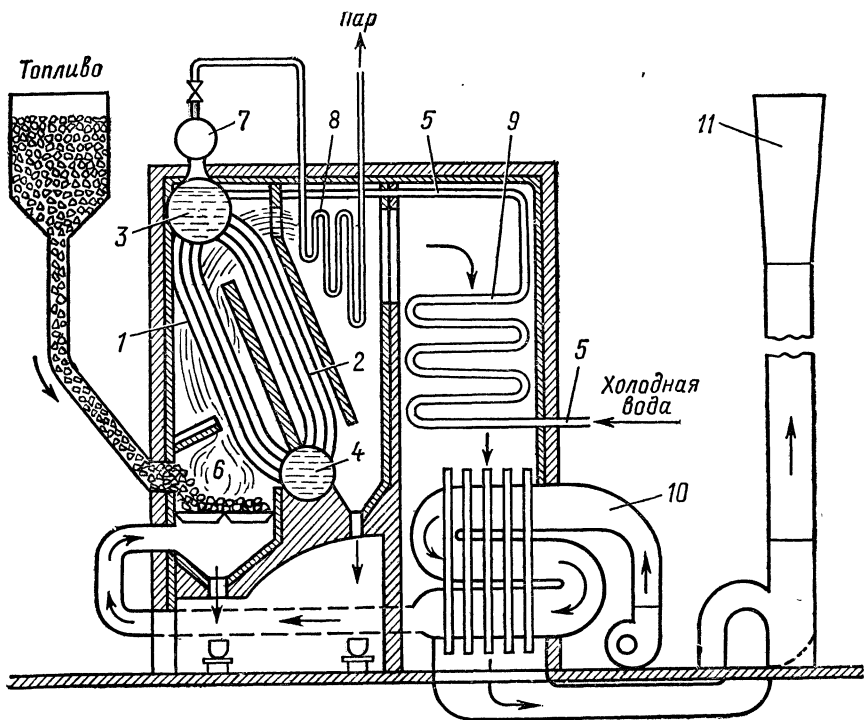


Рис. 20. Схема парогенератора.

пучках труб пароводяная смесь, заполняющая трубы 1, поднимается к верхнему барабану 3, а вода в трубах 2 опускается вниз и через нижний барабан 4 попадает в кипяtilьные трубы 1. Возникает очень интенсивная естественная циркуляция воды по замкнутому кругу 1—3—2—4—1. Пар, поступающий в барабан 3, через сухопарник 7 идет в паровую машину или паровую турбину.

С помощью ряда устройств в водотрубном котле достаточно полно используется внутренняя энергия продуктов горения: выйдя из топки 6, продукты горения проходят через пароперегреватель 8, подогреватель (экономайзер) воды 9, подогреватель воздуха 10 и выходят в трубу 11, имея сравнительно небольшую температуру (150—200 °С).

В экономайзере 9 подогревается вода, прежде чем попасть в котел. Очевидно, чем выше температура этой воды, тем меньше топлива потребуется для обращения ее в пар. В подобном же устройстве происходит подогревание воздуха, поступающего в топку, которое улучшает процесс горения.

В пароперегревателе 8 поступающий из барабана 3 насыщенный пар превращается в перегретый. Благодаря всем этим

устройствам в паровом котле используется до 85—90 % химической энергии топлива, а дымовые газы уносят в атмосферу лишь небольшое количество теплоты.

По своим достоинствам водотрубные котлы превосходят котлы других типов, имеющих такую же поверхность нагрева: они экономичнее, дают гораздо больше пара, занимают меньше места, требуют для своего изготовления меньше металла. Изогнутые кипяtilьные трубы упруги, благодаря чему при расширении котла от нагревания они гнутся, но не ломаются.

Наиболее совершенными и экономичными в настоящее время являются прямоточные котлы системы проф. Л. К. Рамзина, впервые построенные в Советском Союзе в 1931 г.

Основой конструкции прямоточного котла (рис. 21) является большой трубчатый змеевик, винтообразно расположенный по внутренним стенкам топки. Отдельные части этого змеевика в процессе получения пара играют различную роль.

Котел действует следующим образом. В топку через форсунку 1 (см. рис. 21) вводится жидкое топливо. Поток раскаленных продуктов сгорания омывает последовательно кипяtilьные трубки 2, пароперегреватель 3, экономайзер 4, воздухонагреватель 5 и выходит в дымовую трубу 6. Питательный насос 7 под большим давлением нагнетает воду в экономайзер 4, где она нагревается до кипения и затем попадает в кипяtilьные трубки 2. Здесь она закипает и превращается в пар, который через пароподогреватель 3 направляется в паровую турбину.

Таким образом, в прямоточном котле в отличие от водотрубных котлов нет естественной циркуляции воды. Движение воды осуществляется «принудительно» с помощью насоса: вода накачивается в систему труб с одного конца и выходит из другого в виде перегретого пара.

Прямоточные котлы лишены барабанов и потому сравнительно просты по устройству и дешевы.

Высота большого прямоточного парового котла достигает 35 м, в сутки он сжигает 40—50 вагонов каменного угля, его обслуживание механизировано. Из вагонов топливо поступает в бункера, а из них посредством непрерывно движущейся ленты конвейера подается к котельной топке и автоматически в нее загружается. Тяжелая работа по очистке топки от золы и шлаков и их транспортирование тоже про-

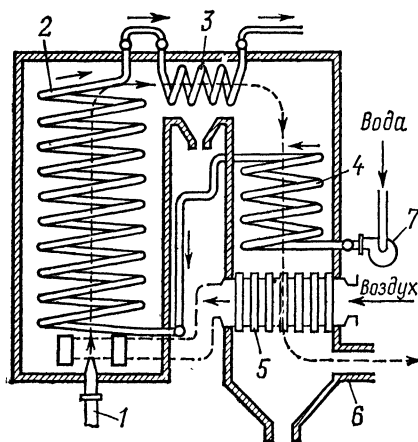


Рис. 21. Схема прямоточного котла.

изводится почти без участия человека: шлак и зола смываются из сборников и сильной струей воды передаются по трубам на большое расстояние.

Давление перегретого пара в современных котлах доводится до $2,5 \cdot 10^7$ Па при температуре перегрева 600°C , а паропроизводительность — до 500 т/ч. Для сравнения укажем, что в начале нашего века в энергетике использовались котлы с паропроизводительностью 10 т/ч, вырабатывавшие пар давлением $1,2 \cdot 10^6$ Па.

Каждая крупная паросиловая установка снабжается охлаждающим устройством (рис. 22), главными частями которого являются конденсатор 1 и охлаждающая башня (градирня) 2. Конденсатор — это большая камера, между плоскими торцевыми поверхностями которой укреплено несколько тысяч латунных трубок. По трубкам проходит холодная вода, нагнетаемая в конденсатор по трубе 3 насосом 4 из бассейна 5. В пространство между трубками поступает отработанный пар из турбины 6 и, охлаждаясь, конденсируется, что повышает ее КПД. Полученный конденсат из конденсатора с помощью насоса 7 нагнетается в сборный бак 8. Поступающая в латунные трубки конденсатора вода нагревается паром и выходит наружу через трубу 9.

Для конденсации 1 кг пара расходуется около 60 кг охлажденной воды. Поэтому количество воды, потребляемой конденсаторами крупных турбин, очень велико. Например, чтобы успевал конденсироваться весь пар, отработанный в турбине мощностью 100 тыс. кВт, необходимо через конденсатор пропускать $20\,000\text{ м}^3$ воды в час. Это целая речка шириной 8 м, глубиной 1 м, со скоростью течения 3 км/ч. Поэтому, хотя устройство конденсатора несложно, его размеры и вес велики. Так, для турбины мощ-

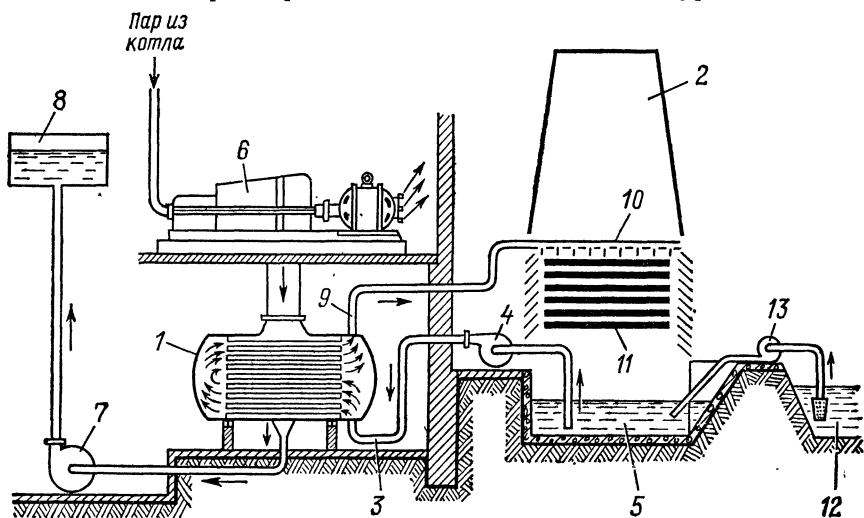


Рис. 22. Охлаждающая система паросиловой установки.

ностью 50 тыс. кВт приходится ставить конденсатор весом 500 кН, длиной 8 м, с поперечником 4 м. В таком конденсаторе установлено 6000 трубок общей длиной 38 км, охлаждающая поверхность всех трубок достигает 6 тыс. м², т. е. почти $\frac{2}{3}$ га.

Если вблизи паротурбинной установки нет больших водоемов, применяют искусственное охлаждение воды с помощью градирни 2 (см. рис. 22). Поступая по трубе 9 из конденсатора в градирню, теплая вода вытекает множеством мельчайших струек из отверстий системы труб 10, падает на распределитель 11, состоящий из большого числа тонких планок, и, разбившись на капли, стекает в бассейн 5. Охлаждение воды происходит главным образом за счет ее испарения при соприкосновении с воздухом; образовавшиеся водяные пары удаляются вытяжной башней. Убыль циркулирующей воды, вызываемая ее частичным испарением, восполняется из бассейна 12 насосом 13.

Задачи

1. Какие виды передачи теплоты возможны внутри космического корабля-спутника, обращающегося вокруг Земли по круговой орбите и заполненного воздухом?

2. В паровой котел, в котором находится 20 м³ воды при температуре 150 °С, с помощью насоса добавляется 2 м³ воды при температуре 10 °С. Сколько надо сжечь угля, чтобы температура поднялась до прежнего значения? КПД топки 75 %. Теплота сгорания угля $3 \cdot 10^7$ Дж/кг.

3. При нагревании в котле 6 м³ воды сожгли 80 кг каменного угля. До какой температуры нагреется вода в котле, если КПД топки 60 %, а начальная температура воды 10 °С?

4. Испытание паровых котлов на прочность производят водой, накачиваемой под большим давлением. Почему избегают производить пробу котла паром?

5. Какое количество пара при температуре 100 °С сконденсировалось в конденсаторе за 1 ч, если за это время через него прошло 30 000 м³ воды, причем эта вода нагрелась на 15 °С?

Ответы

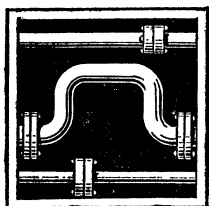
1. Из-за невесомости естественная циркуляция воздуха почти не происходит. Если нет и принудительного перемешивания воздуха, то возможна только теплопроводность и излучение.

$$2. m = \frac{V\rho c\Delta t}{\eta q}, \text{ где } \Delta t = 13 \text{ }^\circ\text{C}, m = 53 \text{ кг.}$$

$$3. t_1 = t + \frac{\eta q m}{V\rho c\eta}, t_1 \approx 67,1 \text{ }^\circ\text{C.}$$

4. При разрыве котла во время пробы гидравлическим способом сжатая в нем вода увеличит свой объем очень мало. Сжатый же пар, вырываясь из котла в процессе сильного расширения, может произвести огромные разрушения.

$$5. m = \frac{\rho V c \Delta t}{L}, m \approx 836 \text{ т.}$$



РАСШИРЕНИЕ ТЕЛ ОТ НАГРЕВАНИЯ

Г Л А В А III

§ 1. Учет и использование теплового расширения

Когда тело нагревается или охлаждается, его размеры изменяются: в первом случае они, за редким исключением, увеличиваются, во втором — уменьшаются. Если обозначить через l_0 начальную длину тела, а через V_0 его начальный объем, то конечную длину тела l и конечный объем V находят по формулам *

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta t), \quad (1)$$

$$V = V_0 (1 + \beta \Delta t), \quad (2)$$

где α и β — соответственно температурные коэффициенты линейного и объемного расширения, а Δt — изменение температуры тела.

В телах, закрепленных неподвижно, например в деталях машин или зданий, подвергающихся сильному нагреванию или охлаждению, из-за теплового расширения или сжатия возникают большие внутренние напряжения, которые могут привести к разрушению самих тел или удерживающих тел.

Рассчитаем для примера значение внутренних напряжений, возникающих при нагревании балки. Если свободно лежащую на опорах балку длиной l_0 нагреть на Δt , то она удлинится на Δl , и, как это следует из формулы (1), это удлинение будет равно:

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta t, \quad (3)$$

где α — коэффициент линейного расширения материала балки. Если же балка неподвижно закреплена между двумя стенками, то при нагревании ее длина остается неизменной. Это значит, что стенки сжимают балку с силами, достаточными для того, чтобы

* См.: [2]. Гл VII, § 36.

она укоротилась на Δl . Модуль каждой из этих двух сил, действующих на концы балки, можно найти по закону Гука:

$$F = E \frac{|\Delta l| S}{l_0}, \quad (4)^*$$

где S — площадь поперечного сечения балки, E — коэффициент упругости, зависящий от материала балки и называемый модулем Юнга. Учитывая формулу (3), получим:

$$F = E\alpha\Delta t.$$

Согласно третьему закону Ньютона нагретая балка с такими же силами действует на стенки, стремясь их опрокинуть.

Как велики силы теплового расширения и сжатия, показывает следующий пример. При реставрации одного старинного замка наклонившуюся массивную каменную стену здания выпрямили таким способом. Ее соединили с противоположной стеной 60-ю стальными стержнями с площадью поперечного сечения по 50 см^2 . На каждом конце стержни имели винтовую нарезку и гайку. Сначала стержни нагрели до 320°C с помощью жаровен с горящим углем. Затем туго закрутили гайки, после чего жаровни убрали. Остывая до температуры окружающего воздуха (20°C), стержни укоротились и поставили стену прямо. Вычислим силу, с которой стержни действовали при этом на стену. Учитывая, что для стали $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ и $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, получаем:

$$F = E\alpha S n \Delta t, \quad F = 2 \cdot 10^{11} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot 60 \times \\ \times 3 \cdot 10^2 \text{ }^\circ\text{C} = 2,16 \cdot 10^8 \text{ Н}, \\ F \approx 216\,000 \text{ кН}.$$

Чтобы избежать вредного действия теплового расширения тел, используют разные способы. Так, например, при постройке железнодорожных путей, которые подвергаются сезонным изменениям температуры, между рельсами, чтобы не допустить их искривления, оставляют зазоры (рис. 23, а). Кроме того, в стальных накладках, скрепляющих рельсы, отверстия делают не круглыми, а овальными. Благодаря этому накладки не мешают рельсам расширяться, так как при этом болты скользят по накладкам.

В отличие от железнодорожных рельсов, которые закрепляются на деревянных шпалах, плохо проводящих тепло, трамвайные рельсы укладывают в глубь мостовой. Земля, служащая тепловым аккумулятором, обменивается теплотой с рельсами и уменьшает их температурные колебания. Поэтому стыки трамвайных рельсов сваривают, а зазоры оставляют только через 100 м.

* См.: [2]. Гл. VI, § 33.

Значительным температурным колебаниям подвергаются трубы паропроводов. Во избежание разрывов им придают форму петель (компенсаторов) или снабжают подвижными муфтами (рис. 23, б). При термическом расширении труба в первом случае пружинит и изгибается, во втором скользит по муфте, не разрываясь. С этой же целью трубы газопроводов укладывают не по прямой, а по волнистой линии на глубине не менее 2 м.

Вредное влияние теплового расширения приходится учитывать и при постройке мостов, плотин, металлургических печей и других сооружений. Строя мостовую ферму на береговом устое, закрепляют наглухо только один ее конец (рис. 23, в), а другой устанавливают с помощью шарнира 1 на подвижной опоре, которая помещается на стальных катках 2. Вследствие этого при тепловом расширении ферма свободно передвигается на катках, не расшатывая и не повреждая береговые устои.

Сооружая большие мосты и плотины, также стремятся ослабить разрушительное действие теплового расширения. Для этого в них устраивают «термические швы» — узкие прослойки из пластичного материала, например асфальта, допускающие расширение постройки при ее нагревании.

Большие опасные внутренние напряжения возникают и в случае неравномерного нагревания тела, когда между его внешней и внутренней поверхностью создается резкая разность температур. По этой причине во избежание появления трещин в стенках паровых котлов согласно правилам техники безопасности запрещается промывать неостывшие котлы холодной водой.

Учитывают влияние теплового расширения и при изготовлении двигателей внутреннего сгорания. Так, диаметр поршня в верхней его части, где при взрыве горючей смеси развивается очень высокая температура, делают немного меньше, чем в нижней части, а между алюминиевым поршнем и чугунной гильзой

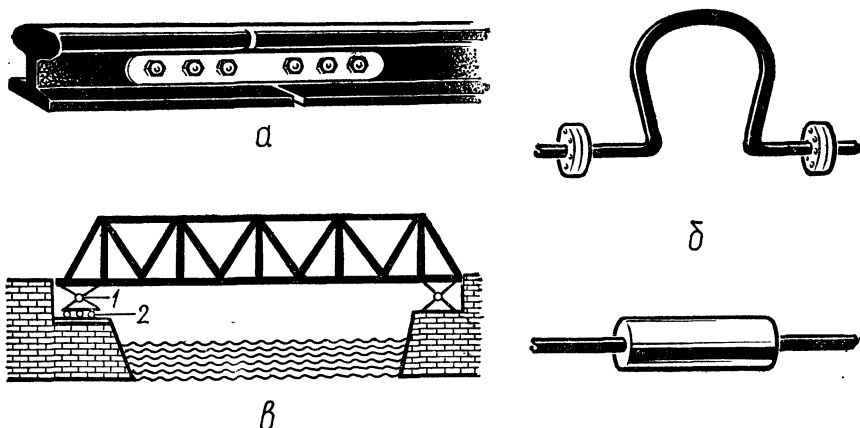


Рис. 23. Способы уменьшения вредного действия теплового расширения.

цилиндра в расчете на тепловое расширение поршня оставляют небольшой зазор.

Если материал имеет малый температурный коэффициент расширения, то при его нагревании и охлаждении в нем возникают небольшие растягивающие усилия и он легко переносит резкие изменения температуры. К таким материалам относятся теплостойкие и жаростойкие стекла. Нагретое обыкновенное стекло растрескивается при внезапном охлаждении на $60\text{--}70\text{ }^\circ\text{C}$. Жаростойкое стекло выдерживает резкие смены температуры на $200\text{ }^\circ\text{C}$ и более, а сделанные из него предметы и аппараты можно нагревать прямо на огне и быстро охлаждать без опасения повредить. Из жаростойкого стекла делают баллоны мощных электроламп, которые нагреваются до $150\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$ и не разрушаются при попадании на них дождя и снега, трубы для химической промышленности, лабораторные приборы и посуду, а также сковородки и кастрюли для домашнего обихода.

Большую роль играют в технике материалы с одинаковым температурным коэффициентом расширения. Так, например, в строительном деле широко используют железобетон, представляющий собой бетонную массу с заложенной в нее системой стальных стержней (арматурой). И сталь, и бетон имеют одинаковые температурные коэффициенты линейного расширения, благодаря чему при нагревании и охлаждении арматура не отслаивается от бетона и вредных напряжений в железобетоне не возникает. По такой же причине эмаль, покрывающая железную посуду, при варке пищи не отслаивается и не растрескивается.

Наряду с предупреждением вредных последствий теплового расширения, его используют для многих полезных целей. К таким случаям относится горячая посадка бандажей (ободьев) на вагонные колеса. Диаметр бандажей 1 делают немного меньше диаметра корпуса колеса 2 (рис. 24). Перед посадкой бандаж нагревают до высокой температуры, отчего он расширяется, и плотно надевают на колесо. При остывании бандаж сжимается и плотно охватывает корпус колеса, образуя с ним одно целое.

В клепальных работах заклепки тоже ставят в горячем состоянии. При остывании они укорачиваются и плотно стягивают металлические листы, образуя непроницаемый шов.

Тепловое расширение используют при термическом бурении горных пород. Для этого в забой скважины направляют поток раскаленных до $2500\text{ }^\circ\text{C}$ газов, которые вырываются из сопла специальной горелки со сверхзвуковой скоростью 2000 м/с . Эта огневая струя вызывает быстрое и неравномерное нагревание породы, ее растрескивание и скалывание. Некоторые горные породы

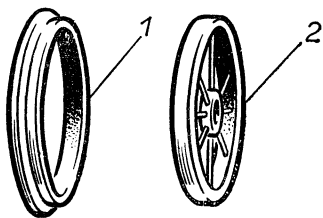


Рис. 24. Горячая посадка бандажа на вагонное колесо.

под действием пламенной струи плавятся. Горелки для термического бурения работают под давлением около $3 \cdot 10^6$ Па и расходуют большое количество керосина, кислорода и воды, которые поступают к горелкам по трубам. Несмотря на это, применение горелок для термического бурения в ряде случаев оказывается выгодным.

На тепловом расширении основано действие биметаллов, широко применяемых в автоматике. Биметалл представляет собой ленту, состоящую из двух склепанных, сваренных или спаянных пластинок, которые сделаны из металлов или сплавов с разными температурными коэффициентами расширения. Поэтому при нагревании лента изгибается так, что слой с большим коэффициентом расширения оказывается на выпуклой стороне; при охлаждении изгиб ленты происходит в противоположном направлении.

Биметаллические пластины используются в предохранителях и ограничителях электрического тока. На рисунке 25, а приведена схема такого биметаллического предохранителя, защищающего электрическую сеть от перегрузки или от короткого замыкания. Когда предохранитель включен в электросеть, ток идет от

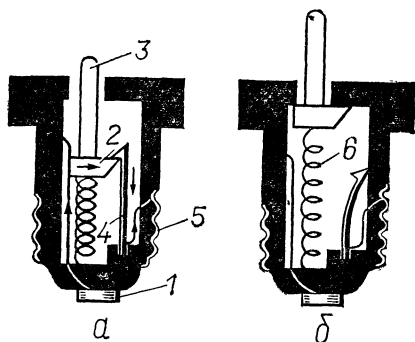


Рис. 25. Схема биметаллического предохранителя тока.

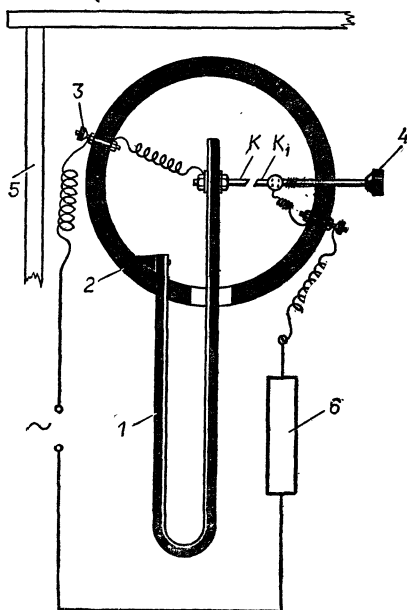


Рис. 26. Схема биметаллического терморегулятора.

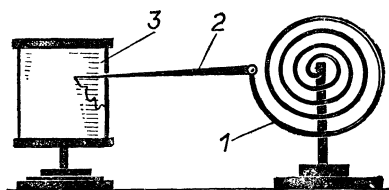


Рис. 27. Схема биметаллического термографа.

контакта 1 через проводящую колодку 2 кнопки 3 и биметаллическую пластину 4 к винтовой нарезке 5. При коротком замыкании ток в цепи резко возрастает, благодаря чему пластина 4 нагревается и изгибается, освобождая колодку 2; пружина 6 отбрасывает кнопку 3 вверх и выключает ток (рис. 25, б), что предохраняет электросеть от пожара.

С помощью биметаллических терморегуляторов поддерживают заданную постоянную температуру в электрических нагревательных приборах — термостатах, сушильных шкафах, инкубаторах, электропечах, электроутюгах и др. Подобный терморегулятор изображен на рисунке 26. Он состоит из изогнутой биметаллической скобы 1, один конец которой прикреплен к корпусу 2 прибора, а другой свободный конец имеет контакт К, электрически изолированный от скобы 1 и соединенный гибким проводником с клеммой 3. Сбоку корпуса 2 имеется регулировочный винт 4 с контактом К₁. Прибор помещают в камеру термостата 5 и включают в электрическую сеть. Винт 4 регулируют так, чтобы при заданной температуре воздуха контакты К и К₁ были замкнуты. Если температура воздуха в термостате повысится, биметаллическая скоба 1 тоже нагреется и изогнется, разомкнув контакты К и К₁ и прервав ток, проходящий через спираль 6 электрического нагревателя. Благодаря этому температура воздуха в термостате снизится до нормы, биметаллическая скоба выпрямится и контакты К и К₁ снова замкнутся.

По такому же принципу действуют биметаллические пожарные сигнализаторы. Если в помещении, где находится сигнализатор, температура воздуха поднимается выше допустимой нормы, биметаллическая пластина нагреется и изогнется, замыкая ток в цепи сигнального звонка, установленного в пожарном депо.

Биметаллическая спираль является главной частью термографа (рис. 27) — прибора для непрерывной регистрации температуры воздуха (воды) в помещении или камере, в которой он установлен. Один конец спирали 1 укреплен в корпусе прибора, а другой скреплен со стрелкой 2, снабженной пером. Конец пера касается разграфленной бумаги, наклеенной на барабан 3, который медленно вращается с помощью часового механизма. При изменении температуры спираль изгибается, перемещая стрелку, а вместе с ней и перо, оставляющее на бумаге кривую, характеризующую изменение температуры за несколько дней или недель.

Биметаллы используются в приборах, зажигающих лампы дневного света, защищающих электродвигатели от перегрева, регулирующих расстояние между угольными электрической дуги, управляющих автоматической загрузкой топок в мощных паросиловых установках и т. д.

§ 2. Расширение и сжатие газов и паров

Тепловые процессы, происходящие в газах и парах, лежат в основе действия тепловых машин. Так, например, расширяющиеся в цилиндре дизеля газообразные продукты сгорания топлива двигают поршень и совершают работу по преодолению действующих на него внешних сил. Изменение внутренней энергии этого газа характеризуется законом сохранения и превращения энергии:

$$\Delta U = A + Q, \quad (1)^*$$

где A — работа внешних сил, действующих на поршень, и Q — количество теплоты, переданной газу. Работа A' самого газа равна работе внешних сил, но имеет противоположный знак:

$$A' = -A. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что

$$A' = -\Delta U + Q, \quad (3)$$

т. е. работа газа совершается за счет убыли его внутренней энергии и подведенной к нему теплоты. Этот вывод, в частности, справедлив для изобарного расширения газа **.

При изотермическом *** расширении газа температура газа, а следовательно, его внутренняя энергия остаются постоянными: $U = \text{const}$, а потому $\Delta U = 0$. Отсюда на основании выражения (3) заключаем, что $A' = Q$, т. е. в этом случае работа газа совершается только за счет подведенного к нему количества теплоты.

Если газ расширяется в цилиндре с теплоизолирующими стенками (т. е. адиабатно), то $Q = 0$, а потому $A' = -\Delta U$. Следовательно, при адиабатном расширении **** работа газа совершается только за счет уменьшения его внутренней энергии, отчего он охлаждается.

К такому же выводу можно прийти на основе молекулярно-кинетической теории. Пусть газ, расширяясь адиабатно в цилиндре, поднимает поршень (рис. 28) и совершает работу.

Обозначим через ω скорость движения поршня, а через v — скорость какой-нибудь молекулы относительно неподвижных стенок цилиндра, догоняющей поршень. Она налетит на поршень со скоростью $v - \omega$ относительно поршня и с такой же по значению, но обратной по направлению скоростью отразится от него. Тогда, по отношению к стенкам цилиндра скорость отраженной молекулы будет равна: $(v - \omega) - \omega = v - 2\omega$. Следовательно, при каждом ударе об отступающий со скоростью ω поршень

* См.: [2]. Гл. IV, § 22.

** См.: [2]. Гл. II, § 9; гл. IV, § 23.

*** См.: [2]. Гл. II, § 8; гл. IV, § 23.

**** См.: [2]. Гл. IV, § 23.

молекула газа потеряет часть своей кинетической энергии, равную:

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{m(v - 2w)^2}{2} \approx 2mvw,$$

где m — масса молекулы.

За счет этой энергии, отдаваемой поршню каждой из ударяющих об него молекул, и совершается работа газа.

Таким образом, расширяясь, газ теряет часть своей внутренней энергии и потому его температура уменьшается, т. е. он охлаждается. Наоборот, при сжатии газа внешними силами за счет работы этих сил внутренняя энергия газа увеличивается и он нагревается.

Если газ, совершив работу, не возвращается к своему начальному состоянию, процесс называется незамкнутым. Таковы все изопроцессы. Незамкнутые процессы используются в тепловых двигателях разового действия, к которым относится огнестрельное оружие, например пушка. Расширяясь в стволе пушки, пороховые газы выталкивают снаряд и рассеиваются в атмосфере. При этом температура, давление и другие параметры этих газов изменяются и уже не принимают начального значения.

Однако расширение газа в тепловой машине не может продолжаться бесконечно долго, так как ствол орудия или цилиндр двигателя нельзя сделать бесконечно длинными. Поэтому и работа, производимая расширяющимся газом, имеет ограниченное значение. В машинах, предназначенных для совершения произвольно большой работы, используют многократно повторяющийся круговой, или замкнутый, процесс (цикл). Так называют процесс, в результате которого рабочее тело (газ или пар), изменяя свое состояние, периодически возвращается в исходное состояние. Поэтому тепловые машины, использующие круговые процессы, называются периодическими.

Рассмотрим условия, которым должен удовлетворять круговой процесс, чтобы тепловая машина работала наиболее экономично.

Пусть находящийся в цилиндре под поршнем газ (рис. 28) расширяется изотермически при температуре T_1 . Графически этот процесс изображается изотермой akb (рис. 29). При расширении газ получает от другого тела (нагревателя)

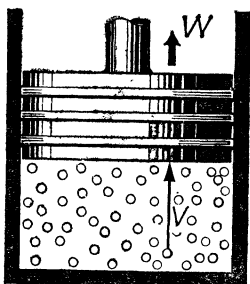


Рис. 28. Расширяясь, газ совершает работу и охлаждается.

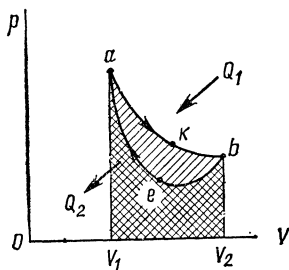


Рис. 29. График кругового процесса.

некоторое количество теплоты Q_1 , за счет которого совершает положительную работу $A_1 = Q_1$. Эта работа численно равна площади S фигуры $akbV_2V_1$ *. Сам газ переходит из состояния a в состояние b . Чтобы процесс стал круговым, надо вернуть газ в прежнее состояние, сжимая его внешней силой, например двигателем. Если сжатие происходит при той же температуре T_1 и графически изображается изотермой bka , то работа внешней силы также будет численно равна площади S фигуры $akbV_1V_2$. Сам же газ при сжатии совершит такую же по абсолютному значению, но отрицательную работу $-A_1$, как и при расширении. Полная работа газа на протяжении всего цикла будет равна нулю $A_1 + (-A_1) = 0$.

Полезная «работа цикла» будет больше нуля только при том условии, если сжатие производится при более низкой температуре T_2 , чем расширение. Подобный процесс графически можно изобразить кривой bea , лежащей ниже изотермы bka . Температура T_2 будет меньше T_1 в том случае, если в процессе сжатия газ отдаст третьему телу, называемому холодильником **, некоторое количество теплоты Q_2 , равное работе A_2 , которую совершила внешняя сила, чтобы сжать газ. Следовательно, $Q_2 = A_2$. Графически работа A_2 изображается площадью фигуры $beaV_1V_2$.

Так как $T_2 < T_1$, то $A_2 < A_1$ и, следовательно, $Q_2 < Q_1$. Полная (полезная) работа газа, совершившего цикл, будет больше нуля: $A = A_1 - A_2 = Q_1 - Q_2 > 0$, откуда $A < Q_1$. Очевидно, численное значение работы A равно площади фигуры $akbea$.

Следовательно, периодически действующая тепловая машина превращает в работу только часть полученного от нагревателя количества теплоты, равную $Q_1 - Q_2$, и эта ее особенность не может быть устранена путем усовершенствования конструкции машины. Таким образом, любая тепловая машина должна содержать, помимо нагревателя (источника теплоты) и рабочего тела, совершающего термодинамический цикл (газа или пара), также и холодильник, обязательно имеющий более низкую температуру, чем температура нагревателя.

Работа газа состоит в том, что он приводит в движение рабочий орган машины — поршень дизеля или ротор турбины. Если тепловая машина, кроме передачи холодильнику количества теплоты Q_2 , не имеет никаких других тепловых потерь, ее называют идеальной.

Экономичность тепловой машины характеризуется ее КПД, т. е. отношением:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

$$\text{Поскольку } A < Q_1, \text{ то } \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{A}{Q_1} < 1.$$

* См.: [2]. Гл. IV, § 19.

** В тепловых машинах в качестве холодильника используют или атмосферный воздух, или описанные выше конденсаторы.

Следовательно, КПД теплового двигателя всегда меньше 100 %. Все же количество теплоты Q_1 не может быть использовано для совершения работы. Этот вывод вполне согласуется со вторым законом термодинамики, который гласит: «Невозможно осуществить такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы получение работы за счет теплоты, взятой от одного источника».

Справедливость этого закона подтверждается многовековым опытом всего человечества, он проявляется и в рассмотренном выше круговом процессе. Действительно, результатом процесса является не только совершение работы за счет охлаждения нагревателя, но и нагревание холодильника, которому газ передает количество теплоты Q_2 .

Теоретические исследования, выполненные в 20-х годах XIX в. французским ученым Сади Карно, показали, что КПД идеальной тепловой машины не может превышать некоторого максимального значения, равного $\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, где T_1, T_2 — соответственно температуры нагревателя и холодильника. Работа всех реально существующих машин, кроме теплоты Q_2 , отданной холодильнику, всегда сопровождается тепловыми потерями на трение, излучение и теплопроводность, и потому их КПД гораздо меньше, чем η_{\max} .

Формула для η_{\max} показывает следующие пути увеличения КПД тепловых машин: повышение температуры нагревателя; понижение температуры холодильника; то и другое одновременно.

Рабочее тело (газ) тепловой машины может совершать также обратный цикл, графическое изображение которого дано на рисунке 30. В этом цикле газ расширяется в соответствии с кривой aeb , а затем сжимается посторонней силой (двигателем) в соответствии с кривой bka . И здесь для совершения цикла кроме газа необходимо еще два тела — менее нагретое и более нагретое. При расширении газ отбирает от менее нагретого тела количество теплоты Q_1 , а при сжатии отдает более нагретому телу количество теплоты Q_2 , причем $Q_2 > Q_1$. В этом круговом процессе дополнительное количество теплоты $Q_2 - Q_1$ получается за счет работы, совершенной внешней силой над рабочим телом: $Q_2 - Q_1 = A$. Численно работа A равна площади фигуры $akbea$.

Сравнивая рисунки 29 и 30, можно заметить, что в прямом цикле кривая расширения располагается выше кривой сжатия рабочего тела, а в обратном цикле — наоборот.

Основной характеристикой обратного цикла является так называемый холодильный коэффициент ϵ , представляющий

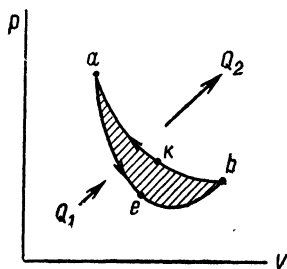


Рис. 30. График обратного кругового процесса.

собой отношение количества теплоты Q_1 , которое отнимается от холодной среды, к работе A , совершенной внешней силой и над рабочим телом:

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{A}.$$

Практически обратный цикл используется либо для охлаждения некоторых тел, либо для уменьшения расхода энергии на нагревание тел. В первом случае соответствующая тепловая машина называется холодильной, во втором — тепловым насосом.

Задачи

1. Газопровод из стальных труб Москва—Саратов имеет длину 780 км. На сколько увеличится его длина при изменении температуры от зимней -25°C до летней $+25^\circ\text{C}$? Температурный коэффициент линейного расширения стали $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

2. Стальная балка наглухо заделана между двумя стенами при 0°C . Площадь поперечного сечения балки 1 дм^2 . С какой силой она будет давить на стены при повышении температуры до 20°C , если они будут препятствовать ее удлинению?

Модуль Юнга для стали $2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, а температурный коэффициент линейного расширения $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

3. Стальной бандаж нагоняется на вагонное колесо при температуре 300°C . Определить силу натяжения F в бандаже при температуре 20°C , если его поперечное сечение 20 см^2 . Для стали $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

4. Азростат наполнен водородом при температуре 15°C . При неизменном атмосферном давлении под влиянием солнечных лучей его температура поднялась до 37°C , а излишек газа вышел через аппендикс, благодаря чему вес азростата с газом уменьшился на $61,5 \text{ Н}$. Определить объем азростата. Плотность водорода при 0°C равна $9 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$. Температурный коэффициент объемного расширения газа $0,00366 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

5. На рисунке 31 дан график изобарного расширения газа. Определить работу расширения газа.

6. Определить КПД идеальной тепловой машины, если температура пара в котле 693 К , а температура пара в холодильнике 393 К .

7. В обратном круговом процессе над рабочим телом совершена работа $27,9 \text{ кДж}$. При этом от холодной среды отнято 188 кДж теплоты. Какое количество теплоты передано теплой среде? Чему равен холодильный коэффициент цикла?

Ответы

1. $\Delta l = \alpha l_0 (t_1 - t_2)$, $\Delta l = 468 \text{ м}$.

2. $F = ES\alpha\Delta t$, $F = 5,2 \cdot 10^6 \text{ Н}$.

3. $F = ES\alpha\Delta t$, $F = 1,41 \cdot 10^6 \text{ Н}$.

4. $P = \rho g V = gV \frac{\rho_0}{1 + \alpha t}$; $P_1 = \rho_1 g V = gV \frac{\rho_0}{1 + \alpha t_1}$; $\Delta P = P - P_1$.

$$V = \frac{\Delta P}{g\rho_0 \left(\frac{1}{1 + \alpha t} - \frac{1}{1 + \alpha t_1} \right)},$$

$V = 1000 \text{ м}^3$. 5. $A = p\Delta V$, $A = 6,25$

кДж. 6. $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, $\eta = 43,3\%$.

7. $Q_2 = Q_1 + A$, $Q_2 = 215,9 \text{ кДж}$,

$\varepsilon = \frac{Q_1}{A}$, $\varepsilon = 6,75$.

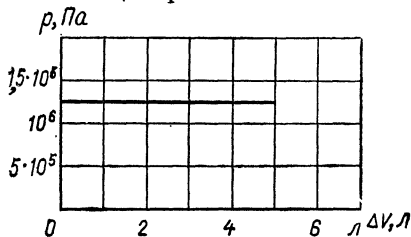
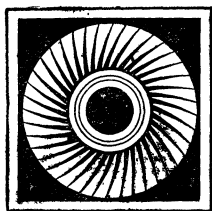


Рис. 31.



ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

ГЛАВА IV

§ 1. Паровые машины

Распространение и роль тепловых машин в промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте чрезвычайно велики, а в энергетике они являются основным видом двигателей. Достаточно сказать, что в нашей стране более 80 % всей вырабатываемой энергии приходится на долю электростанций, оборудованных тепловыми машинами — главным образом паровыми турбинами.

К преимуществам паросиловых установок можно отнести:

- 1) Использование малоценных широко распространенных видов топлива.
- 2) Возможность сосредоточить в сравнительно небольших установках колоссальные мощности.
- 3) Сочетание тепловых электростанций с установками, вырабатывающими теплоту для отопления и других целей, позволяет достигнуть весьма высокого КПД использования топлива.

Первые попытки применить силу давления водяного пара для получения работы — откачивания воды из шахт относятся к началу XVII в. Однако построенные с этой целью машины работали с очень небольшим давлением пара и были малоэффективны.

В 1690 г. изобретатель парового котла Дени Папен построил первую поршневую машину (рис. 32), которая, хотя и не получила практического применения, явилась прообразом последующих паровых машин. Она состояла из

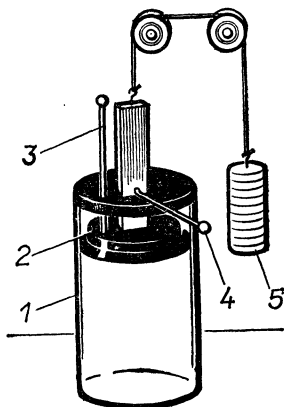


Рис. 32. Схема паровой машины Папена.

цилиндра 1 с движущимся в нем поршнем 2. На дно цилиндра наливали воду, поршень опускали вниз, причем воздух из-под поршня цилиндра выходил через отверстие в поршне, закрываемое потом штифтом 3. Цилиндр подогревали. Образовавшийся пар поднимал поршень, который в верхнем положении закрепляли чекой 4. Цилиндр обливали холодной водой, пар конденсировался, вследствие чего в цилиндре образовывалось разреженное пространство. Чеку вынимали, поршень под давлением атмосферного воздуха опускался вниз, поднимая при этом груз 5, привязанный к бечеве, перекинутой через блоки. Таким образом, цилиндр служил и котлом, и конденсатором пара. Это и обусловило неработоспособность паровой машины Папена.

Большое значение в истории теплотехники имел безпоршневой водоподъемник, построенный в 1698 г. англичанином Томасом Севери. В этой машине изобретатель впервые применил отдельный паровой котел, что предопределило пути дальнейшего развития паровых машин.

Пароатмосферная водоподъемная установка Севери (рис. 33) состояла из резервуара 1, который служил насосом, парового котла 2, водосборника 3 и резервуара 4. Пар из котла 2 через открытый кран 5 поступал в камеру 1 и вытеснял из нее воду через нагнетательный клапан 6 в резервуар 4. Затем кран 5 закрывался и камера 1 поливалась холодной водой из резервуара 8. Благодаря этому пар в камере 1 конденсировался и в ней образовывалось разрежение. Тогда под действием атмосферного давления вода из камеры 3 через клапан 7 (при закрытом клапане 6) поступала в резервуар 1. Затем цикл повторялся. Машина Севери применялась для откачки воды из шахт, однако была очень неэкономична, так как горячий пар в

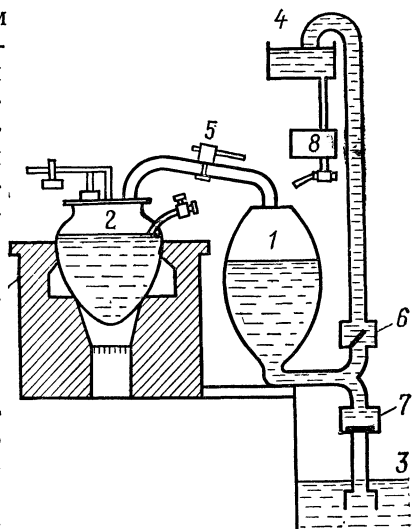


Рис. 33. Схема водоподъемной установки Севери.

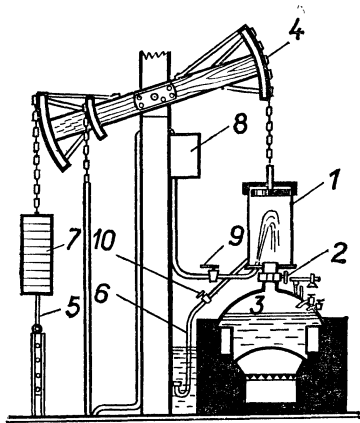


Рис. 34. Схема пароатмосферной машины Ньюкомена.

резервуаре 1 соприкасался с холодной водой; на подъем воды в машине использовалось лишь 0,5 % от энергии топлива.

Существенным шагом вперед в деле конструирования паровых машин был поршневой паровой насос, построенный в 1711 г. английским механиком Томасом Ньюкоменом. Его машина (рис. 34) состояла из цилиндра 1, соединенного трубкой через кран 2 с паровым котлом 3, и балансира 4. Один конец балансира был связан цепью с поршнем цилиндра, другой — со штангой 5 насоса, установленного в шахте. Чтобы привести машину в действие, открывали кран 2 и впускали в цилиндр пар, который вытеснял из него воздух через трубку 6 и поднимал поршень, чему помогал груз 7 на штанге насоса. Когда поршень доходил до верхнего положения, кран 2 закрывали и из сосуда 8 через кран 9 в цилиндр впрыскивали холодную воду. Пар в цилиндре конденсировался, под поршнем получалось разреженное пространство, и он под действием атмосферного давления опускался вниз, поднимая при этом штангу насоса и груз на ней. Вода, образовавшаяся от конденсации пара, и охлаждающая вода удалялась наружу через кран 10. Открывали и закрывали краны вручную. Роль холодильника в машине Ньюкомена выполнял ее цилиндр. Поэтому много энергии пара расходовалось при каждом рабочем цикле на прогревание остывшего цилиндра. Машина Ньюкомена использовалась в течение 60 лет в основном для откачки воды из шахт.

В 1766 г. русский механик И. И. Ползунов построил более совершенную пароатмосферную машину непрерывного действия с автоматическим впуском и выпуском пара и с инжектированием холодной воды для образования вакуума.

Эта машина (рис. 35) имела два цилиндра 1 с поршнями 2, соединенными цепями с балансирами 3. Последние приводили в действие мехи 4, которые накачивали воздух в плавильные печи. Поршни работали попеременно: когда в правом цилиндре под действием впрыскиваемой в него воды пар конденсировался и поршень опускался, в левый цилиндр поступал пар из котла 5, благодаря чему поршень в этом цилиндре поднимался; затем левый поршень опускался, а правый поднимался и т. д.

Парораспределительный кран 6, через который пар по-

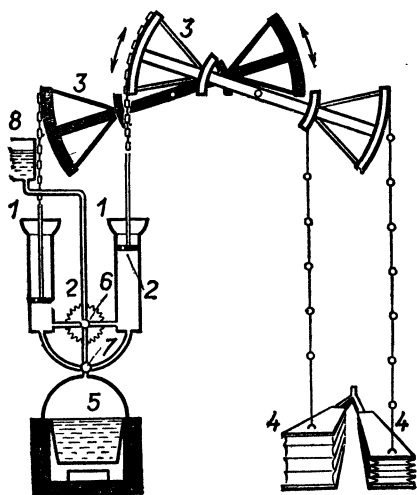


Рис. 35. Схема проекта машины Ползунова,

падал в цилиндры, и водораспределительный кран 7, через который в них поступала холодная вода из бака 8, действовали автоматически с помощью особого зубчатого механизма.

Таким образом, машина И. И. Ползунова действовала непрерывно, кроме того, ее можно было использовать для различных заводских работ. В этом заключалось ее большое преимущество перед машиной Ньюкомена, которая могла служить только в качестве водяного насоса. К сожалению, преждевременная смерть изобретателя (машину испытывали уже после смерти И. И. Ползунова) и неблагоприятные условия в феодальной России помешали довести интересное и важное начинание до конца.

В 1784 г. получил патент на универсальную паровую машину английский изобретатель Джеймс Уатт.

Благодаря своим достоинствам машина Уатта сыграла громадную роль в развитии техники. Она получила самое широкое распространение и на протяжении XIX в. была главным видом двигателя в промышленности, а также в сухопутном и водном транспорте.

Начав с усовершенствования пароатмосферной машины Ньюкомена, Уатт впоследствии создал принципиально новый вид чисто парового двигателя двойного действия, в котором пар поочередно поступал в цилиндр то с одной, то с другой стороны поршня, двигая его взад и вперед. Это увеличило мощность машины, и она стала работать равномернее.

Поступательное движение поршня машины с помощью балансира и кривошипно-шатунного механизма превращалось во вращательное движение вала машины. В машине Уатта пар конденсировался не в цилиндре, а в особой камере — конденсаторе, что сразу снизило потери энергии. С этой же целью изобретатель снабдил цилиндр двойными стенками («рубашкой»), между которыми пропускал горячий пар из котла. Уатт применил также «отсекку» пара, т. е. пар впускали в цилиндр только на части хода поршня, после чего доступ пара в цилиндр прекращался. Остальную часть хода поршень проходил под действием уже вошедшего в цилиндр расширяющегося пара. Благодаря этому энергия пара использовалась более полно, а расход топлива уменьшился в 2,5—3 раза.

Из других изобретений Уатта важное значение имели коробчатый парораспределитель («золотник») и центробежный регулятор числа оборотов вала машины, до настоящего времени являющийся необходимой принадлежностью почти каждого двигателя.

Дальнейшее усовершенствование паровой машины пошло по пути применения перегретого пара высокого давления и увеличения числа ее оборотов. Из машины был изъят балансир, что упростило ее конструкцию. Все это повысило КПД машины: если в 1800 г. он составлял 2—3 %, то в настоящее время КПД лучших паровых машин достигает 18—20 %.

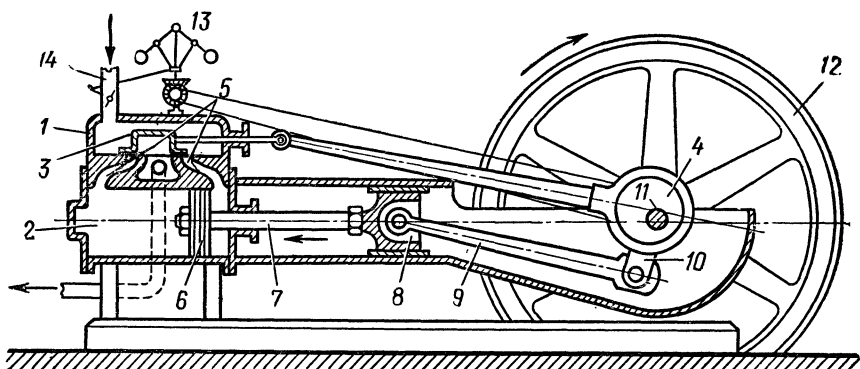


Рис. 36. Схема современной паровой машины.

По своей конструкции современная паровая машина (рис. 36) во многом сходна с машиной Уатта и действует так. Пар из котла поступает в так называемую золотниковую коробку 1, отлитую вместе с цилиндром 2. В ней находится золотник 3, похожий на опрокинутую коробку (поэтому он называется коробчатым). Золотник приводится в движение от вала машины при помощи эксцентрика 4 и попеременно открывает окна 5, соединяющие золотниковую коробку с правой и левой полостями цилиндра. Пар, поступив в одну из полостей цилиндра (на рис. 36 в правую), давит на поршень 6 и заставляет его двигаться (в нашем случае влево). В это время отработавший в другой (левой) полости пар выходит в полое пространство цилиндра под золотником, а оттуда в конденсатор (у мощных машин) или в атмосферу (у менее мощных). Когда поршень дойдет до крайнего положения (левой «мертвой» точки), то золотник станет так, что пар будет поступать в цилиндр с другой стороны поршня и последний начнет двигаться в обратную (правую) сторону, а отработанный в этой полости цилиндра пар будет выходить наружу.

Возвратно-поступательное движение поршня передается через шток 7, ползун 8 и шатун 9 кривошипу 10 вала 11 и вращает последний. На валу насажен маховик 12, которым обеспечивают машине плавный ход. Маховиком часто пользуются как шкивом для передачи ремнем или канатами механической энергии к станкам или электрогенератору. Для поддержания постоянного числа оборотов вала служит центробежный регулятор 13, который при увеличении числа оборотов прикрывает заслонку 14 в подводящем пар трубопроводе, при уменьшении их числа приоткрывает ее.

В цилиндре паровой машины нельзя осуществить полностью весь цикл. Поэтому различные его процессы протекают в разных частях паросиловой установки: испарение воды — в паровом котле, расширение пара и преобразование его внутренней энергии в

механическую — в цилиндре машины, конденсация пара — в конденсаторе и нагревание полученного конденсата до температуры парообразования — в котле. Таким образом, реальный цикл, происходящий только в цилиндре паровой машины, является разомкнутым, так как масса рабочего тела (пара) в течение цикла меняется, а в конце полностью обновляется. Этот цикл стремятся приблизить к теоретическому циклу, графическое изображение которого приведено на рисунке 37.

Изохора $1-2$ графически изображает на нем почти мгновенное повышение давления пара в цилиндре при соединении его с котлом от давления, равного давлению в холодильнике, до давления в котле.

Изобара-изотерма $2-3$ соответствует наполнению цилиндра свежим паром (через впускной клапан a) при постоянных температуре и давлении, равных давлению и температуре пара в котле. Пар движет поршень вправо, совершая «работу наполнения». Затем происходит отсечка пара (точка 3 на графике; клапаны a, b закрыты), и начинается его адиабатное расширение (адиабата $3-4$). При этом пар совершает над поршнем работу за счет своей внутренней энергии и его температура и давление уменьшаются. Когда поршень достигнет правой мертвой точки, открывается выпускной клапан b и давление пара быстро падает до давления в холодильнике (изохора $4-5$). При обратном движении поршень выталкивает отработавший пар в холодильник, причем давление в цилиндре все время остается равным давлению в холодильнике (изобара $5-1$). Затем все процессы повторяются. Полезная работа за цикл численно равна площади фигуры $1-2-3-4-5-1$.

Рабочий процесс, протекающий в паровой машине, из-за тепловых потерь отличается от только что описанного идеального процесса. Этот реальный процесс графически изображается другой кривой (пунктирная кривая на рис. 37), которая ограничивает меньшую площадь. Следовательно, и работа паровой машины за цикл при той же разности температур нагревателя и холодильника меньше теоретически вычисленной работы для идеальной паровой машины.

Главное достоинство паровой машины состоит в простоте устройства, надежности работы, неприхотливости в отношении топлива, широкой приспособляемости к изменениям нагрузки, возможности легко изменять направление движения. Несмотря

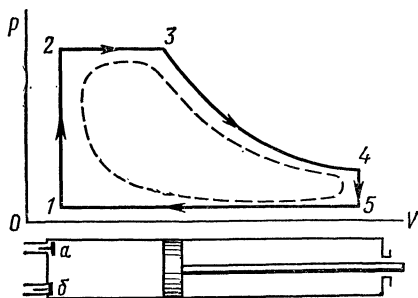


Рис. 37. График рабочего цикла паровой машины.

на невысокий КПД, паровые машины малой мощности для многих целей оказываются более удобными и выгодными, чем двигатели других типов. В настоящее время паровые машины большой мощности вытеснены более экономичными паровыми турбинами.

§ 2. Паровые турбины

Ознакомившись с работой паровой машины, мы убедились, что в ее цилиндре потенциальная энергия пара превращается в кинетическую энергию движения поршня.

Работа паровой турбины основана на другом принципе. Основной частью турбины является закрепленное на валу колесо с лопатками. Пар из котла подводится к неподвижному каналу (соплу), в котором он расширяется, причем потенциальная энергия пара переходит в кинетическую энергию движения струи пара, выходящей из сопла. Эта струя поступает на лопатки колеса и передает им свою энергию, благодаря чему колесо вращается.

В турбине нет частей, движущихся возвратно-поступательно (поршня, штока и т. д.), непрерывное и равномерное вращение рабочего колеса создает меньше толчков и вибраций, вредно влияющих на машину и ее фундамент. Это открывает возможность сосредоточить в одном сравнительно небольшом по размеру турбоагрегате огромную мощность — до 1 200 000 кВт. Такие турбины уже созданы, ведутся исследования по созданию энергоблока на 1 600 000 кВт.

Мысль об использовании кинетической энергии пара для получения вращательного движения зародилась в глубокой древности. 2000 лет назад греческий ученый Герон описал прибор, получивший впоследствии название «шар Герона» (рис. 38), который является прототипом реактивной турбины. Он состоял из котла 1, пар из которого через пустотелую ось проходил внутрь полого шара 2. Выходя из шара через две боковые трубки с загнутыми концами, паровые струи вращали шар за счет возникающей при этом реактивной силы.

В начале XVII в. итальянский ученый Джованни Бранка предложил прибор (рис. 39), напоминающий современную активную турбину. В нем струя пара из парового котла 1 через неподвижную трубку (сопло) 2 направлялась на лопасти колеса 3, заставляя его быстро вращаться.

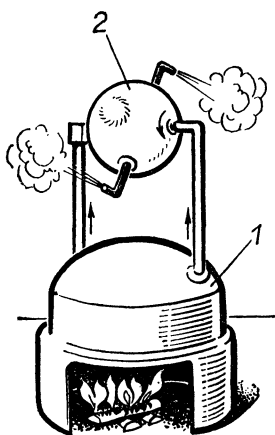


Рис. 38. Шар Герона.

Хотя на первый взгляд кажется, что турбина проще паровой машины, на самом деле она гораздо сложнее. Конструирование, постройка и обслуживание турбины представляет собой сложную задачу, так как турбина требует более точного изготовления отдельных частей, центрирования вращающихся деталей, применения высокопрочных, жаростойких материалов, способных выдерживать высокие температуры и большие динамические напряжения. Именно поэтому турбину стали использовать лишь в 80-х годах прошлого века (несмотря на то, что принцип работы турбины был известен давно), когда бурно развивающаяся промышленность, электротехника и судостроение потребовали создания быстроходных двигателей большой мощности.

Наибольшее распространение в современной технике получили активные турбины.

На рисунке 40 приведена схема паротурбинной установки, работающей по замкнутому циклу. Она состоит из парового котла 1, турбины 2, вращающей ротор электрического генератора 3, холодильника 4 и насоса 5.

Рассмотрим график кругового процесса, осуществляемого в этой паросиловой установке (рис. 41). Начальное состояние рабочего тела (воды в котле) изображается на графике точкой b . В котле вода получает некоторое количество теплоты Q_1 и превращается в пар. При этом ее объем возрастает от V_1 до V_2 . Давление p_1 в процессе парообразования не меняется, графически этот процесс изображается изобарой bc . Образовавшийся пар поступает в турбину и расширяется адиабатно от объема V_2 до объема V_3 (адиабата cd). В турбине пар совершает работу. Далее он поступает в холодильник, где при низкой температуре конденсируется и отдает холодильнику количество теплоты Q_2 , а его

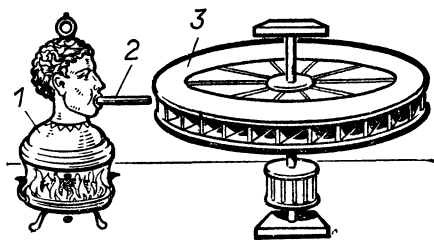


Рис. 39. Турбина Бранка.

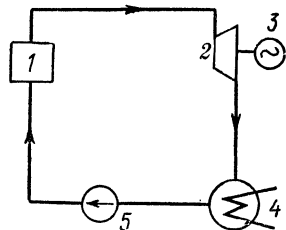


Рис. 40. Схема паротурбинной установки, работающей по замкнутому циклу.

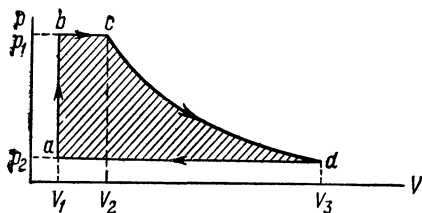


Рис. 41. График кругового процесса паротурбинной установки.

объем уменьшается от V_3 до V_1 . Процесс конденсации совершается при постоянном давлении p_2 (изобара da). Наконец насос направляет конденсат в паровой котел. При этом давление рабочего тела возрастает от p_2 до p_1 . Так как вода сжимается незначительно, последний процесс изображается изохорой ab . Рабочее тело, таким образом, возвращается в исходное состояние b , после чего рассмотренный круговой процесс повторяется.

В течение цикла пар совершает работу, численно равную площади фигуры $abcd$. В результате этой работы внутренняя энергия пара превращается в механическую энергию вращения колеса турбины и ротора электрогенератора. В свою очередь ротор генератора преобразует механическую энергию в электрическую. Считая паротурбинную установку идеальной, можно ее КПД выразить формулой

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Если температура пара до расширения в турбине равна T_1 , а температура пара, поступающего в холодильник, — T_2 , то верхняя граница КПД установки определяется по формуле

$$\eta < \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

На рисунке 42 изображена простейшая турбина. Она состоит из насаженного на вал 1 одного стального рабочего диска (ротора) 2 и поэтому называется одноступенчатой. На ободе диска укреплены стальные изогнутые лопатки 3.

Против лопаток расположено одно (или несколько) сопел 4. Корпус 5 турбины снабжен выпускным патрубком 6.

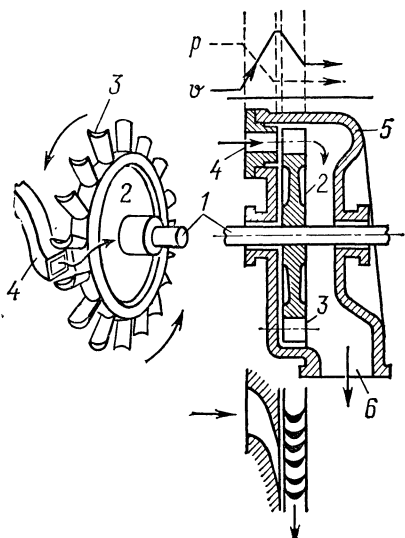


Рис. 42. Активная одноступенчатая паровая турбина.

В подобной турбине пар расширяется только в канале сопла. Межлопаточные каналы ротора имеют постоянное сечение, поэтому проходящий по ним пар не расширяется, а только меняет направление своего движения, действуя на лопатку с некоторой силой. Эта сила заставляет ротор и вал вращаться, совершая работу за счет кинетической энергии пара.

Из графиков (см. рис. 42) видно, что давление пара падает в сопле, оставаясь постоянным на лопатках; скорость же струи возрастает в сопле и уменьшается на лопатках.

Первую паровую турбину активного типа построил в 1889 г. шведский инженер Лаваль. Важное значение имели разработанная Лавалем теория движения пара в направляющих каналах — соплах и найденная им наиболее выгодная форма сопел. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Пусть пар, заполняющий при постоянном давлении p_0 камеру A (рис. 43), вытекает через цилиндрическое сопло a в камеру B . Последняя заполнена паром при давлении p , которое называется «противодавлением», причем $p < p_0$. Если уменьшать противодавление p , скорость истечения пара из сопла будет возрастать, а его давление в вытекающей струе (все время равное p) — уменьшаться. Как показывает опыт, при $p \approx \frac{p_0}{2}$ скорость струи достиг

ает максимального (критического) значения и при дальнейшем уменьшении противодавления p в камере B перестает увеличиваться; остается неизменным и давление пара в вытекающей струе. Следовательно, при истечении пара из цилиндрического (а также суживающегося) сопла в кинетическую энергию превращается лишь часть потенциальной энергии пара, а другая значительная ее часть бесполезно теряется.

Инженер Лаваль установил, что при использовании расширяющегося сопла (рис. 44, а) давление пара в струе можно довести до противодавления окружающей среды, в которую он вытекает, а скорость получить значительно бóльшую, чем критическая. Таким образом, удалось почти полностью преобразовать потенциальную энергию пара в кинетическую энергию струи. Сверхкритическую скорость пара можно получить и в том случае, если цилиндрическое сопло снабдить косым срезом (рис. 44, б).

Чтобы избежать потери энергии на удары и разбрызгивание, струю пара направляют по касательной

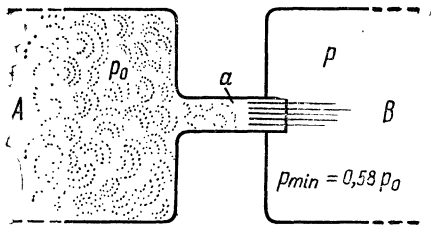


Рис. 43. Истечение пара из цилиндрического сопла.

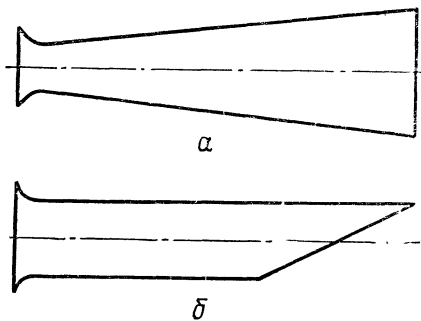


Рис. 44. Виды сопел: а) расширяющееся; б) цилиндрическое с косым срезом.

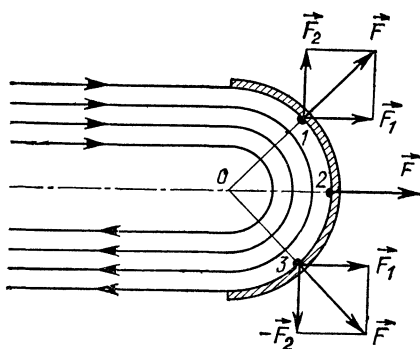


Рис. 45. Обтекавая лопатку, струя пара оказывает на нее давление.

по радиусу полукруглого профиля от центра O . Эту силу можно представить как результирующую двух сил: силы \vec{F}_1 , направленной параллельно оси лопатки O_2 , и силы \vec{F}_2 , перпендикулярной этой оси. Каждой силе \vec{F}_2 , действующей на частицу, находящуюся по одну сторону от оси лопатки, всегда можно найти равную по модулю, но противоположно направленную силу $-\vec{F}_2$, действующую на соответствующую частицу, находящуюся по другую сторону от оси лопатки. Следовательно, действия этих сил на лопатку компенсируются. Силы \vec{F}_1 для разных точек лопатки имеют разное значение, увеличивающееся к ее центру, но все они направлены в одну сторону. Складывая их по правилу сложения параллельных сил, получим равнодействующую, которая заставляет перемещаться лопатку и совершает работу.

Кинетическая энергия струи пара будет использована в турбине полностью только в том случае, если скорость пара, покидающего лопатку, весьма мала. А для этого, как показывают расчеты, необходимо, чтобы линейная скорость лопаток рабочего колеса турбины была равна половине скорости истечения пара из сопла.

Большая скорость истечения пара из сопла обуславливает и высокие скорости перемещения лопаток ротора. Так, например, при давлении в паровом котле 10^6 Па и в холодильнике $0,2 \cdot 10^5$ Па скорость пара на выходе из сопла достигает 1200 м/с. Следовательно, линейная скорость лопаток составит примерно 600 м/с, а число оборотов колеса турбины — 30 000 об/мин. При такой скорости вращения в роторе турбины развиваются огромные разрывающие его силы, которым не может противостоять самая прочная сталь. Чтобы снизить число оборотов ротора, приходится ставить громоздкую зубчатую передачу (редуктор), которая значительно снижает КПД турбины. Поэтому теперь одно-

к поверхности лопатки (рис. 45) и придают последней полукруглую форму. Пройдя лопатку, струя изменяет направление своего движения на противоположное, следовательно, на каждую частицу пара со стороны лопатки действует сила, которая искривляет ее движение и направлена к центру вращения O . В свою очередь каждая частица (например, 1, 2 и 3) действует на лопатку с силой \vec{F} , направленной

по радиусу полукруглого профиля от центра O . Эту силу

можно представить как результирующую двух сил: силы \vec{F}_1 , направленной параллельно оси лопатки O_2 , и силы \vec{F}_2 , перпендикулярной этой оси. Каждой силе \vec{F}_2 , действующей на частицу, находящуюся по одну сторону от оси лопатки, всегда можно найти равную по модулю, но противоположно направленную силу $-\vec{F}_2$, действующую на соответствующую частицу, находящуюся по другую сторону от оси лопатки. Следовательно, действия этих сил на лопатку компенсируются. Силы \vec{F}_1 для разных точек лопатки имеют разное значение, увеличивающееся к ее центру, но все они направлены в одну сторону. Складывая их по правилу сложения параллельных сил, получим равнодействующую, которая заставляет перемещаться лопатку и совершает работу.

Кинетическая энергия струи пара будет использована в турбине полностью только в том случае, если скорость пара, покидающего лопатку, весьма мала. А для этого, как показывают расчеты, необходимо, чтобы линейная скорость лопаток рабочего колеса турбины была равна половине скорости истечения пара из сопла.

Большая скорость истечения пара из сопла обуславливает и высокие скорости перемещения лопаток ротора. Так, например, при давлении в паровом котле 10^6 Па и в холодильнике $0,2 \cdot 10^5$ Па скорость пара на выходе из сопла достигает 1200 м/с. Следовательно, линейная скорость лопаток составит примерно 600 м/с, а число оборотов колеса турбины — 30 000 об/мин. При такой скорости вращения в роторе турбины развиваются огромные разрывающие его силы, которым не может противостоять самая прочная сталь. Чтобы снизить число оборотов ротора, приходится ставить громоздкую зубчатую передачу (редуктор), которая значительно снижает КПД турбины. Поэтому теперь одно-

ступенчатые турбины строят только малой мощности для приведения в движение небольших машин.

Число оборотов мощных турбин без особого ущерба для их КПД снижают двумя способами: с помощью ступеней скоростей и ступеней давления.

Схема турбины с двумя ступенями скоростей изображена на рисунке 46. Ее ротор снабжен двумя рядами лопаток 2 и 4, называемых ступенями скоростей, между которыми расположены неподвижные направляющие лопатки 3, укрепленные в корпусе турбины. Как показывает график (рис. 46, а), давление пара p_0 уже в сопле 1 уменьшается до противодавления p в холодильнике и в дальнейшем при прохождении пара через все три ряда лопаток 2, 3, 4 остается неизменным до самого выхода пара из турбины. Следовательно, уже в сопле 1 потенциальная энергия пара целиком преобразуется в кинетическую энергию.

В сопле 1 скорость пара v_0 возрастает до значения v . Половину этой скорости пар теряет на подвижных лопатках 2,

другую половину — на лопатках 4. Роль неподвижных лопаток 3 сводится к повороту струи пара, поэтому его скорость на лопатках 3 не меняется. Из турбины пар уходит с малой скоростью v_1 .

При двух ступенях скоростей скорость вращения ротора и вала турбины уменьшается в два раза, при трех ступенях — в три раза по сравнению со скоростью при одной ступени. Турбины с большим числом ступеней скоростей малоэкономичны, поэтому устраивают не более двух ступеней скоростей, комбинируя их со ступенями давления. Ступени скоростей были предложены в 1896 г. американским инженером Чарльзом Кертисом.

На рисунке 47 дана схема турбины с тремя рядами подвижных рабочих лопаток 1, 2, 3 (ступенями давления), разделенных неподвижными перегородками (диафрагмами) 4 и 5. В последних имеются каналы (сопла), через которые к лопаткам подво-

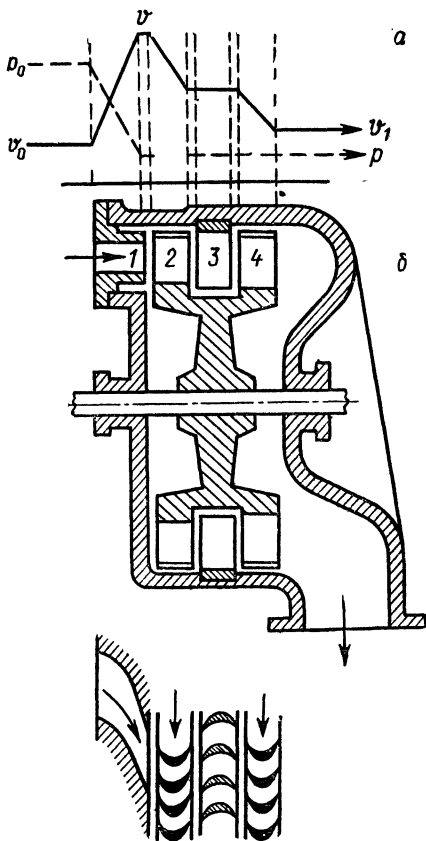


Рис. 46. Схема активной турбины с двумя ступенями скоростей.

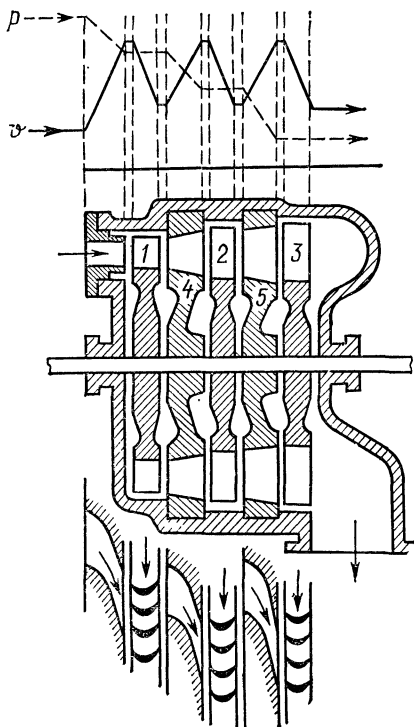


Рис. 47. Схема активной турбины со ступенями давления.

дится пар. Проходя через турбину, пар расширяется в каждом из неподвижных сопел. Поэтому (см. график на рис. 47) давление пара в неподвижных соплах падает, оставаясь постоянным на рабочих лопатках; скорость же струи пара возрастает в соплах, уменьшаясь на рабочих лопатках вследствие затраты кинетической энергии пара на вращение ротора. Так как объем пара по мере его расширения возрастает, сечения сопел и межлопаточных каналов увеличиваются от ступени к ступени. Это достигается увеличением длины лопаток, которые в мощных турбинах имеют значительные размеры. Так как каждой ступени соответствует небольшой перепад давления пара, скорость ротора получается значительно меньше, чем у одноступенчатой турбины.

Ступени давления были изобретены в 1890 г. и введены в практику турбостроения французским ученым Огюстом Рато.

В описанных выше турбинах холодильником служит конденсатор, поэтому они называются конденсационными, а электростанции, использующие подобные турбины, — конденсационными электроцентралями (КЭЦ).

Рассмотрим в качестве примера диаграмму теплового баланса (рис. 48, а) для одной из подобных КЭЦ*. Как показывает эта диаграмма, из всей энергии пара, поступающего в турбину, только 43,3 % преобразуется полезно в электрическую энергию, а остальные 56,7 % бесполезно теряются в конденсаторе т. е. уносятся в реку или другой водоем с водой, охлаждающей пар в конденсаторе), в котельном агрегате, в трубопроводах и т. д.

Для более полного использования энергии топлива во многих случаях турбины строят так, чтобы они могли снабжать потребителей не только электрической энергией, но и теплом для отоп-

* Такие диаграммы, составленные для разных КЭЦ, отличаются друг от друга и характеризуют экономичность их работы.

ления и горячего водоснабжения зданий, прачечных и бань, для нагревания, выпаривания, сушки и других технологических процессов. Такие турбины называются теплофикационными, а двойное использование пара — сначала в турбине для получения электрической энергии, а затем в теплообменных установках для промышленных и бытовых целей — называется теплофикацией. Электростанции, оборудованные теплофикационными турбинами, называются теплоэлектроцентралями или сокращенно ТЭЦ. Теплофикация очень выгодна, так как сберегает большое количество топлива и сокращает расходы на сооружение местных котельных установок, поставляющих горячую воду или пар для отопления зданий.

Конечно, выработка электроэнергии на единицу массы сжигаемого топлива на ТЭЦ ниже, чем на конденсационной электростанции, но в целом полезно использованная часть энергии пара, поступающего в турбину, увеличивается. Эта часть, как показывает диаграмма (рис. 48, б), составляет 93 %, из которых 25,8 % преобразуется в электрическую энергию, а 67,2 % идет на получение горячей воды для отопления и пара, используемого на производстве. Сопоставляя диаграммы (рис. 48, а, б), можно убедиться, что КПД ТЭЦ почти в два раза больше, чем у КЭЦ.

Упрощенная схема использования отработанного пара в теплофикационной паротурбинной установке приведена на рисунке 49. Перегретый пар из котла поступает в паровую турбину 1, приводящую в движение электрогенератор 2, вырабатывающий электрический ток. Часть пара, пройдя все ступени турбины, расширяется до очень низкого давления и поступает в конденсатор. Другая часть пара после прохождения первых ступеней направляется в парообразователь 3 и водоподогреватель 4.

В первом из них отработавший пар, проходя через трубы змеевика, нагревает омывающую их снаружи воду до высокой температуры, благодаря чему она обращается во «вторичный» пар, который по трубопроводу 5 подается на производственные нужды, например: для работы паровых молотов, для сушки, выпаривания и т. д. Вода, получающаяся от конденсации пара

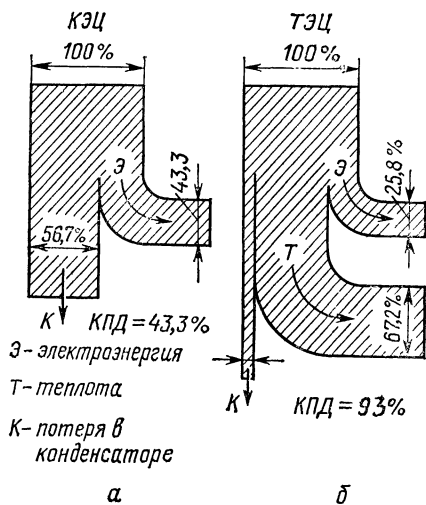


Рис. 48. Диаграмма теплового баланса:

- а) конденсационной электростанции (КЭЦ);
б) теплоэлектроцентрали (ТЭЦ).

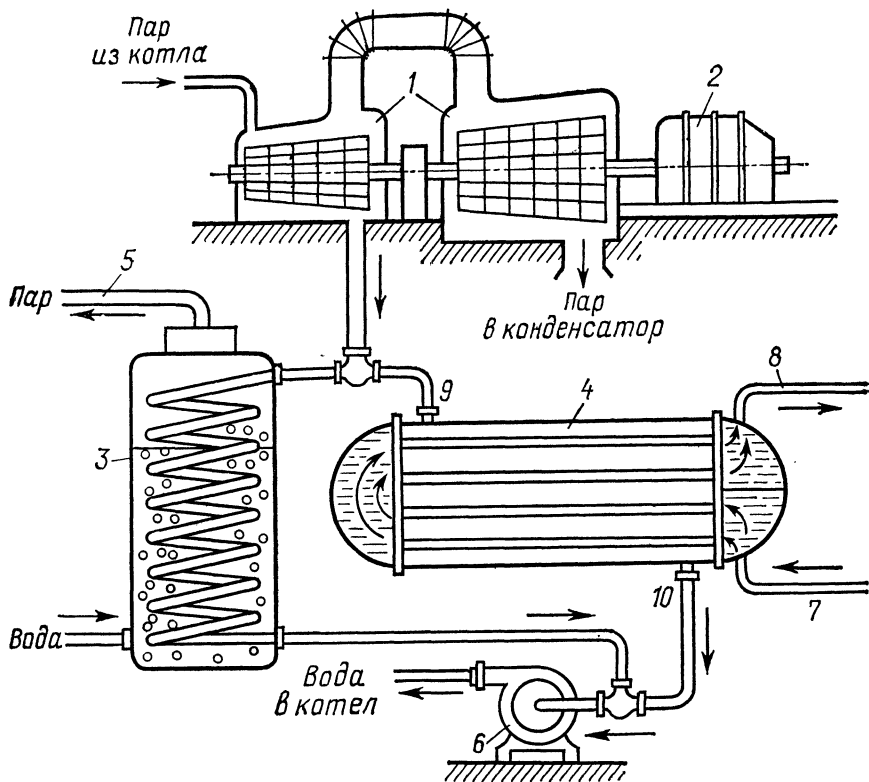


Рис. 49. Схема использования пара для теплофикации.

в змеевике (конденсат), с помощью насоса *б* снова направляется в котел.

Вода, циркулирующая в отопительной сети, через трубу *7* попадает в трубы водоподогревателя *4*, нагревается здесь паром, омывающим снаружи эти трубы, а затем по трубе *8* снова течет в отопительную сеть. Пар поступает в водоподогреватель *4* через трубу *9*, а полученный конденсат выходит из него через трубу *10* и насосом *б* нагнетается в котел.

Таким образом, теплофикация повышает КПД паротурбинных установок, сокращает расход топлива, облегчает труд человека и улучшает его бытовые условия.

В нашей стране мощность теплофикационных турбин, установленных на теплоэлектроцентралях, составляет около $\frac{1}{3}$ мощности паровых турбин всех тепловых электростанций. Комбинированное производство электроэнергии и теплоты позволяет экономить свыше 30 млн. т условного топлива.

Основное назначение паротурбинной установки — это превращение энергии топлива в электрическую энергию, которое проходит три стадии: первая осуществляется в топке парового котла, вторая — в турбине, третья — в электрогенераторе. Устранение из этой «цепочки» второго звена дало бы огромную экономию средств и топлива. Непосредственное превращение энергии топлива и лучистой энергии достигается с помощью термо- и фотоэлементов, созданных на основе полупроводников. Правда, КПД таких элементов пока не очень высок (10—15 %), но ученые работают над его увеличением. Мала также мощность термо- и фотобатарей, однако она уже вполне достаточна для «малой энергетики», например для снабжения электроэнергией спутников и космических кораблей.

§ 3. Двигатели внутреннего сгорания

Двигателями внутреннего сгорания (ДВС) называются тепловые двигатели, в которых используется работа расширения газообразных продуктов сгорания жидкого или газообразного топлива.

Первым ДВС, получившим некоторое промышленное применение, был двигатель, запатентованный в 1860 г. французом Лемуаром. В 1878 г. немецкий изобретатель Отто и инженер Ланген построили более совершенный ДВС, имевший КПД 22 %.

В современной технике ДВС получили широкое распространение: в энергетике (на маломощных электростанциях), на транспорте — сухопутном (на автомобилях и тепловозах), водном (на теплоходах и дизель-электроходах), воздушном (на пассажирских самолетах и вертолетах), в сельском хозяйстве (на тракторах, комбайнах и других машинах), в военном деле (на танках, орудийных тягачах и вездеходах, на торпедных катерах и подводных лодках, на самолетах разного назначения).

По своему устройству ДВС разделяются на поршневые, турбинные и реактивные.

В конструктивном отношении поршневой ДВС очень похож на паровую машину: у него также имеется цилиндр, поршень, шатун, коленчатый вал, маховик и некоторые другие части, характерные для паровой машины. Однако в ДВС два процесса — сжигание топлива и превращение его внутренней энергии в механическую энергию оказалось возможным объединить в цилиндре, благодаря чему отпала необходимость в громоздкой и тяжелой котельной установке.

По способу образования горючей смеси (из топлива и воздуха) ДВС разделяются на двигатели с внешним и внутренним смесеобразованием.

К двигателям с внешним смесеобразованием относятся, в частности, карбюраторные ДВС, в которых горючая смесь образуется вне цилиндра, в особом приборе — карбюраторе. В большинстве

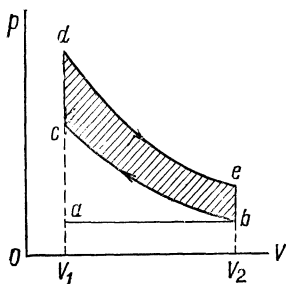


Рис. 50. График рабочего цикла двигателя быстрого сгорания.

двигателей этого типа зажигание смеси производится электрической искрой.

К двигателям с внутренним смесобразованием относятся дизели, в которых горючая смесь образуется непосредственно в самом цилиндре. В дизеле топливо воспламеняется от высокой температуры сильно сжатого воздуха.

Все процессы, происходящие в цилиндре ДВС, периодически повторяются. Совокупность этих процессов называется рабочим циклом, а каждый из них — тактом. Если цикл состоит из четырех тактов, двигатель называется

четырёхтактным, если из двух — двухтактным.

И карбюраторные двигатели и дизели могут быть как четырёхтактными, так и двухтактными.

Рабочий цикл ДВС является разомкнутым, так как масса рабочего тела в цилиндре в течение цикла меняется, а в его конце полностью обновляется.

Рабочий цикл четырёхтактного карбюраторного ДВС (график которого показан на рис. 50) состоит из следующих тактов:

1. Впуск. Из верхней мертвой точки поршень движется вниз, засасывая из карбюратора в цилиндр через впускной клапан горючую смесь — воздух, насыщенный парами бензина (изобара ab).

2. Сжатие. Достигнув нижней мертвой точки, поршень движется вверх при закрытых клапанах, впускном и выпускном, сжимая горючую смесь (адиабата bc). От сжатия температура смеси сильно возрастает, что необходимо для быстрого сгорания топлива. (При медленном горении топлива работа ДВС и его КПД будут малыми.)

3. Рабочий ход. В самом начале обратного хода поршня вниз между электродами свечи, расположенными в верхней части цилиндра, проскакивает искра, воспламеняющая горючую смесь. Температура и давление продуктов сгорания мгновенно возрастают (изохора cd), они расширяются (адиабата de), толкая поршень вниз и совершая работу.

4. Выпуск. Когда поршень достигает нижнего положения, кулачок распределительного вала открывает выпускной клапан и отработавшие газы выходят через него из цилиндра наружу (изохора eb). Обратным ходом вверх поршень вытесняет из цилиндра остатки газов (изобара ba). Далее цикл повторяется.

Таким образом, сжигание топлива в цилиндре равносильно получению рабочим телом количества теплоты Q_1 , а его выпуск из цилиндра — потере рабочим телом количества теплоты Q_2 .

Совершенная в течение третьего такта работа A численно равна площади заштрихованной фигуры $bcde$, КПД двигателя

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Температура сгорания рабочей смеси в цилиндре ДВС достигает 1800°C , т. е. она в несколько раз выше температуры пара в паровой машине, поэтому ДВС гораздо экономичнее последней.

Экономичность ДВС зависит от степени сжатия рабочей смеси в цилиндре перед ее воспламенением: чем выше сжатие, тем больше КПД. Однако в карбюраторных ДВС горючую смесь можно сжимать только до определенного предела, так как сжатие сопровождается нагреванием и при давлении выше $6 \cdot 10^5$ Па температура смеси достигает $360\text{--}400^\circ\text{C}$. При такой температуре нефть, керосин и бензин самовоспламеняются, происходит взрыв (детонация), который нарушает работу двигателя и может вывести его из строя.

Проблема бездетонационного сгорания топлива удачно разрешена в дизеле, изобретенном в 1893 г. немецким инженером Р. Дизелем. В дизеле сжатие до $1,5 \cdot 10^6\text{--}3,5 \cdot 10^6$ Па подвергается не горючая смесь, а воздух, причем его температура поднимается до $500\text{--}700^\circ\text{C}$, т. е. до значения, достаточного для самовоспламенения любого жидкого горючего — нефти, мазута и т. д. Поэтому в дизеле нет специальных приспособлений для зажигания горючей смеси — запальной свечи, источника тока и т. д.

Горючая смесь образуется внутри цилиндра дизеля, в который с помощью форсунки впрыскивается распыленное жидкое топливо, смешивающееся здесь с раскаленным воздухом. По мере поступления в цилиндр топлива оно самовоспламеняется и постепенно без взрыва сгорает. Это позволяет сжигать в дизеле дешевое, тяжелое топливо — нефть, соляровое масло и т. д. Образующиеся продукты сгорания расширяются и движут поршень. Так как рабочее тело в цилиндре дизеля сжимается до более высокого давления, чем в двигателе быстрого сгорания, то и его КПД оказывается выше. Конструкции карбюраторного ДВС и дизеля имеют много общего.

Рабочий цикл четырехтактного дизеля (рис. 51) состоит из следующих тактов:

1. Всасывание. Из верхней точки поршень идет вниз, всасывая в цилиндр через впускной клапан чистый воздух (изобара ab).

2. Сжатие. При закрытых клапанах, двигаясь вверх, поршень сжимает воздух до $3,5 \cdot 10^6$ Па, отчего последний нагревается до 700°C (адиабата bc).

3. Рабочий ход. При закрытых клапанах (впускном и выпускном) пор-

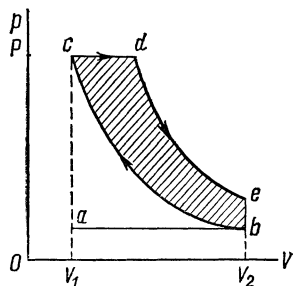


Рис. 51. График рабочего цикла дизеля.

шень из верхней точки движется вниз, причем на протяжении части его хода в цилиндр постепенно форсункой впрыскивается распыленное жидкое топливо, которое самовоспламеняется и постепенно сгорает. Температура продуктов сгорания достигает 1900°C , а давление $8 \cdot 10^6$ Па. Расширяясь по изобаре cd , а затем после прекращения впрыскивания топлива по адиабате de , продукты сгорания двигают поршень вниз, совершая работу.

4. Выпуск. Открывается выпускной клапан, и поршень, двигаясь вверх, выталкивает из цилиндра отработанные газы (изохора eb и изобара ba).

Топливо впрыскивается в цилиндр дизеля сжатым воздухом, полученным с помощью компрессора, или небольшим «топливным насосом» под высоким давлением.

Мощность двигателя внутреннего сгорания (в кВт) можно определить по следующей формуле:

$$N = \frac{pVni}{500\tau},$$

где p — давление продуктов сгорания, Па; n — число оборотов вала в 1 с; i — число цилиндров двигателя; V — объем цилиндра, м^3 ; τ — число тактов за один цикл.

Эта формула показывает, что, увеличивая число оборотов двигателя, можно увеличить и его мощность. Действительно, чем быстрее работает двигатель, тем больше рабочих циклов совершает он в единицу времени и тем больше сгорает в его цилиндре топлива, за счет энергии которого совершается работа. Такого же результата можно достигнуть переходом от четырехтактного к двухтактному циклу (что также видно из формулы). Двухтактный ДВС, кроме большей мощности, приходящейся на единицу объема цилиндра, меньше по размеру, легче по весу и движется более равномерно, так как один рабочий такт приходится не на два, а на один оборот вала.

Для осуществления рабочего цикла в карбюраторном двухтактном двигателе внутреннего сгорания (рис. 52) используется нижняя часть 3 его корпуса, называемая картером. В течение каждого хода поршня в цилиндре и картере происходит одновременно несколько процессов.

Первый такт (сжатие). Во время хода поршня вверх (рис. 52, а) в цилиндре происходит сжатие горючей смеси. Поршень своим корпусом заслоняет каналы 1, 2, 4. В конце хода открывается канал 2 и через него в картер поступает горючая смесь.

Второй такт (рабочий ход). Поршень идет вниз. В начале хода горючая смесь в цилиндре воспламеняется электрической искрой от свечи 5. Продукты сгорания расширяются, совершая работу. Одновременно в картере горючая смесь сжимается поршнем (рис. 52, б). В конце хода (рис. 52, в) открываются каналы 1

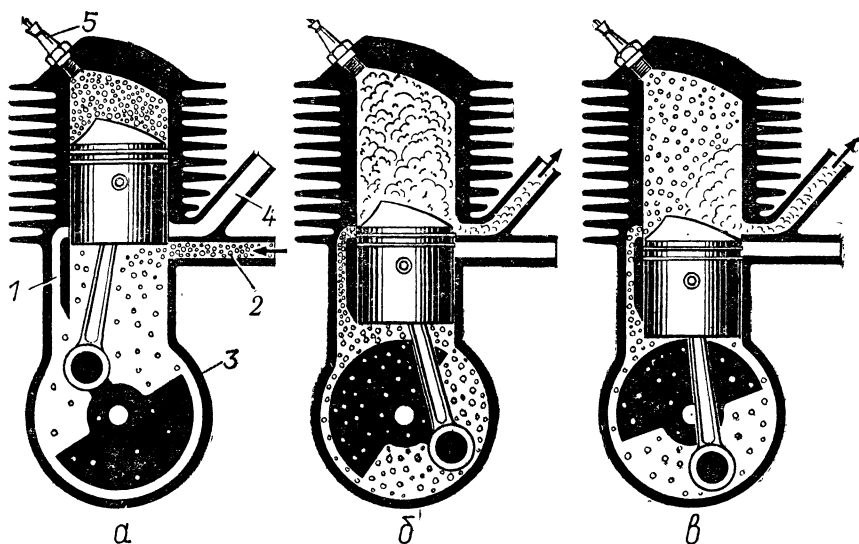


Рис. 52. Схема работы двухтактного двигателя внутреннего сгорания.

и 4. Горючая смесь из картера через канал 1 устремляется в цилиндр и заполняет его, выталкивая из цилиндра наружу через канал 4 продукты сгорания. Затем цикл повторяется.

Двухтактные карбюраторные ДВС применяются на мотоциклах, моторных лодках, кинопередвижках и других машинах, где не требуется большой мощности.

Двухтактные дизели действуют почти так же, как и карбюраторные, однако у них в цилиндр вводится чистый воздух, который сжимается поршнем и от этого нагревается. Затем в цилиндр с помощью форсунки (заменяющей свечу) впрыскивается топливо. В результате самовоспламенения топлива происходит рабочий ход.

Сопоставляя карбюраторные ДВС и дизели, следует отметить, что первые компактны, имеют сравнительно малый вес и потому используются там, где требуется небольшая мощность и легкость силовой установки,— на всех автомобилях, кроме тяжелых грузовиков, на мотоциклах и т. д. Однако карбюраторные ДВС в качестве топлива используют дорогой бензин, их КПД составляет 20—25 % (у дизелей КПД достигает 30—38 %), кроме того, они уступают дизелям в простоте устройства и обслуживания. Поэтому, когда требуется большая мощность, применяют дизели (на тракторах и автомобилях большой грузоподъемности, тепловозах, теплоходах и др.).

Благодаря возвратно-поступательному движению поршня и шатуна в ДВС развиваются значительные динамические напря-

жения и потому мощность таких двигателей не превышает нескольких десятков тысяч киловатт.

К ДВС относится и газовая турбина, предшественником которой является паровая турбина.

Главная часть газотурбинной установки (ГТУ) — ее ротор с одним или несколькими рядами лопаток. Струя раскаленных до 1000°C газов, получаемых от сжигания топлива в камере сгорания самой турбины, обтекает эти лопатки и вращает ротор со скоростью до 16 000 об/мин. Таким образом, лопатки турбины работают в очень трудных условиях: они раскалены и подвергаются огромным растягивающим усилиям.

Первая в мире ГТУ была построена русским инженером П. Д. Кузьминским в конце прошлого века. Однако практическое использование газовых турбин стало возможным лишь в сравнительно недавнее время, после того как были найдены специальные жароупорные сплавы для их изготовления, которые не теряют прочности при высоких температурах.

В отличие от паросиловых установок в ГТУ нет громоздкого котла, конденсатора и ряда других вспомогательных устройств. Благодаря этому она имеет относительно малый вес при значительной мощности, что обусловило широкое распространение ГТУ в авиации. Они применяются также на электрических станциях, на судах морского флота, на железнодорожном транспорте (газотурбовозы). Работают ГТУ на естественном горючем газе, на газе, получаемом при подземной газификации угля, на жидком или распыленном твердом топливе. По своей мощности, достигающей 50—60 тыс. кВт, ГТУ уступают крупным паровым турбинам.

Схема ГТУ, совершающей незамкнутый цикл, изображена на рисунке 53. В ее камере сгорания 1 сгорает газообразное или жидкое топливо, подаваемое через форсунку 2 вместе с необходимым количеством воздуха. Газообразные продукты сгорания, имеющие высокую температуру и давление, по трубопроводу 3 направляются на рабочие лопатки газовой турбины 4, приводящей в движение турбокомпрессор 5 и генератор тока 6. Турбокомпрессор сжимает воздух и через трубы регенератора 7 нагнетает его в камеру сгорания. Отработавшие в турбине, еще горячие газы через трубопровод 8 и регенератор 7 выбрасываются в атмосферу. Поэтому цикл, совершаемый ГТУ, является незамкнутым. В регенераторе отработавшие газы омывают сверху трубы, по которым проходит воздух в камеру сгорания 1, и нагревают его.

Следует отметить, что ГТУ имеют высокий КПД, достигающий 65 %. Это объясняется высокой температурой (до 2100°C) рабочего тела (продуктов сгорания) в начале их расширения в турбине.

График разомкнутого цикла ГТУ изображен на рисунке 54, где процессу сжатия рабочего тела (воздуха) компрессором со-

ответствует адиабата ab , его расширению при нагревании в камере сгорания — изобара bc , расширению в турбине — адиабата cd и, наконец, сжатую при охлаждении в холодильнике (в атмосферном воздухе) — изобара da .

К двигателям внутреннего сгорания относятся и авиационные реактивные двигатели, которые разделяются на три вида: 1) прямоточные воздушно-реактивные двигатели (ПВРД), 2) турбореактивные двигатели (ТРД), 3) турбовинтовые двигатели (ТВД).

Наиболее простым из них является ПВРД, схема которого изображена на рисунке 55.

В ПВРД нет никаких движущихся частей, кроме насоса для подачи горючего. При движении ПВРД воздух с большой скоростью втекает через диффузор 1 в камеру сгорания 2, где он насыщается жидким топливом, которое разбрызгивается из форсунки 3. Эта смесь воспламеняется, давая высокую температуру и большое давление. Раскаленные продукты сгорания с избыточным воздухом с большой скоростью выходят через сопло 4 наружу, создавая реактивную тягу, движущую самолет. В неподвижном воздухе ПВРД работать не может, так как у него нет приспособлений для засасывания воздуха. Понятно, что самолет с таким двигателем самостоятельно прийти в движение также не может. Его необходимо предварительно разогнать с помощью добавочного двигателя или забуксировать другим самолетом. При скорости самолета 300 км/ч и выше прямоточный двигатель становится экономичнее всех прочих видов двигателей.

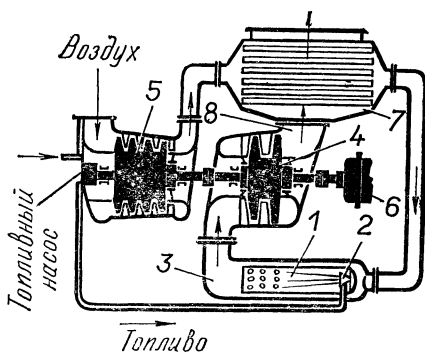


Рис. 53. Схема газотурбинной установки, совершающей разомкнутый цикл.

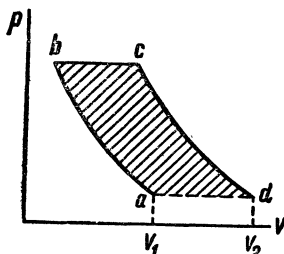


Рис. 54. График разомкнутого цикла ГТУ.

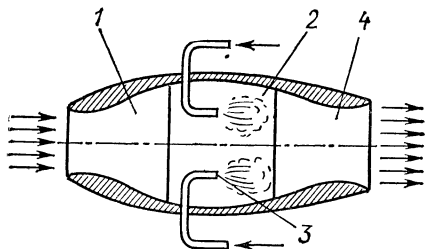


Рис. 55. Схема прямоточного воздушно-реактивного двигателя.

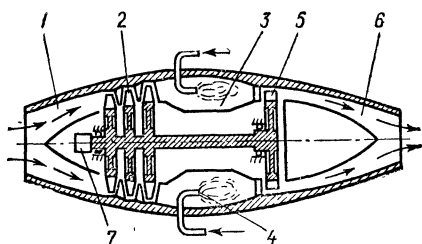


Рис. 56. Схема турбореактивного двигателя.

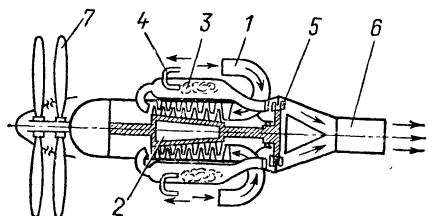


Рис. 57. Схема турбовинтового двигателя.

Основным двигателем для скоростных самолетов является в настоящее время ТРД (рис. 56), который работает так. Воздух втекает в диффузор 1 (воздухозаборник) и попадает на вращающиеся лопатки турбокомпрессора 2, которые сжимают его и отбрасывают в камеры сгорания 3. Сюда через форсунки 4 впрыскивается горючее. Соединяясь с кислородом воздуха, оно воспламеняется. Раскаленные до $1800\text{--}2100^\circ\text{C}$ продукты сгорания поступают на лопатки рабочего колеса турбины 5, приводят его во вращение и выбрасываются через сопло 6 наружу, создавая реактивную тягу, движущую самолет.

Колесо турбины 5 закреплено на одном валу с ротором компрессора 2 и потому приводит его в действие. Чтобы запустить двигатель (раскрутить вал турбины и компрессора), используют небольшой бензиновый мотор 7. Когда скорость вращения вала достигнет 3000 об/мин, включают камеры сгорания и двигатель начинает работать самостоятельно, а пусковой мотор 7 отключается. КПД ТРД достигает 25 %.

В ТВД (рис. 57) имеются такие же части, как и у ТРД: диффузор 1, турбокомпрессор 2, камера сгорания 3, форсунки 4, турбина 5, сопло 6. Однако ТВД снабжен воздушным винтом 7, приводимым в движение, как и компрессор 2, от турбины 5. В ТВД 90 % общей силы тяги обеспечивается винтом 7 и лишь 10 % силы тяги создается за счет реакции вытекающей из сопла 6 газовой струи.

Из всех двигателей реактивные являются наиболее легкими. Так, например, для стационарного ДВС вес, приходящийся на 1 кВт мощности, составляет 1300 Н, для дизеля 100—200 Н, карбюраторного двигателя 70—100 Н, а для ТРД всего 0,07 Н. Именно эта особенность реактивного двигателя создает возможность достигать в авиации огромной скорости, высоты и дальности полета.

§ 4. Получение холода и холодильные машины

Получение холода является важной задачей холодильной техники. Можно было бы перечислить несколько сотен отраслей промышленности, в которых используются низкие температуры. Это прежде всего пищевая промышленность, где холод применяют для сохранения качества скоропортящихся продуктов. В химической промышленности холод помогает производить взрывчатые вещества, красители, добывать кислород и другие газы, выделять из нефти парафин и т. д. В металлообрабатывающей промышленности холод необходим для закалки некоторых изделий, в горной — для замораживания водоносных грунтов (пльвунов) при проходке шахт и туннелей.

Охлаждение тела всегда совершается с помощью теплопередачи от этого тела к рабочему телу (охладителю), имеющему более низкую температуру. При этом последнее или сохраняет свое агрегатное состояние, или из твердого состояния переходит в жидкое, или из жидкого — в парообразное.

Существуют следующие способы получения холода: 1) ледяной, 2) ледосоляной, 3) машинный.

Первый способ используют главным образом для сохранения пищевых продуктов в погребах на льду. Заготовка льда производится зимой, для чего его выкалывают из замерзших рек и других водоемов. Это очень трудоемкая работа, вызывающая большие расходы на перевозку льда в хранилище. Поэтому в настоящее время чаще лед получают путем послойного намораживания воды на специально подготовленных для этого площадках около продуктовых складов.

Установка для ледосоляного охлаждения состоит из большого бака, в который помещают смесь дробленого льда с поваренной солью, насоса и системы трубопроводов. В смеси льда с солью одновременно происходит плавление льда и растворение соли. Оба эти процесса требуют затраты внутренней энергии, которая заимствуется от самой смеси. Поэтому температура образующегося раствора (рассола) оказывается ниже, чем начальная температура соли и льда. Наиболее низкая температура ($-21,2^{\circ}\text{C}$) достигается при добавлении ко льду 30 % (по массе) соли. Из бака холодный рассол нагнетается насосом в трубчатый змеевик, идущий вдоль стен камеры холодильника, а затем вновь возвращается в бак, орошает смесь льда и соли и снова охлаждается.

Ледяной и ледосоляной способ получения холода почти невозможно использовать летом, когда лед в естественных условиях не образуется, а также в южных районах, где настоящей зимы почти не бывает. В этих случаях низкие температуры получают с помощью паровых холодильных машин, действие которых основано на испарении летучих жидкостей при пониженном давлении. На испарение жидкости требуется затрата ее внутренней энергии, которая идет на преодоление сил притяжения меж-

ду молекулами этой жидкости. Поэтому, испаряясь, жидкость охлаждается, отнимая теплоту от окружающей среды.

Используемые в холодильных машинах жидкости называются холодильными агентами. Они должны обладать большой теплотой испарения, быть безвредными для человека, не должны взрываться в смеси с воздухом и вызывать окисление металлов. В качестве холодильного агента используется фреон и газ аммиак, который при нормальной температуре и давлении $8 \cdot 10^5$ Па превращается в жидкость, температура кипения которой при нормальном давлении около -33°C . Так как при испарении жидкого аммиака поглощается большое количество теплоты (1,35 кДж на 1 г), то жидкий аммиак получил широкое применение в холодильном деле для охлаждения продуктовых складов, а также для приготовления искусственного льда.

Аммиачная холодильная машина представляет собой замкнутую систему (рис. 58), состоящую из компрессора 1, конденсатора 2 и испарителя 3, соединенных между собой трубопроводами. Испаритель 3 состоит из змеевика 4, расположенного в сосуде с концентрированным раствором соли. Компрессор 1 через клапан б засасывает из змеевика испарителя 3 парообразный аммиак, сжимает его и через клапан а нагнетает в змеевик конденсатора 2, омываемый снаружи проточной водой. Здесь аммиак отдает некоторое количество теплоты этой воде и сгущается в жидкость. Через регулирующий вентиль 5 жидкий аммиак переходит затем в змеевик 4 испарителя. Благодаря большому объему змеевика 4 жидкий аммиак быстро испаряется, отнимая при этом энергию от соляного раствора. Испарившийся аммиак снова засасывается компрессором 1 через клапан б и таким образом совершает непрерывный круговорот. Заставляя соляной раствор, охлаждаемый в испарителе 3, циркулировать по трубам, проложенным внутри кладовой, где хранятся продукты, можно поддерживать в ней необходимую низкую температуру.

Следовательно аммиак не расходуется, а совершает в холодильной машине обратный цикл (см. с. 46): при испарении жидкий аммиак отнимает от имеющего низкую температуру тела (рассола в испарителе) некоторое количество теплоты Q_1 , а парообразный аммиак, конденсируясь, отдает более нагретому, чем рассол, телу (воде в конденсаторе) количество теплоты Q_2 , причем $Q_2 = Q_1 + A$, где A — работа, совершаемая компрессором.

Подобным же образом действует домашний холодильник (рис. 59), в котором в качестве холодильного

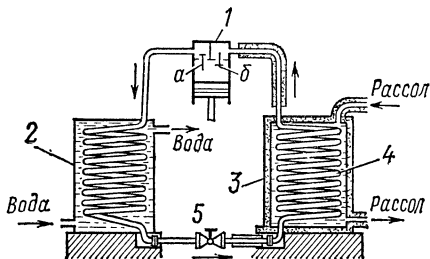


Рис. 58. Схема аммиачной холодильной машины.

агента используется фреон. В испарителе 1 фреон испаряется и отнимает тепло от воздуха и других тел, находящихся в холодильной камере 5 и морозилке 7. Компрессор 2, действующий от электромотора 6, отсасывает пары фреона из испарителя, сжимает их (отчего температура паров повышается) и накачивает в змеевик 3 конденсатора, находящегося вне холодильной камеры 5. Здесь пары фреона охлаждаются окружающим конденсатором воздухом и обращаются в жидкость, после чего поступают через регулирующий клапан 4 в испаритель. Клапан 4 подает в испаритель столько фреона, сколько там может испариться.

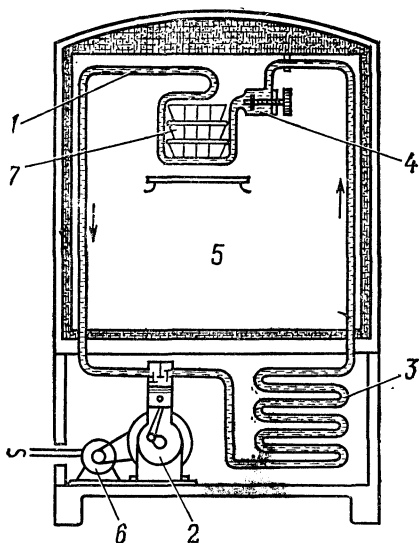


Рис. 59. Схема домашнего холодильника.

Холодильные машины незаменимы при проходке шахт, туннелей, линий метрополитена в водоносных грунтах — пльвунах, когда вода вместе с разжиженной породой заливает горную выработку. Борьбу с пльвунами ведут методом замораживания. С этой целью на расстоянии 1,5 м от контура выработки и на 1—2 м друг от друга бурят скважины и опускают в них замораживающие колонки, которые состоят из двух вложенных одна в другую труб (рис. 60). Мощным насосом во внутреннюю трубу нагнетают раствор хлористого кальция, охлажденный с помощью холодильной машины до -25°C . При обратном движении раство-

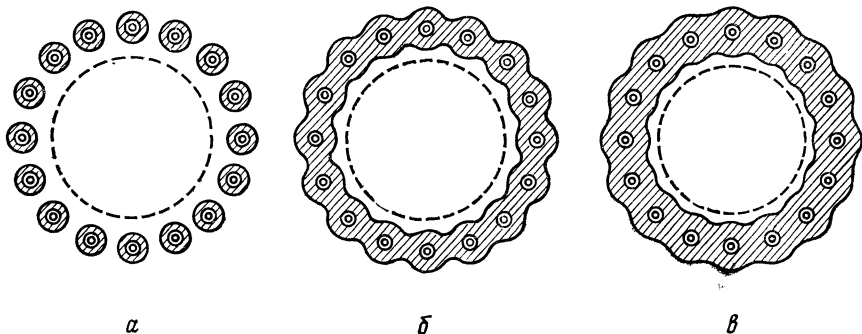


Рис. 60. Замораживание водоносного грунта при проходке шахт: а) через две недели; б) через четыре недели; в) через семь недель.

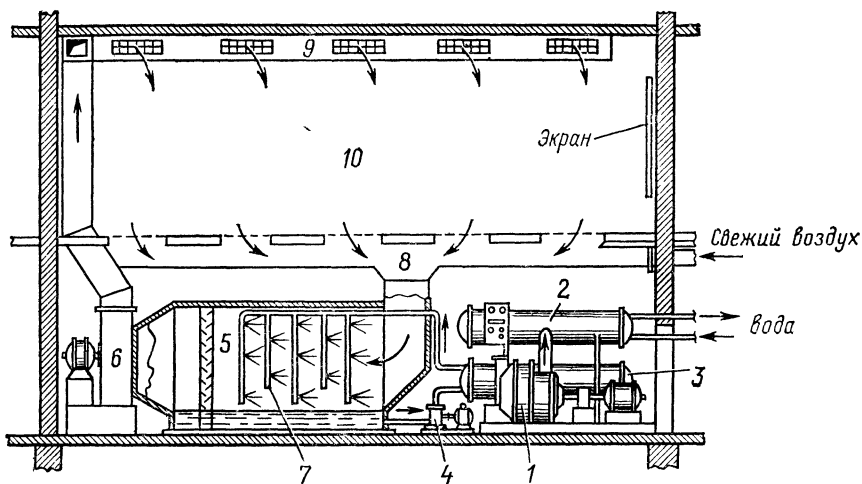


Рис. 61. Кондиционирование воздуха в зрительном зале кинотеатра.

ра по кольцевому пространству между трубами происходит замораживание грунта вокруг колонок. Через 2—3 недели мерзлые участки смежных колонок смерзаются, образуя вокруг выработки ограждение, препятствующее прорыву в нее воды и пльвунов.

Важной задачей холодильной техники является кондиционирование воздуха в театрах, клубах, библиотеках и других общественных зданиях, а также в жилых домах жарких южных районов страны. Кондиционировать воздух — это значит создавать условия, благоприятные для жизни и работы человека, поддерживая в помещении нормальную температуру и влажность.

Схема установки для кондиционирования воздуха в зрительном зале кинотеатра изображена на рисунке 61. Холодильная машина, расположенная в подвале здания, имеет турбокомпрессор 1, конденсатор 2, охлаждаемый водопроводной водой, и испаритель 3. Вода, проходящая через систему труб испарителя, охлаждается в нем до 5°C и насосом 4 нагнетается в камеру воздухоохладителя (кондиционера) 5. Здесь она разбрызгивается форсунками 7, образуя факелы брызг, через которые проходит нагретый воздух из зрительного зала 10, засасываемый в кондиционер через канал 8 мощным вентилятором 6. Охлажденный до 17°C и увлажненный воздух (с добавлением свежего воздуха) тем же насосом 6 нагнетается в зрительный зал через канал 9.

Особенно важную роль играет кондиционирование в пищевой промышленности — в колбасных цехах мясокомбинатов, в бродительных помещениях пивоваренных заводов, в хлебопекарнях для регулирования всхожести теста и т. д. В текстильном производстве, где для выработки тонких сортов пряжи необходим влажный воздух, тоже нельзя обойтись без кондиционирования. Подобные примеры можно было бы умножить.

Широкое применение в современной технике (в частности, для промышленного получения кислорода) имеет жидкий воздух. Чтобы превратить атмосферный воздух в жидкое состояние, его нужно охладить до весьма низкой температуры. Это делается с помощью специальных машин глубокого холода, в которых для охлаждения воздуха используются два способа. Первый из них состоит в том, что воздух сжимают, а затем дают возможность свободно расширяться, выпуская из камеры, в которой он находился, в пустой резервуар. При расширении воздух охлаждается.

Другой в десять раз более эффективный способ получения низких температур заключается в следующем. Сжимают воздух до нескольких десятков или даже сотен атмосфер, а затем при его последующем расширении заставляют совершать работу, например передвигать поршень в цилиндре. На эту работу затрачивается внутренняя энергия воздуха, и потому он охлаждается. Холодильная машина, действие которой основано на этом процессе, называется поршневым детандером.

Поршневые детандеры обладают существенными недостатками: все детали этих установок, использующих воздух высокого давления (трубы, арматура и т. д.), должны иметь громадную прочность. Поэтому для их изготовления приходится затрачивать много высококачественных металлов. Кроме того, очень трудно осуществить смазку движущихся частей поршневого детандера, так как он работает при столь низкой температуре, при которой все смазки замерзают.

Эти трудности были преодолены академиком П. Л. Капицей, который создал высокопроизводительную машину глубокого холода. Основной частью этой машины является небольшая турбина (турбодетандер). Подшипники ротора турбины расположены на значительном расстоянии от ее холодной части, поэтому их смазка осуществляется без труда. В турбине воздух, сжатый всего до $6 \cdot 10^5$ Па, расширяется и совершает работу, вращая ее ротор, благодаря чему охлаждается настолько (до -190°C), что часть воздуха (5—6 %) сжижается. При одинаковой производительности холодильная машина с турбодетандером имеет размеры примерно в 5 раз меньше, чем машина с поршневым детандером.

Схема установки глубокого холода приведена на рисунке 62.

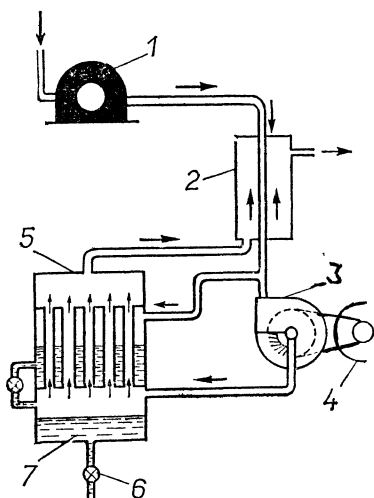


Рис. 62. Машина глубокого холода.

Действует машина так. Турбокомпрессор 1, приводимый в движение электромотором, засасывает атмосферный воздух и сжимает до давления $6 \cdot 10^5$ Па. Поток сжатого воздуха направляется в теплообменник 2 и здесь охлаждается до $-155 \dots -160$ °С за счет холодного воздуха, поступающего из конденсатора 5 и уходящего из установки. Пройдя теплообменник, поток воздуха разделяется на две части. Основная часть попадает в турбодетандер 3, где расширяется и совершает работу — вращает турбину, приводящую в действие электрогенератор 4. При этом воздух охлаждается еще больше и, покидая турбодетандер при температуре $-185 \dots -187$ °С, направляется в конденсатор 5.

Второй поток воздуха из теплообменника поступает прямо в конденсатор, проходя при этом между трубок, через которые движется более холодный воздух из турбодетандера. Расширяясь и охлаждаясь в междутрубном пространстве конденсатора, некоторая часть сжатого воздуха превращается в жидкость 7 и сливается через кран 6 в резервуар сжатого воздуха. Основное же количество воздуха, не превращенное в жидкое состояние, направляется из конденсатора в теплообменник 2, где отдает свой холод новым партиям сжатого воздуха, идущего из турбокомпрессора 1 в детандер 3 и конденсатор 5.

Жидкий воздух представляет собой прозрачную светло-голубую жидкость, имеющую очень низкую температуру кипения (-193 °С при нормальном давлении). Хранят жидкий воздух в открытых сосудах с двойными теплоизолирующими стенками, из пространства между которыми насосом выкачан воздух. Теплота, притекающая из окружающей среды, идет на испарение жидкого воздуха, благодаря чему его температура остается равной примерно -190 °С до тех пор пока он полностью не испарится. Если сосуд с жидким воздухом плотно закрыть пробкой, давление паров и температура жидкости в сосуде будет повышаться. Когда температура станет критической (-140 °С), весь жидкий воздух превращается в газ, а когда она сравняется с температурой наружного воздуха, давление в сосуде возрастает до $8 \cdot 10^7$ Па и его разорвет на куски.

Жидкий воздух производится в больших количествах, так как его применяют во многих отраслях техники, особенно там, где нужны очень низкие температуры. Вот один из примеров его использования в машиностроении. Чтобы насадить стальной диск турбины на ось, его нагревают. От этого отверстие в диске увеличивается и он легко надевается на ось, а при охлаждении плотно ее охватывает. Однако нагревание огромного колеса турбины — это сложная операция, которая может привести к его искривлению и ухудшению механической прочности. Гораздо легче, как это делают теперь, охладить жидким воздухом сравнительно тонкую ось турбины. От этого диаметр оси резко уменьшается, она свободно входит во втулку колеса; через некоторое

время температура оси повышается и, расширившись, она прочно соединяется с диском.

Жидкий воздух является основным продуктом для получения широко используемого в технике жидкого кислорода. Для этого служит ректификационный аппарат, представляющий собой металлическую колонну, разделенную по вертикали сетчатыми перегородками. Стекая с одной сетки на другую, жидкий воздух испаряется, причем входящий в его состав жидкий азот испаряется более интенсивно, чем жидкий кислород, так как температура кипения первого на 13°C ниже, чем у второго. Поэтому жидкий воздух постепенно разделяется на составные части: газообразный азот выходит через верх ректификационной колонны, а жидкий кислород накапливается на дне.

В технике кислород используют для разных целей как в жидком, так и в газообразном состоянии. Жидкий кислород, в частности, применяют для взрывных работ. С этой целью к месту работы доставляют поглотитель, т. е. вещество, богатое углеродом (сажу, размельченный уголь и др.), наполняют им картонные патроны и пропитывают жидким кислородом. Затем патроны вставляют в пробуренные в горной породе скважины и поджигают специальным капсюлем. При этом поглотитель мгновенно соединяется с кислородом, образуя большое количество газообразных продуктов сгорания: происходит взрыв, по своей силе не уступающий взрыву пороха.

Газообразный кислород получают посредством испарения жидкого, затем его сжимают до $1,5 \cdot 10^7$ Па, накачивают в стальные баллоны емкостью 40—60 л и доставляют их к месту потребления.

Особенно широко газообразный кислород применяют для сварки и резки металлов. Когда топливо сгорает в воздухе, большая часть выделяющейся теплоты бесполезно тратится на нагревание азота, который составляет $\frac{4}{5}$ атмосферного воздуха. Гораздо интенсивнее и полнее идет горение в чистом кислороде. Например, при сжигании в кислороде горючих газов — водорода, метана, ацетилена — развивается весьма высокая температура (свыше 3000°C), при которой плавятся самые ту-

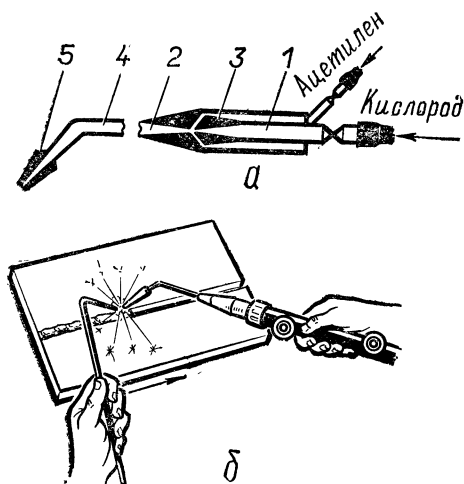


Рис. 63. Схема кислородно-ацетиленовой: а) сварочной горелки; б) газовой сварки.

гоплавкие металлы. Поэтому металлические предметы сваривают с помощью пламени горящего в кислороде ацетилена, используя для этого особую кислородно-ацетиленовую горелку.

Сварочная горелка (рис. 63, а) представляет собой прибор для образования горючей смеси ацетилена с кислородом и регулирования интенсивности пламени. Кислород поступает в сужающийся канал-инжектор 1, а из него с большой скоростью вытекает в смесительную камеру 2, создавая у ее входа большое разрежение. Благодаря этому в камеру 2 через канал 3 засасывается ацетилен. Образующаяся горючая смесь по трубке накопника 4 подается к мундштуку 5, около которого воспламеняется и горит. Кислород и ацетилен доставляют к месту сварки в стальных баллонах под большим давлением. Перед поступлением в горелку давление обоих газов с помощью особых приборов, называемых редукторами, снижают до $3 \cdot 10^5$ — $4 \cdot 10^5$ Па.

Сварку осуществляют так (рис. 63, б). Кромки свариваемых листов зачищают и сближают, оставляя между ними зазор в 2—3 мм, а затем прогревают пламенем горелки. Под действием высокой температуры края листов оплавляются и при остывании соединяются в одно целое. В пламя горелки обычно вводят металлический пруток, который тоже плавится, давая дополнительное количество металла для заполнения щели между листами.

Кислород используют также для резки металлов. Приспособление для резки металлов (резак) в отличие от сварочной горелки имеет дополнительный канал, через который подводится чистый кислород. Когда пламя газовой горелки раскалит небольшой участок металлической детали, в резаке открывают этот канал и к раскаленному металлу идет узкая струя кислорода, в которой металл плавится и быстро сгорает, образуя узкую щель, разделяющую деталь на две части.

Кроме ручных газовых резаков, существуют автоматические газорезные машины, разрезающие огненной струей на части огромные стальные слитки толщиной до 1 м и вырезающие из толстых металлических листов сотни одинаковых деталей сложной формы.

Широко используется также газопламенная очистка стальных слитков, которые нередко имеют на своей поверхности небольшие трещины, раковины и другие поверхностные дефекты. Нагретая добела стальная болванка, прежде чем попасть на вращающиеся валки прокатного стана, охватывается со всех сторон десятками кислородных струй, причем тонкий раскаленный недоброкачественный слой сгорает в атмосфере кислорода. В одну минуту таким способом очищают до 20 погонных метров болванки.

Газовая резка незаменима при проведении подводных работ — подъеме затонувших судов, разборке упавших в воду сложных мостовых ферм и т. д. В таких случаях используют специальные резаки, создающие воздушный пузырь, защищающий от

воды факел пламени и место разреза. Наконечник такого резака имеет три круглых concentрически расположенных отверстия. Через центральное отверстие подается струя режущего кислорода, через среднее — кислородно-ацетиленовая горючая смесь, через наружное — сжатый воздух, образующий защитный пузырь вокруг пламени. С помощью подводной газовой резки подняты многие тысячи тонн нужного стране металла.

Задачи

1. Определить КПД паровой машины, если она расходует для 1 кВт мощности в 1 ч 2,1 кг угля с теплотой сгорания $3,12 \cdot 10^7$ Дж/кг.

2. Площадь сечения поршня паровой машины 100 см², ход поршня 50 см. Пар поступает в цилиндр под давлением $2 \cdot 10^5$ Па и расширяется в нем изобарно. Какую мощность развивает машина, когда вал ее делает 240 об/мин?

3. Почему при трогании с места и на подъеме паровозы работают с малой отсечкой пара или даже вовсе без отсечки?

4. Обод рабочего колеса — диска паровой турбины имеет диаметр 1 м и делает 30 000 об/мин. Чему равна сила упругости, удерживающая на ободе каждый грамм его массы?

5. Каховская ГЭС имеет среднюю мощность $P = 250\,000$ кВт. Какое количество угля нужно было бы сжигать ежедневно, чтобы развить такую же мощность с помощью паровых турбин, имеющих КПД 25%? Теплоту сгорания угля принять равной $3 \cdot 10^7$ Дж/кг.

6. Прямоточный воздушно-реактивный двигатель при скорости полета 2000 км/ч расходует 4 кг керосина в 1 с и развивает мощность 44 000 кВт. Найти КПД двигателя, если теплота сгорания керосина равна $4,62 \cdot 10^7$ Дж/кг.

7. Можно ли второй такт двигателя внутреннего сгорания (сжатие) считать происходящим по закону Бойля—Мариотта? Ответ пояснить.

8. ДВС имеет КПД, равный 20%, и развивает мощность 36,8 кВт. Определить количество керосина с теплотой сгорания $4,6 \cdot 10^7$ Дж/кг, сжигаемого в цилиндре двигателя за 1 ч.

9. Сколько бензина должен затратить ДВС, приводящий в действие насос, который нагнетает 200 м³ воды на высоту 30 м? КПД всей установки (ДВС и насоса) 15%. Теплота сгорания бензина $4,6 \cdot 10^7$ Дж/кг.

Ответы

$$1. \eta = \frac{Nt}{mg}, \eta = 5,5\%. \quad 2. N = \frac{2npSl}{60}, N = 8 \text{ кВт.}$$

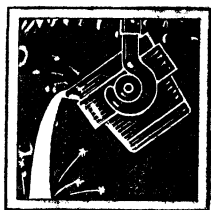
3. После отсечки пара его давление падает вследствие расширения. Поэтому для получения большей силы давления, необходимой при трогании с места, пар подается в цилиндр под полным (или почти полным) котельным давлением.

$$4. v = \frac{2\pi rn}{60}, v = 1570 \text{ м/с}; \quad F = \frac{mv^2}{r}, F = 4930 \text{ Н.}$$

$$5. m = \frac{Pt}{\eta q}, m = 2860 \text{ т.} \quad 6. \eta = \frac{N}{mq}, \eta = 24\%.$$

7. Нет. Закон Бойля—Мариотта характеризует изменение состояния данной массы газа при неизменной температуре, а в двигателях быстрое сжатие газа всегда сопровождается его нагреванием.

$$8. m = \frac{Nt}{\eta q}, m = 14,3 \text{ кг.} \quad 9. m_1 = \frac{mgh}{\eta q}, m_1 = 8,5 \text{ кг.}$$



ПЛАВЛЕНИЕ И ОТВЕРДЕВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ

Г Л А В А V

§ 1. Плавка металлов

В твердом кристаллическом теле частицы (атомы и молекулы) занимают такое положение, при котором их потенциальная энергия минимальна. Если нагревать твердое кристаллическое тело (например, металл), то при определенной температуре, называемой температурой плавления, скорости частиц становятся так велики, что кристаллическая решетка разрушается — частицы покидают свои места, тело плавится, т. е. переходит в жидкое состояние. Подводимая при этом к телу теплота целиком идет на увеличение потенциальной энергии частиц. Средние скорости частиц все время, пока продолжается плавление, остаются неизменными, а поэтому остаются постоянными их кинетическая энергия и температура тела.

Количество теплоты, необходимое для того, чтобы 1 кг кристаллического вещества при температуре плавления превратить в жидкость той же температуры, называют удельной теплотой плавления.

Если жидкость отдает теплоту окружающей среде, то ее температура падает. Когда она достигнет температуры плавления, начинается процесс кристаллизации, в течение которого теплота плавления выделяется из жидкости в окружающее пространство, а температура вещества остается постоянной до тех пор, пока все оно не затвердеет. Таким образом, для каждого кристаллического вещества температуры плавления и отвердевания постоянны и одинаковы.

При плавлении и отвердевании плотность, теплопроводность, электропроводность и другие физические свойства тел резко изменяются. Например, хлористый натрий в твердом состоянии — изолятор, а в жидком хорошо проводит электрический ток,

При плавлении объем большинства кристаллических тел увеличивается, а при отвердевании уменьшается. Поэтому при отвердевании большинства тел, расплавленных и налитых в какую-нибудь форму, в верхних частях отливки образуются пустоты — так называемые усадочные раковины. Чтобы избежать этого, у отливочной формы делают специальный придаток (прибыль), куда наливается излишний металл, который втягивается в форму при отвердевании. Немногие вещества, такие, например, как вода, чугун, висмут и некоторые другие, представляют собой исключение из общего правила: они при отвердевании расширяются.

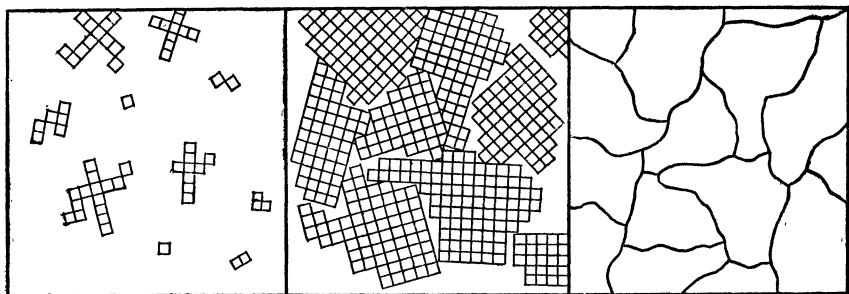
Плавление металлов играет огромную роль в технике. Оно широко применяется для извлечения металлов из руд для очистки (рафинирования) металлов от примесей, приготовления сплавов и подготовки металлов для последующего литья.

Все металлы являются кристаллическими веществами, частицы которых (атомы, молекулы, ионы) располагаются в строго определенном геометрическом порядке, образуя кристаллическую решетку. Любой металл состоит из огромного числа беспорядочно сросшихся друг с другом мельчайших кристалликов — зерен, выделяющихся из расплавленного металла при его отвердевании.

Различить внутреннее строение, или, как говорят, структуру, металла можно с помощью микроскопа или даже лупы. Для этого металлическую пластинку тщательно шлифуют и полируют, а затем подвергают травлению, т. е. смачивают в течение 2—3 мин кислотой. Различные зерна разъедаются кислотой неодинаково, и поэтому после травления на поверхности пластинки (шлифа) выступают грани отдельных кристаллов, хорошо видные в микроскоп.

В жидкий металл неизбежно попадают пылинки, капельки другой жидкости, пузырьки воздуха и другие посторонние включения. Как правило, при остывании металла вокруг этих мельчайших частичек начинают группироваться его атомы, образуя сразу очень много зародышей будущих кристаллов. Все они растут одновременно и вырастают в маленькие кристаллики. Например, в железе при отвердевании возникают кристаллики в виде кубиков (рис. 64, а). Увеличиваясь, эти кристаллики встречаются и начинают теснить друг друга. В месте их соприкосновения рост кристаллов прекращается, а с других сторон они продолжают расти (рис. 64, б). Поэтому их правильная форма искажается и в застывшем металле получаются не правильные многогранники, а кристаллиты или зерна различных размеров и формы (рис. 64, в). Однако в каждом зерне атомы металла располагаются в определенном порядке, образуя кристаллическую решетку.

В 70-х годах прошлого века русский ученый Д. К. Чернов впервые в истории науки сделал вывод, что свойства стали зависят от ее внутренней структуры, т. е. от взаимного расположения



а

б

Рис. 64. Последовательные стадии отвердевания чистого металла:
 а) образование зародышей кристаллов, б) растущие кристаллы теснят друг друга,
 в) полное отвердевание металла.

Зерна имеют неправильную форму.

атомов и от размеров и формы кристаллических зерен. Так, например, крупнозернистая сталь всегда бывает менее прочной, чем мелкозернистая. Чернов показал также, что термическая обработка (закалка и отпуск) и механическая обработка (ковка, прокатка, волочение и т. д.) влияют на структуру стали и, следовательно, на ее физические свойства. Подобные изменения структуры и свойств стали происходят при определенных температурах, которые зависят от ее состава, и прежде всего от содержания углерода в ней. Эти температуры Чернов назвал критическими точками «а» и «б».

Чернов исследовал закалку стали. Так называют нагревание и последующее быстрое охлаждение ее в воде или масле, в результате которого сталь становится твердой, малопластичной и хрупкой. Оказалось, что сталь закаляется только в том случае, если нагреть ее до точки «а» (около 700 °С) или выше. Если температура нагревания ниже этого предела, сталь вообще «не принимает» закалки.

Чернов изучил и режим ковки: стальной слиток надо нагреть до температуры 1200—1250 °С и, когда сталь станет пластичной, ковать ее до тех пор, пока она не остынет до точки «б» (800—850 °С). При высоких температурах сталь имеет крупнозернистое строение, и если ковку закончить не в точке «б», а допустим, при 1000 °С, крупные зерна останутся нераздробленными и сталь получится непрочная.

Открытия Чернова, позволившие ученым и инженерам управлять изменением структуры, а значит, и свойств металла, были сделаны задолго до создания теории строения кристаллов. В настоящее время с помощью микроскопа, рентгеновских лучей и других точных методов структуры стали и их превращения хорошо изучены. Выяснено, в частности, что при закалке стали обра-

зуется мартенсит, т. е. зерна игольчатого строения. Он-то и придает стали очень высокую твердость и хрупкость после закалки.

При медленном охлаждении стали получается другая структура, при которой сталь имеет невысокую твердость и сравнительно легко поддается обработке резанием.

Для устранения хрупкости закаленной стали ее обычно подвергают отпуску, т. е. снова нагревают до 200—600 °С, а затем охлаждают. При этом мартенсит распадается и из него выделяется смесь частиц почти чистого железа — феррита и химического соединения железа с углеродом — цементита. Чем выше температура отпуска, тем крупнее образующиеся кристаллы феррито-цементитной смеси и тем более мягкой и вязкой становится сталь.

Инструментальная сталь (для зубил, отверток, пил, резцов и т. д.) нагревается при отпуске обычно до 200 °С — при этой температуре твердость снижается мало, но хрупкость устраняется в значительной степени.

Отпуск стальных пружин и некоторых штампов производят при температуре до 400—500 °С — при этом твердость заметно снижается и сталь становится пластичной.

Конструкционные стали, из которых делают ответственные детали автомобилей, тракторов, самолетов, после закалки подвергают «высокому» отпуску, нагревая до 550—650 °С. Благодаря этому сталь приобретает благоприятные сочетания прочности и пластичности. Детали, изготовленные из такой стали, долговечны.

Первыми материалами, которые использовались древними людьми для изготовления орудий труда и оружия, были камень и дерево, глина и кость. Позже человек познакомился с металлами, и прежде всего с медью, которая встречается в земле в виде самородков.

Значительным событием в развитии первобытной техники было открытие бронзы — сплава меди с оловом, который более прочен и удобен для литья, чем медь. Уже 5000 лет назад наши предки изготавливали из бронзы самые разнообразные предметы: ножи и топоры, пилы и косы, гвозди и рыболовные крючки, долота и мечи, украшения и многое другое.

Прошло несколько тысячелетий, прежде чем люди научились выплавлять еще более прочный металл — железо, и «бронзовый» век сменился «железным». Сначала железо получали с помощью примитивных глиняных горнов (рис. 65), которые заполняли чередующимися слоями железной руды и древесного угля. Через эти слои с помощью длинных трубок продували необходимый для горения угля воздух. Когда руда раскалялась, входящий в ее состав кислород соединялся с углеродом и железо восстанавливалось, образуя губчатую массу, называемую крицей. Чтобы вытеснить из крицы неметаллические включения, ее проковывали затем молотом.

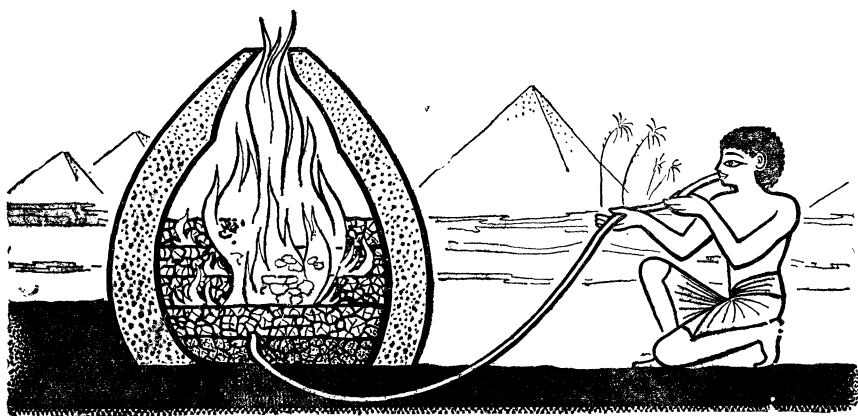


Рис. 65. Древний глиняный горн для получения железа,

Увеличение потребности человеческого общества в железе привело к созданию больших плавильных печей, в которых дутье осуществлялось с помощью воздуходувных кожаных мехов. Нередко в таких печах под действием высокой температуры железо расплавлялось и перенасыщалось углеродом, образуя хрупкое вещество — чугун. Лишь постепенно люди научились из чугуна получать железо и сталь. Возник процесс двойного передела (руды в чугун и чугуна в сталь), который приобрел современный вид к середине XVIII в.

В земной коре железо встречается только в виде различных соединений с кислородом, кремнием, серой и т. д. Важнейшими железными рудами, из которых выплавляется железо, являются магнитный железняк (Fe_3O_4), красный железняк (Fe_2O_3) и бурый железняк ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).

Получение железа основано на восстановлении оксидов железа углем. Но так как расплавленное железо растворяет уголь, то при выплавке получается не чистое железо, а сплав, содержащий до 5 % углерода, называемый чугуном.

Выплавляется чугун в огромных доменных печах или домнах (рис. 66). Самая нижняя часть 1 домны называется горном. Выше него расположена коническая расширяющаяся вверх часть печи — заплечики 2. Еще выше находится самая широкая цилиндрическая область домны — распар 3 и наконец коническая шахта 4. Наверху шахты имеется отверстие (колошник 5), которое закрывается металлическим конусом — колошниковым затвором 6.

Домну загружают послойно шихтой, состоящей из руды, кокса * и флюсов (известняка и некоторых других веществ). Все эти

* Кокс получают в особых коксовых печах путем нагревания каменного угля без доступа воздуха.

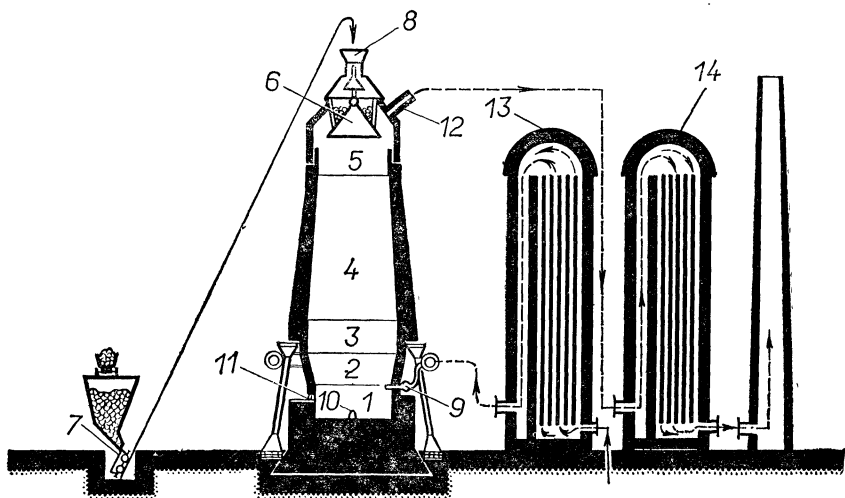
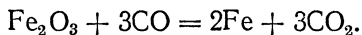


Рис. 66. Схема доменной печи.

материалы поднимают скипом 7 на верхнюю площадку домны и сваливают в чугунную воронку 8. При опускании затвора 6 смесь попадает в домну.

Необходимый для горения кокса воздух нагнетают в трубу, опоясывающую нижнюю часть печи, а из нее по изогнутым трубкам через специальные отверстия — фурмы 9 — в горн. В горне кокс сгорает, образуя оксид углерода (IV) (углекислый газ), который, поднимаясь вверх и проходя через слой накаливаемого кокса, превращается в оксид углерода (II). Он и восстанавливает руду, переходя снова в оксид углерода (IV). Реакция восстановления происходит главным образом в верхней части шахты и выражается формулой



Содержащиеся в руде пустая порода и зола, образующаяся от сгорания кокса, соединяются с флюсами и образуют жидкие шлаки. Выделяющееся железо еще в твердом виде опускается в более горячую часть печи — распар, здесь оно при температуре 1200°C плавится и частично растворяет уголь, превращаясь в чугун, который стекает в нижнюю часть горна. Более легкие жидкие шлаки собираются на поверхности чугуна, предохраняя его от окисления. Чугун выпускают из домны через отверстие (летку) 10, а шлаки — через летку 11. В остальное время летки забиты глиной. По мере опускания слоев руды и кокса в домну добавляют новые порции кокса и шихты.

Расплавленный чугун из домны поступает в разливочную машину для получения чугунных слитков или в чугуновозный

ковш, в котором его перевозят в сталелитейный цех для переработки в сталь. Такой ковш вмещает до 125 т чугуна. Внутри он выложен огнеупорным кирпичом и хорошо сохраняет тепло, что позволяет держать в нем жидкий чугун в течение многих часов и транспортировать на большое расстояние.

Когда оксид углерода (IV), образующийся при восстановлении руды, поднимается в верхнюю часть домы, некоторое его количество снова превращается в оксид углерода (II). Поэтому выходящие из газоотвода 12 доменные газы содержат до 25 % CO. Их сжигают в высокой цилиндрической башне (каупере 14), сложенной из кирпича, имеющей внутри вертикальные каналы, стенки которых накаляются. Одновременно через другой каупер 13 пропускают вдуваемый в дому воздух, накаленный ранее таким же способом. В каупере он нагревается, что повышает КПД домы. Затем воздух направляют в каупер 14, а каупер 13 нагревают доменными газами и т. д.

Полученный из доменных печей чугун идет для отливки машинных станин, маховых колес, плит, канализационных труб и т. д. Из него получают также сталь — сплав железа с 0,3—2 % углерода, играющий огромную роль в современной технике.

Существуют два основных способа выплавки стали из чугуна: бессемеровский и мартеновский, получившие это название по имени их изобретателей Бессемера и Мартена. Оба способа основаны на окислении содержащихся в чугуне примесей.

Бессемеровский способ состоит в том, что в огромный, грушевидный, выложенный изнутри огнеупорным кирпичом сосуд — конвертер, покоящийся на цапфах и обращенный кверху отверстием (рис. 67), заливается жидкий чугун, а через каналы в дне конвертера нагнетается воздух. Кислород воздуха, проходя через раскаленный жидкий чугун, окисляет углерод и другие примеси, содержащиеся в чугуне, и превращает его в сталь с нужным содержанием углерода. Выжигаемые примеси переходят в шлак. После продувки, продолжающейся 8—10 мин, конвертер поворачивают на цапфах и выливают жидкую сталь в подведенный ковш.

Бессемеровский способ обладает некоторыми недостатками: вследствие интенсивного продувания воздуха через расплавленный чугун сгорают не только примеси, но и часть металла. Кроме того, в сталь попадает часть шлаков, которые остаются в ней, понижая ее качество.

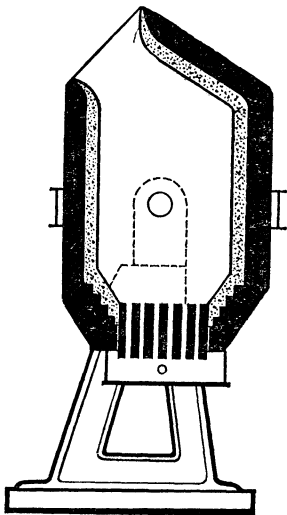


Рис. 67. Схема конвертера.

Более совершенной является переработка чугуна в сталь в мартеновских печах. Основная часть такой печи (рис. 68) состоит из выложенной огнеупорным кирпичем камеры *A*, в которой происходит весь процесс изготовления стали. В передней части камеры имеются окна для загрузки шихты, а в задней на уровне пода — отверстие (летка) для выпуска металла и шлака. Печь снабжена также регенераторами *I—IV*, т. е. камерами, заполненными сложенным в клетку огнеупорным кирпичом, и системой боровов *1—5* с перекидными клапанами *б*.

В печь *A* загружают шихту, т. е. доставленный из домны жидкий чугун, железный лом и руду, флюсы и другие вещества, необходимые для получения стали нужного качества. В печь через боров *2* и регенератор *II* поступает также горючий газ, а через боров *1* и регенератор *I* — необходимый для горения этого газа воздух. Предварительно регенераторы *I* и *II* нагревают до высокой температуры. Поэтому горючий газ и воздух в них нагреваются до 1000—1200 °С, а под сводами печи газ сгорает при температуре около 1800 °С. Под влиянием высокой температуры шихта плавится, углерод и другие примеси соединяются с кислородом поступающего в печь воздуха и выгорают. Образуется сталь нужного химического состава.

Раскаленные продукты сгорания из печи *A* попадают в регенераторы *III* и *IV* и, нагревая их, охлаждаются, после чего через боров *5* выходят в дымовую трубу. Затем перекидные клапаны *б* переводят в положение, показанное на рисунке 68 пунктиром. Теперь горючий газ и воздух будут поступать в печь *A* через боров *3* и *4* и раскаленные регенераторы *III* и *IV*, а продукты сгорания станут нагревать регенераторы *I* и *II* и т. д.

После окончания очередной плавки жидкую сталь выпускают из печи *A* через летку в ковш, а затем разливают по формам (изложницам), из которых получают готовые слитки. В настоящее время большинство мартеновских печей оборудовано приборами, автоматически регулирующими варку стали и переключающими клапаны *б*. Емкость мартеновских печей достигает 300 и более тонн. Область применения различных сортов стали очень

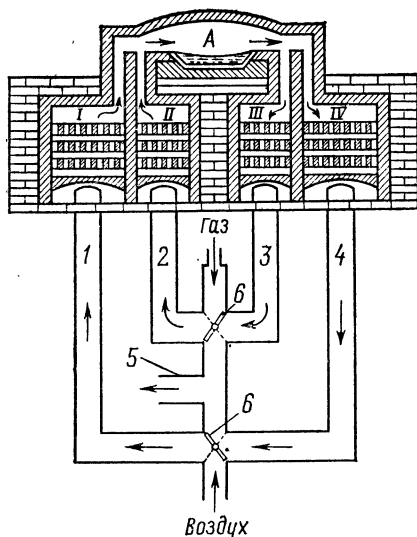


Рис. 68. Схема мартеновской печи:
I—IV — регенераторы; *1—5* — боровы;
б — перекидные клапаны.

велика. Из нее делают рельсы, рессоры, режущие инструменты, паровые котлы, коленчатые валы, лопатки турбин и многие другие ответственные детали машин.

Чистые, т. е. не содержащие в себе никаких примесей, металлы не обладают достаточно высокой прочностью. Поэтому в технике главным образом используются их сплавы — сложные вещества, образованные сплавлением двух или более металлов, а также металлов с различными неметаллами.

Добавка к чистому металлу других элементов часто резко меняет его свойства. Этим пользуются в металлургии, создавая сплавы с нужными для техники свойствами. Так, добавка хрома к никелю повышает электрическое сопротивление последнего в десятки раз и делает его более стойким против окисления при высоких температурах. Поэтому сплавы никеля с хромом используются для изготовления спиралей накаливания в электрических печах.

Сплав всегда прочнее, чем чистые металлы, входящие в его состав. Например, сталь, содержащая всего 0,2 % углерода, в 2 раза прочнее, чем чистое железо, а дюралюминий — сплав алюминия с 7 % меди, магния и марганца в 3—4 раза прочнее, чем чистый алюминий.

Прибавляя к железу 36 % никеля, получают сплав, который почти не расширяется при нагревании. Такой сплав используется в точном приборостроении (например, для изготовления часовых пружин, длина которых при изменении температуры должна оставаться неизменной). Если увеличить количество никеля до 50 %, температурный коэффициент расширения сплава делается равным коэффициенту расширения стекла. Из этого сплава делают контакты, которые впаивают в стеклянные баллоны электроламп и кинескопов.

В машиностроении и теплотехнике большую роль играют легкоплавкие сплавы, обладающие малым коэффициентом трения, например баббит (сплав олова с медью и сурьмой). Из баббита делают вкладыши подшипников скольжения. Вкладыш — это широкое кольцо, образующее внутреннюю поверхность подшипника, на которую опирается шейка вала машины. При недостаточной смазке подшипника в результате нагревания баббит из него выплавляется, так что машину (трактор, станок и т. д.) приходится останавливать, но зато шейка вала остается неповрежденной. После замены вкладыша машину снова запускают. При твердом вкладыше (например, из бронзы) его перегрев мог бы привести к порче вала — основной части машины.

Самым важным сплавом в технике, бесспорно, является сталь. Сплавления сталь с никелем, хромом, марганцем и другими металлами, получают так называемые легированные стали, обладающие твердостью, упругостью, вязкостью, жаростойкостью, кислотупорностью и другими ценными качествами.

Меняя весовое количество составных частей, можно получать сплавы с разными температурами плавления, причем у большин-

ства сплавов (хотя и не у всех) температура плавления бывает ниже, чем у самого легкоплавкого из образующих сплав чистых металлов.

Особенно интересен в этом отношении сплав Вуда, состоящий из одной части кадмия, одной части олова, двух частей свинца, четырех частей висмута; ни одна из его составных частей не имеет точки плавления ниже 230 °С, а между тем сплав превращается в жидкость уже при 71 °С. Из этого сплава можно сделать чайную ложку, похожую по внешнему виду на оловянную, но воспользоваться ею для размешивания горячего чая нельзя, так как она плавится и собирается на дне стакана в виде блестящей капли жидкого металла.

§ 2. Литье металлов

Литейное производство — это получение фасонных отливок с помощью заливки жидкого металла (сплава) в формы. Роль литья в современном машиностроении очень велика. Около 40 % (по массе) деталей к машинам и механизмам и до 80 % к металлообрабатывающим станкам изготавливают способом литья. Литьем можно получить детали любой формы и массы — от нескольких граммов до сотен тонн с толщиной стенок от десятых долей миллиметра до нескольких метров.

Литье является очень древним способом обработки металлов. Как показывают археологические раскопки, еще 7000 лет назад в Египте и Вавилоне получали бронзовые отливки в каменных формах. Высокохудожественные литые изделия для украшения домов, храмов и дворцов изготавливали древние греки и римляне.

В Древней Руси русские мастера из меди отливали стрелы, наконечники копий, котлы, ступы и многие другие изделия, а позднее в Московском государстве — медные и чугунные пушки. Наиболее ценные образцы русского литейного искусства были выполнены мастерами А. Чоховым, отлившим в 1586 г. знаменитую Царь-пушку (около 40 т), и И. Ф. и М. И. Маторинными, отлившими в 1735 г. не менее известный Царь-колокол (около 200 т). Непревзойденной по своим художественным достоинствам отливкой является бронзовый памятник Петру I в Ленинграде, имеющий толщину стенок в верхней части всего 7,5 мм.

Наиболее распространенным литейным сплавом является чугун. Отливки из чугуна составляют около 75 % (по массе) от общего количества отливок из всех других сплавов, что объясняется дешевизной и простотой их изготовления.

Заготовка расплавленного чугуна для литья производится в вагранке (рис. 69), представляющей собой цилиндрическую шахтную печь диаметром до 3 м и высотой до 5 м. Снаружи она имеет кожух 1, сделанный из стальных листов и выложенный внутри огнеупорным кирпичом. Сверху через завалочное окно 2 вагранку послойно заполняют шихтой, т. е. топливом (коксом),

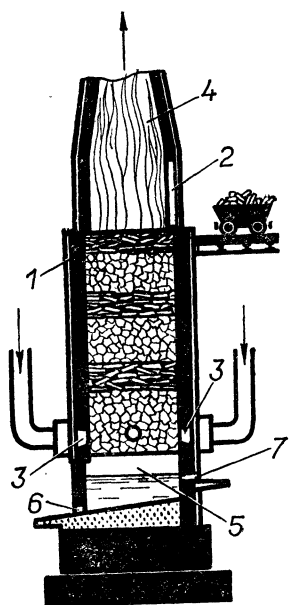


Рис. 69. Схема вагранки.

чугунными чушками, железным ломом и флюсом, состоящим из известняка и некоторых других веществ. Через отверстия 3, называемые фурмами, в вагранку специальным вентилятором вдувают нагретый воздух, необходимый для горения кокса. При сгорании кокса чугун плавится и перегревается выше температуры плавления (1150 °С) — до 1400—1450 °С, что придает ему хорошие литейные свойства и предохраняет от преждевременного застывания при разливке в формы. Образующиеся газы выходят через дымовую трубу 4. На 1 т годного литья расходуется около 270 кг кокса.

Расплавленный чугун собирается в нижней части печи — горне 5, заполненном коксом, который поддерживает всю массу шихты, но в процессе горения не участвует. (На рис. 69 этот кокс не изображен.) В определенные моменты чугун через лотку 6 выливается в ковш, а из него попадает в раз-

ливочные формы. Примеси, загрязняющие металл, соединяются с флюсами, образуя шлак, который удаляется из печи через лотку 7 и используется в качестве строительного материала или сырья для производства цемента.

Для отливки какой-нибудь детали сначала изготавливают из дерева или металла ее модель (копию). С помощью модели в формовочной земле, состоящей из смеси песка, глины и некоторых связующих веществ, образуют полость (форму), отображающую внешние очертания отливаемой детали. Внутренние же углубления, впадины и отверстия получают при помощи стержней, которые тоже изготавливают из формовочной земли и укрепляют в этой полости.

Если деталь отливают из чугуна, размеры модели делают немного больше размеров готовой отливки, так как при отверждении и последующем охлаждении чугунной отливки ее объем уменьшается. Чтобы упростить расчеты, в таких случаях, изготавливая модель, измерения производят «усадочным метром», который несколько длиннее нормального.

Если конфигурация отливки простая, модель делают цельной. Для больших и сложных отливок модель делают разъемной (рис. 70, а) из двух половин 1 и 2, которые соединяют между собой шипами 3. Выступы 4 образуют в форме углубления для установки стержня 5; в свою очередь, стержень образует в отливаемой детали отверстие.

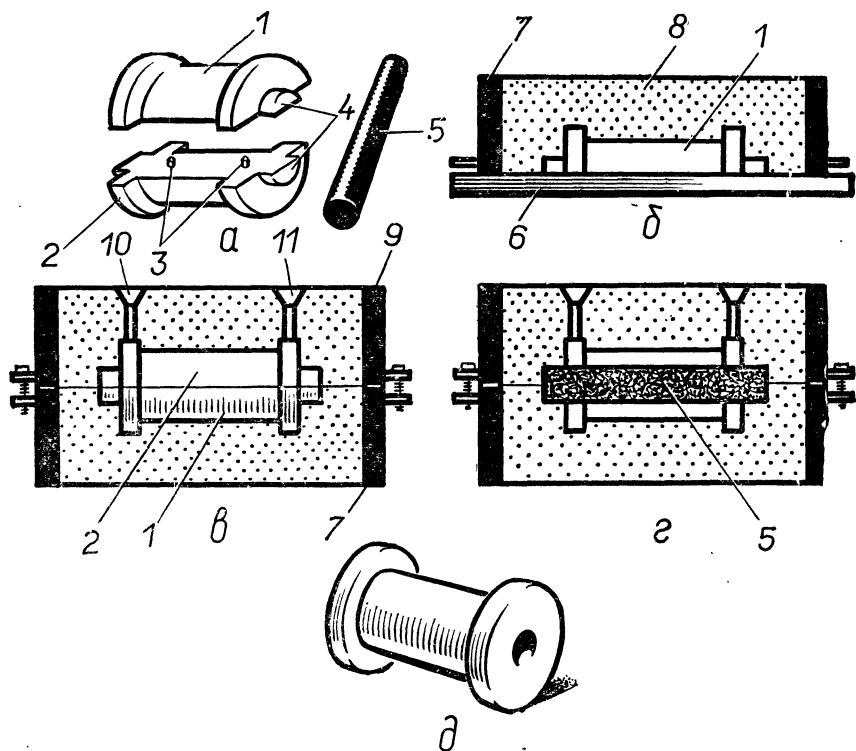


Рис. 70. Получение отливки:

а) модель; б, в) образование формы в опоках; г) готовая форма; д) готовая отливка.

Изготовление формы начинают с того, что на плиту 6 (рис. 70, б) кладут половину 1 модели и ставят опоку 7, т. е. деревянный или металлический ящик без дна (опока не дает форме развалиться). Затем в опоку насыпают и утрамбовывают формовочную землю 8. После этого опоку 7 вместе с плитой 6 переворачивают на 180°, плиту снимают, на опоку 7 ставят другую опоку 9 и скрепляют их штырями (рис. 70, в). С помощью шипов половину 1 модели скрепляют с половиной 2, опоку 9 заполняют формовочной землей и уплотняют ее.

Далее в запрессованную массу вводят деревянные конусообразные стержни 10 и 11 (см. рис. 70, в), чтобы получить на их месте каналы литника и выпора. Первый из них служит для заливки в форму жидкого металла и задержки шлака, второй — для удаления из нее газов. Изготовление формы заканчивается тем, что опоки разбирают, удаляют из них модель, в образовавшейся полости устанавливают стержень 5 и снова собирают (рис. 70, г).

Затем через литник 10 в форму заливают жидкий металл, который ее всю заполняет, а его избыток выходит в канал выпо-

ра 11. После застывания отливки форму разрушают (поэтому ее называют разовой), извлекают из нее отливку, сбивают окалину, срезают приливы металла, застывшие в канале литника и выпора, и подвергают механической обработке. Окончательный вид отливки показан на рисунке 70, д.

Изготовление разовых форм в литейном производстве требует большой затраты труда. Гораздо более производительным и дешевым является литье в постоянную металлическую разъемную форму, так называемый кокиль. Для такого литья не нужна формовочная земля, причем в одной и той же форме можно получать тысячи отливок с чистой и точной поверхностью, которая в ряде случаев не требует дополнительной механической обработки.

Разновидностью кокильного литья является литье под давлением и центробежное. При первом из этих способов жидкий металл заливается в металлическую форму под большим давлением, достигающим нередко 10^8 Па. Благодаря этому металл заполняет все мельчайшие неровности формы, что обеспечивает исключительную чистоту и точность отливки. Металл приобретает плотную однородную структуру без малейших газовых включений.

При центробежном литье металл заливают в быстро вращающуюся форму, благодаря чему он отбрасывается к стенкам формы, плотно к ним прижимается и хорошо уплотняется, образуя после отвердевания отливку. Газы, шлаки и другие неметаллические включения вытесняются более плотным жидким металлом к центру отливки, откуда их легко удалить. Этим способом изго-

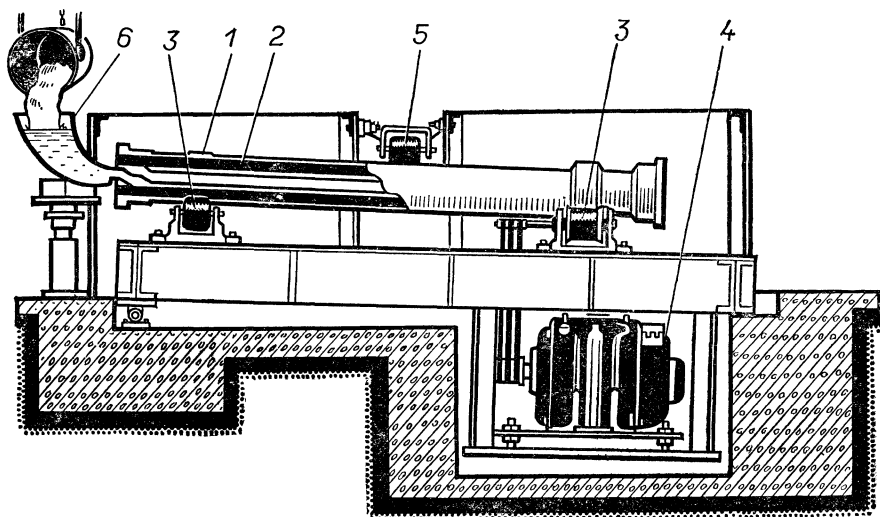


Рис. 71. Схема машины для центробежного литья.

товляют трубы, маховики, диски, барабаны и другие отливки, имеющие оси симметрии.

На рисунке 71 изображена машина для центробежного литья труб. Она состоит из стальной формы 1, выложенной внутри огнеупорным кирпичом 2. Форма опирается на две пары опорных роликов 3 и приводится во вращение электродвигателем 4, расположенным под машиной. Нажимной ролик 5 служит для устранения вибрации формы. Жидкий металл заливается через лоток 6.

Центробежное литье отличается большой производительностью, а его стоимость в 4—5 раз меньше литья в земляные формы.

Для получения длинных отливок с постоянным профилем сечения применяют способ непрерывного литья. Основной частью машины для непрерывного литья (рис. 72) является кристаллизатор, представляющий собой пустотелую втулку 1, охлаждаемую непрерывно циркулирующей в ее полости водой. С нижней стороны в кристаллизатор вставляют «затравку», т. е. железный стержень нужного сечения и асбестовую пробку, запирающую кристаллизатор снизу. Другой конец затравки пропускают между прокатными вальцами 2. В верхнюю часть кристаллизатора заливают жидкий металл. Попадая в кристаллизатор, он затвердевает в первую очередь вокруг затравки, температура которой значительно меньше, чем у жидкого металла. Когда уровень металла дойдет до верха кристаллизатора, включают электродвигатель, вращающий вальцы. Последние вытягивают затравку, а вместе с ней и затвердевший слиток. Постепенно подливая во втулку жидкий металл и непрерывно вытягивая слиток, можно получить цилиндрическую отливку любой длины. Таким же способом, изменяя форму кристаллизатора и затравки, получают трубы и другие отливки удлиненной формы с различными сечениями.

Способ непрерывной разливки металла обеспечивает широкую механизацию и автоматизацию литейного производства и позволяет избежать целого ряда трудоемких операций: разливки стали в формы (изложницы), выгрузки из них слитков, привозки и повторного разогревания слитков и т. д.

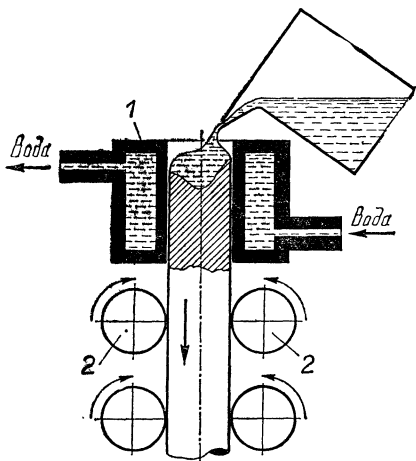


Рис. 72. Схема непрерывного литья.

Задачи

1. Сколько потребуется каменного угля, чтобы расплавить 2000 кг серого чугуна, взятого при температуре 50°C ? Тепловая отдача вагранки 60%. Удельная теплоемкость и удельная теплота плавления серого чугуна равны соответственно $c=5,4 \cdot 10^2$ Дж/(кг \cdot $^\circ\text{C}$); $\lambda=9,6 \cdot 10^4$ Дж/кг.

2. В плавильной печи для нагревания 300 кг меди от 13 до 1083°C (температура плавления) израсходовали 43,1 кг каменного угля с теплотой сгорания $3 \cdot 10^7$ Дж/кг. Определить КПД печи. Удельная теплоемкость меди $4 \cdot 10^2$ Дж/(кг \cdot $^\circ\text{C}$).

3. В нефтяном горне получен жидкий алюминий при температуре плавления 660°C . Начальная температура металла 10°C . Расход нефти составил $k=12\%$ от массы расплавленного алюминия. Определить тепловую отдачу горна. Удельная теплоемкость, удельная теплота плавления алюминия и теплота сгорания нефти соответственно равны $c=8,8 \cdot 10^2$ Дж/(кг \cdot $^\circ\text{C}$), $\lambda=3,8 \times 10^5$ Дж/кг, $q=4,62 \cdot 10^7$ Дж/кг.

4. При 0°C взяты одинаковые объемы свинца и олова. В каком отношении находятся количества теплоты, нужные для обращения этих металлов в жидкое состояние?

5. Железный ящик (снеготоп) содержит 1 т снега. Какое количество дров необходимо израсходовать, чтобы обратить этот снег в воду, если температура воздуха -8°C , а вытекающая из снеготопы вода имеет температуру $+3^\circ\text{C}$? КПД снеготопы 30%, теплота сгорания дров $1,25 \cdot 10^7$ Дж/кг.

Ответы

$$1. m_1 = \frac{m[\lambda + c(t - t_0)]}{\eta q}, \quad m_1 = 77 \text{ кг.} \quad 2. \eta = \frac{mc(t_1 - t)}{m_1 q}, \quad \eta = 10\%.$$

$$3. \eta = \frac{\lambda + c(t - t_0)}{kq}, \quad \eta = 17\%. \quad 4. \frac{Q}{Q_1} = \frac{\rho(\lambda + ct)}{\rho_1(\lambda_1 + c_1 t_1)}, \quad \frac{Q}{Q_1} = 0,93.$$

$$5. m_1 = \frac{m(\lambda + ct + c_1 t_1)}{\eta q}, \quad m_1 = 97 \text{ кг.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

История развития теплотехники насчитывает всего три столетия. За этот сравнительно короткий исторический срок в использовании энергии топлива в практических целях достигнут большой прогресс. Ценой самоотверженного труда многих поколений ученых и инженеров, техников и рабочих созданы различные типы тепловых двигателей, улучшены их технические характеристики, во много раз возросла мощность тепловых агрегатов.

Невиданных размеров достигла выплавка черных и цветных металлов, обжиг керамических изделий, применение теплоты в химической промышленности и в сельском хозяйстве. Учеными-теплотехниками и инженерами решены многие весьма трудные задачи, связанные с использованием теплоты, выделяемой в атомных реакторах, с термической изоляцией космических кораблей, охлаждением ракетных двигателей и т. д.

Не менее сложные проблемы предстоит преодолеть и создателям новой техники, которая требует совершенствования тепловых двигателей — увеличение их мощности, экономичности, долговечности, уменьшение веса, приходящегося на единицу мощности. КПД лучших современных тепловых двигателей (за исключением газовой турбины) не превышает 40—42 %. Следователя или в цилиндре ДВС, 60 т теряется, бесполезно рассеиваясь в окружающем пространстве. Увеличение КПД тепловых двигателей даже на 1 % в масштабе всей страны дало бы громадную экономию топлива и расходов на его добычу и транспортировку.

В настоящее время свыше 90 % энергии человечество получает при сжигании топлива, запасы которого неуклонно сокращаются. Между тем в распоряжении человеческого общества имеются огромные, практически неисчерпаемые запасы геотермальной энергии и энергии излучения Солнца. Однако в направлении использования этих видов энергии техника сделала еще только первые робкие шаги. Создание мощных, высокоэкономичных геотермальных и солнечных двигателей и нагревателей — одна из трудных, но очень важных задач будущего.

Не менее важной и сложной задачей является овладение неисчерпаемыми запасами энергии термоядерного синтеза гелия из тяжелого водорода — дейтерия.

В целях экономии нефти и угля в нашей стране начато строительство атомных станций для теплофикации городов; энергия таких станций будет применяться для отопления жилищ и в технологических процессах промышленных предприятий. Наши ученые работают над созданием атомных реакторов с температурой газов до 1000 градусов. В подобных реакторах нуждается химическая и металлургическая промышленность, использующая высокотемпературные процессы.

Кроме этих проблем первостепенной важности, теплотехнике предстоит решить целый ряд других задач. Это и создание мощных установок для непосредственного превращения энергии топлива в электрическую энергию и для отопления жилых зданий за счет охлаждения наружного воздуха, это и получение новых термостойких материалов для изготовления лопаток газовых и паровых турбин и оболочек космических кораблей и многое другое, вплоть до управления погодой и изменения климата Земли.

На решение этих задач направлена деятельность советских ученых — физиков и химиков, механиков и термодинамиков, специалистов по атомной физике и оптике, горняков и металлургов, теоретиков и практиков. В решении этих проблем несомненно примут участие и молодые ученые и инженеры ближайшего будущего — нынешние школьники, в том числе и читатели этой книги.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Источники теплоты	5
§ 1. Топливо	—
§ 2. Энергия излучения Солнца	13
§ 3. Геотермальные источники	15
§ 4. Ядерное горючее	19
Глава II. Теплообмен	24
§ 1. Виды теплообмена и его регулирование	—
§ 2. Котельные агрегаты и тепловые установки	31
Глава III. Расширение тел от нагревания	37
§ 1. Учет и использование теплового расширения	—
§ 2. Расширение и сжатие газов и паров	43
Глава IV. Тепловые машины	48
§ 1. Паровые машины	—
§ 2. Паровые турбины	54
§ 3. Двигатели внутреннего сгорания	63
§ 4. Получение холода и холодильные машины	71
Глава V. Плавление и отвердевание кристаллических тел	80
§ 1. Плавка металлов	—
§ 2. Литье металлов	89
Заключение	94

Борис Феофанович Билимович

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТЕХНИКЕ

Редактор *Л. С. Мордовцева*. Художник *С. Ф. Лухин*. Художественный редактор *В. М. Прокофьев*. Технические редакторы *Н. А. Киселева* и *И. В. Квасницкая*. Корректор *О. В. Ивашкина*

ИБ № 3359

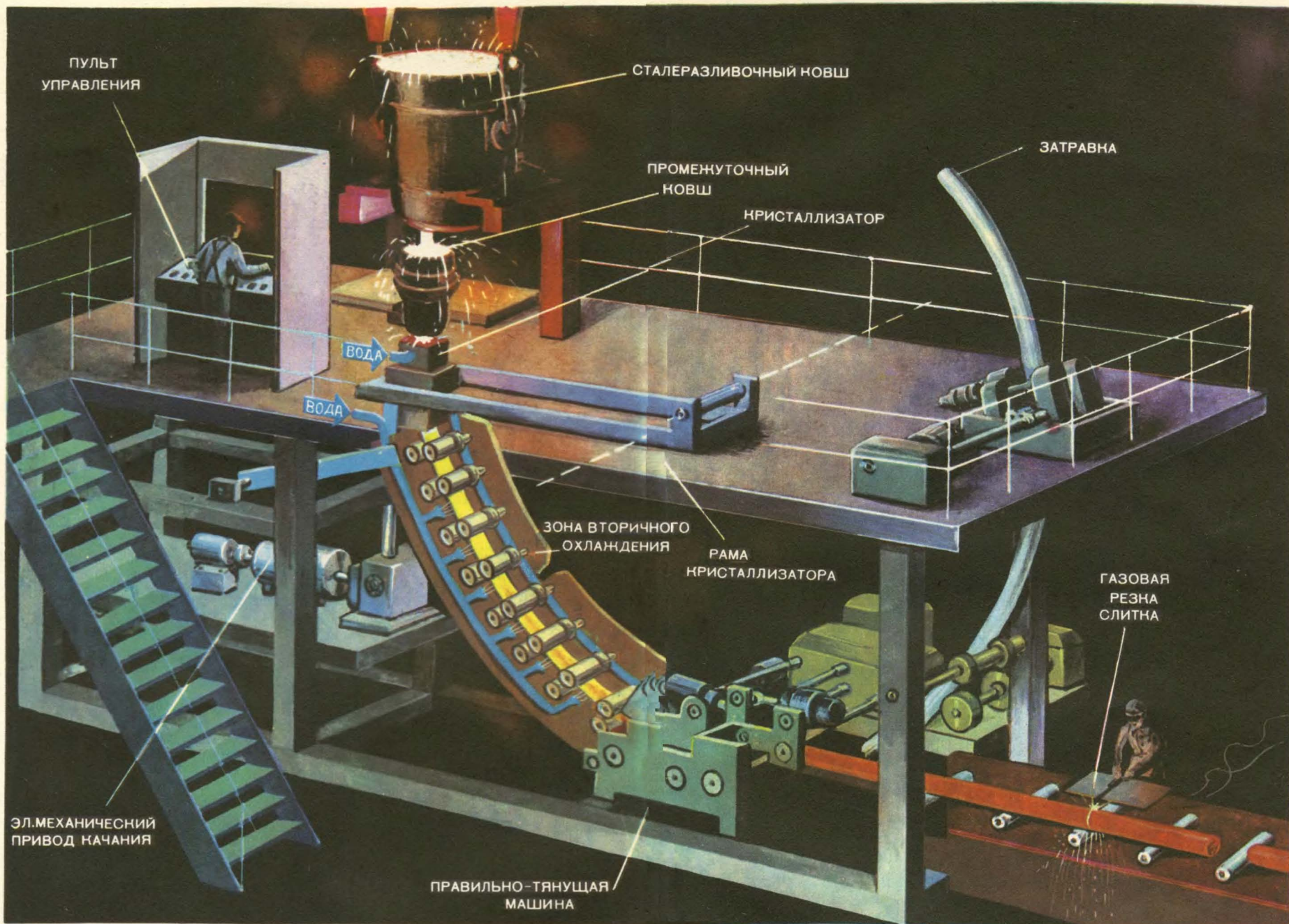
Сдано в набор 05.02.80. Подписано к печати 05.11.80. А 14158. 60×90¹/₁₆. Бум. типограф. № 2. Гарн. литерат. Печать высокая. Усл. печ. л. 6 + вкл. 0,25. Уч.-изд. л. 6,33 + вкл. 0,27. Тираж 100 000 экз. Заказ 456. Цена 20 к.
Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41. Полиграфкомбинат им. Я. Коласа, 220005, Минск, Красная, 23.



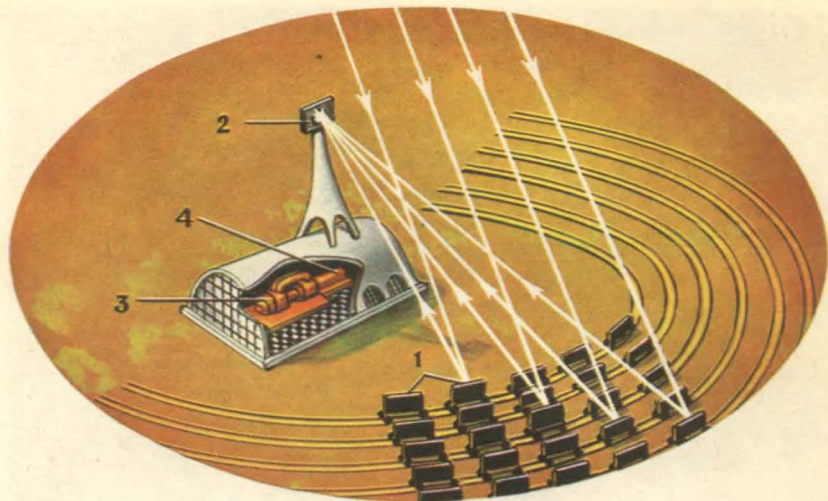
1. Первобытный лес каменноугольного периода.



2. Разработка каменного угля открытым способом.

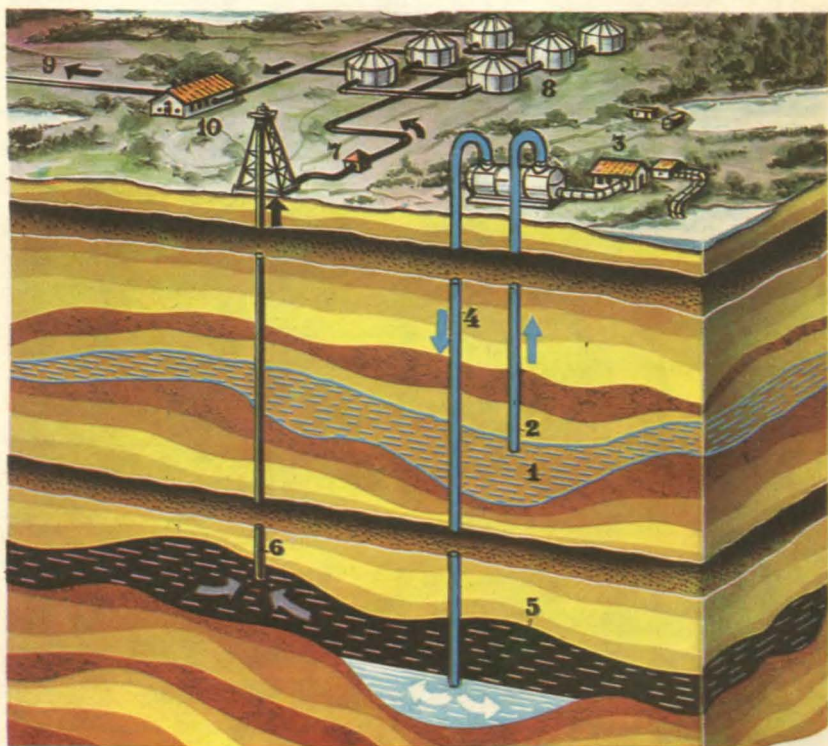


3. Установка для непрерывной разливки стали.



4. Проект мощной гелиоэлектрической станции:

1 — зеркала; 2 — паровой котел; 3 — паровая турбина; 4 — электрогенератор.



5. Схема добычи нефти способом законтурного заводнения.

1 — водоносный слой; 2, 4, 6 — скважины; 3, 7, 10 — насосные станции; 5 — нефтяной пласт; 8 — цистерны; 9 — магистральный трубопровод.

Б.Ф.БИЛИМОВИЧ

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТЕХНИКЕ

