В. А. КИРИЛЛИН и А. Е. ШЕЙНДЛИН

Водяной пар в энергетике

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1953 ЛЕНИНГРАД

В книге рассказывается об устройстве современных электрических станций, предназначенных для получения электрической энергии из тепла, образующегося при сжигании топлива. Дается представление о значении таких электрических станций для дальнейшего развития промышленности, сельского хозяйства и культуры нашей страны. Приводится описание современных паровых котлов и паровых турбин, рассказывается о том, как они работают. Объясняется та исключительно большая роль, которую играет водяной пар при получении электрической энергии из тепла. Дается описание свойств водяного пара, поясняется, почему в последние годы особо широкое применение получил водяной пар, имеющий высокие давление и температуру.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, в том числе на учащихся старших классов средней школы.

Редактор *Л. П. Комаров* Техн. редактор *К. П. Воронин*

Сдано в набор 30/XI 1953 г. Подписано к печати 22/XII 1953 г.
Т-09826 Бумага 84×108$^{1}/_{32}$=4,92 печ л. Уч.-изд. л. 5,5
Тираж 10 000 экз. Цена 2 р. 75 к. Зак. № 396

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

Введение

Название этой книжки покажется может быть для некоторых читателей удивительным. Разве есть какая-нибудь необходимость, — спросят они, — писать в настоящее время книги о водяном паре? Разве теперь, в эпоху электричества, радио, авиации, применение водяного пара в технике не является давно пройденным этапом? Нередко можно даже услышать суждения о том, что примитивные и устаревшие машины, работающие на водяном паре, давно уже вытеснены более совершенными электрическими машинами. Те, кто высказывает подобные утверждения, даже и не предполагают, насколько глубоко они ошибаются. Быстрое развитие электротехники, радиотехники, авиации, всей новейшей техники не только не исключает использования водяного пара и паровых двигателей, но, наоборот, предполагает дальнейшее их широкое применение.

Возникает справедливый вопрос: в каких же отраслях промышленности водяной пар имеет широкое применение? Ведь хорошо известно, что подавляющее большинство используемых на заводах и фабриках машин и станков от самых маленьких, вроде электрических швейных машин или токарных станков, применяемых при изготовлении часов, и до самых крупных, вроде сталепрокатных станов или мощных грузоподъемных кранов и экскаваторов, имеют электрический привод, т. е. приводятся в движение с помощью одного, нескольких, или весьма большого количества электрических двигателей. Хорошо известно также, что наземный транспорт во многих случаях обходится без использования паровых машин. За последние годы все бóльшее развитие получает автомобильный транспорт, используемый в настоящее время не только для местных, но и для дальних перевозок. Но автомобиль приводится в движение с помощью так называемого двигателя внутреннего сгорания, т. е. двигателя, работающего на бензине или каком-либо

ином, обычно жидком, топливе и не использующего водяной пар. Даже в железнодорожном транспорте, где долгое время безраздельно господствовал паровоз, за последнее время все более широкое применение получает электровоз. Что касается воздушного транспорта, авиации, то здесь единственными двигателями, получившими широкое распространение, являются обычный двигатель внутреннего сгорания, имеющий много общего с автомобильным двигателем, и появившийся сравнительно недавно особый вид двигателя внутреннего сгорания — реактивный двигатель. Наконец, хорошо известно, что в современном водном транспорте наряду с паровыми двигателями также широко используются двигатели внутреннего сгорания.

В свете всех приведенных фактов читатель имеет полное основание спросить: почему же мы утверждаем, что в настоящее время для промышленности и транспорта водяной пар имеет исключительное значение?

Суть дела заключается в следующем. Жизнь современного общества нельзя себе представить без широкого использования электричества. Касается ли то промышленности, транспорта или быта, — электричество везде является незаменимым. В нашей стране, в сельском хозяйстве которой широко применяется современная техника, электричество быстро внедряется и в сельскохозяйственное производство. Использование электричества оказывается очень выгодным и удобным. Электрическую энергию можно передавать на очень большие расстояния порядка тысячи и более километров. В настоящее время передача электрической энергии производится по металлическим проводам, но можно надеяться, что в дальнейшем удастся осуществить такую передачу даже и без проводов. Электрическую энергию можно передать сколь угодно большому числу потребителей, не прибегая при этом к сложным и громоздким устройствам. Представим себе, например, что требуется привести в действие несколько десятков различных металлообрабатывающих станков (токарных, фрезерных, сверлильных и др.) большого механического цеха современного завода. Если все эти станки приводятся в действие с помощью электричества, т. е. снабжены нужным количеством электрических двигателей, то дело решается очень просто: достаточно только соединить каждый из станков металлическими проводами с источником тока.

Совсем иначе обстояло бы дело, если бы станки приводились в действие без помощи электричества. В этом случае

пришлось бы либо иметь для каждого станка специальное устройство для привода его в действие — двигатель, например паровую машину, либо приводить в действие все станки от одного двигателя, например паровой машины, с помощью специальных механических передач. Именно так и поступали в прошлом веке, до того как электричество нашло себе широкое применение. Можно представить себе, насколько это было неэкономично и громоздко. При использовании для привода в действие каждого станка или группы станков специальной паровой машиной, не говоря уже о высокой стоимости такой машины, приходилось каждую из них соединять металлическими трубами для подачи пара — паропроводами — с паровым котлом, в котором производился пар. При приводе в действие станков от общей паровой машины приходилось сооружать громоздкие и неудобные ременные передачи. Применение электричества во много раз упростило дело.

Удобство использования электрической энергии заключается также в том, что применить электричество можно для самых различных целей. С помощью электричества можно привести в действие различные станки и машины фабрик и заводов, о чем только что шла речь. С помощью электричества можно заставить двигаться поезда, трамваи, троллейбусы. С помощью электричества можно привести в действие сельскохозяйственные машины. Электричество можно использовать для нагрева сталеплавильных печей и для химического производства. Телеграф, телефон, радио основаны на использовании электричества. Без электрического освещения трудно представить себе жизнь современного общества.

Но для получения электрической энергии необходимы мощные, построенные по последнему слову современной техники, электрические станции. Современные электрические станции делятся на два основных типа: гидравлические, или гидростанции, преобразовывающие энергию рек (так называемый белый уголь) в электрическую энергию, и тепловые электростанции, использующие для получения электрической энергии тепло, образующееся в результате сжигания различных топлив. Бóльшую часть электрической энергии получают на тепловых электрических станциях. Вот здесь-то и находит широкое применение водяной пар, приводящий в действие мощные двигатели современных электростанций — паровые турбины. В свою очередь, паровая

турбина приводит в действие электрический генератор, являющийся источником тока.

В странах, имеющих много заводов и фабрик, оснащенных технически совершенными машинами, иначе сказать в промышленно развитых странах, потребляется очень большое количество электрической энергии. Следовательно, в таких странах необходимо иметь большое число мощных электрических станций. По выработке электрической энергии, по числу и технической оснащенности электрических станций или, как говорят, по уровню развития энергетики Советский Союз является наиболее передовой страной.

Строительство новых электростанций и линий электропередачи, электрификация промышленности, транспорта, сельского хозяйства, городов и сел России начала осуществляться сразу же после Великой Октябрьской социалистической революции. Уровень развития промышленности предреволюционной России был весьма низким. Некоторые отрасли промышленности вообще отсутствовали, другие были развиты очень слабо. В частности, не производились вовсе автомобили и тракторы, станки, электродвигатели. Низкому уровню развития промышленности царской России соответствовал и весьма низкий уровень развития энергетики. В 1913 г. на электростанциях России было выработано менее 2 миллиардов киловаттчасов электроэнергии; общая мощность всех электростанций лишь немного превышала 1 миллион киловатт. В том же 1913 г. по выработке электроэнергии Россия занимала среди всех стран мира 15-е место.

Уже в 1920 г., в то время когда армия рабочих и крестьян с оружием в руках защищала завоения Великой Октябрьской социалистической революции, было положено начало колоссальной работе по электрификации России.

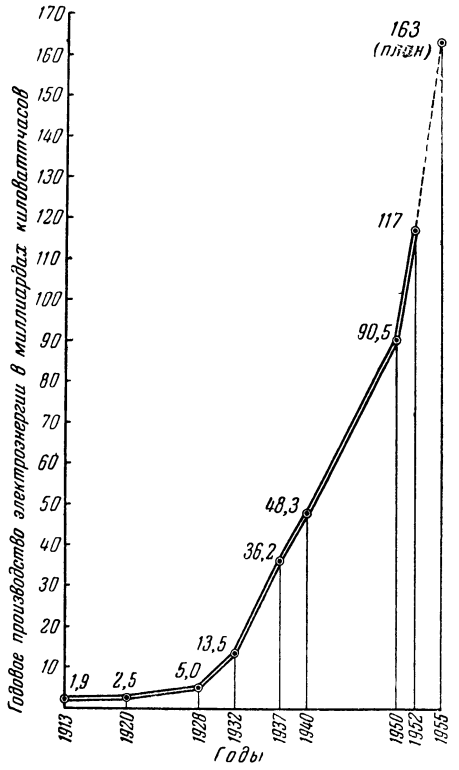
По предложению В. И. Ленина была организована Государственная плановая комиссия по электрификации России под председательством Г. М. Кржижановского, получившая название Комиссии ГОЭЛРО. В задачу Комиссии входило составление плана электрификации страны на ближайшие 10—15 лет. Менее чем через год работа по составлению плана была закончена. Предложения Комиссии ГОЭЛРО были изложены в книге «План электрификации России», изданной в 1920 г. в Москве.

Тираж книги был невелик — всего 1 500 экземпляров. Поэтому на титульном листе ее было написано:

«Ввиду крайней незначительности числа экземпляров этой книги убедительно просят товарищей, получивших ее, передать книгу по прочтении в местную библиотеку, чтобы по этой книге могли учиться рабочие и крестьяне».

Исключительную важность поставленной задачи — электрификации страны за короткий срок — В. И. Ленин с предельной ясностью сформулировал в знаменитых словах, произнесенных им в докладе на VIII Всероссийском съезде Советов в 1920 г.: «Коммунизм это есть советская власть плюс электрификация всей страны».

План ГОЭЛРО предусматривал сооружение в течение 10—15 лет 30 новых, крупных электрических станций с общей мощностью в 1 миллион 750 тысяч киловатт и с выработкой электроэнергии 8,8 миллиарда киловаттчасов в год. Осуществление плана ГОЭЛРО давало увеличение годового производства электрической энергии по сравнению с 1913 г. более чем в 5 раз.



Фиг. 1. Рост производства электрической энергии в Советском Союзе.

Многие иностранные газеты того времени называли план ГОЭЛРО фантастическим, лишенным реальной основы. Но уже через десять лет этот исторический план был выполнен по всем основным показателям.

В годы предвоенных пятилеток энергетическое строительство производилось еще более быстрыми темпами. На фиг. 1 показано увеличение выработки электрической энергии. В 1940 г. электростанциями Советского Союза произведено

48,3 миллиарда киловаттчасов электроэнергии, т. е. примерно в 25 раз больше, чем в 1913 г. За это время в Советском Союзе были построены первоклассные электрические станции, оснащенные новейшим оборудованием.

Война с гитлеровскими захватчиками задержала развитие энергетики. Но благодаря исключительно высоким темпам восстановительных работ и большому строительству в послевоенные годы довоенный уровень развития энергетики был превзойден уже в 1947 г. Темпы роста энергетики за годы послевоенных пятилеток еще более высоки. В результате грандиозного энергетического строительства производство электроэнергии в 1952 г. более чем в 60 раз превысило уровень 1913 г.

Установленные на наших электрических станциях современные мощные и быстроходные паровые турбины имеют очень мало общего с применявшимися ранее паровыми двигателями. Мощность современных паровых турбин является поистине колоссальной. Ленинградский металлический завод имени И. В. Сталина выпускает паровые турбины мощностью 150 тысяч. киловатт. Мощность одной такой турбины равна мощности 4 000 автомобилей «Победа» и более чем в 2 раза превышает мощность всей Волховской гидростанции. Всего 7 таких машин могли бы обеспечить всю выработку электроэнергии дореволюционной России. Но и эта мощность не является предельной. В настоящее время конструкторская мысль работает над созданием еще более мощных паровых турбин. Стремление к увеличению мощности паровых турбин является вполне естественным: грандиозные планы строительства могут быть претворены в жизнь только путем установки мощных, бесперебойно работающих двигателей.

Энергетика Советского Союза отличается от энергетики капиталистических стран, в том числе и наиболее развитых, не только исключительно высокими темпами развития и совершенством оборудования, устанавливаемого на электрических станциях. Плановое развитие советской энергетики, возможное только лишь в социалистическом государстве, позволяет сжигать в топках котлов, электрических станций в основном только такое топливо, которое мало пригодно или даже вовсе непригодно для других целей: для получения из него керосина и бензина, для выплавки стали и т. д. Кроме того, сами электрические станции стараются расположить в районах добычи топлива, например торфа, бурого

угля или каменного угля, избегая тем самым дорогостоящих дальних перевозок.

Другой очень важной особенностью советской энергетики является строительство таких тепловых электрических станций, которые предназначены для снабжения потребителя не только электрической энергией, но и теплом для отопления, производственных и бытовых нужд. Электрические станции, вырабатывающие и электрическую энергию, и тепло, именуются теплоэлектроцентралями или, коротко, ТЭЦ. Строительство таких станций является наиболее целесообразным и выгодным.

Если современные паровые двигатели существенно отличаются от своих предшественников, то и сам водяной пар, работающий в этих двигателях, далеко не тот пар, который применялся в паровых машинах на заре их развития. Пар современных тепловых двигателей это пар высокого давления и температуры. В Советском Союзе существуют в настоящее время опытные установки, работающие на водяном паре при температуре порядка 600° С и при давлении до 300 атмосфер, т. е. при давлении, в 300 раз превосходящем давление атмосферного воздуха. Всего лишь 30 лет назад такие высокие температуры и давления представлялись совершенно недостижимыми в технике.

Энергетика является, конечно, не единственной областью техники, в которой водяной пар находит и будет находить весьма широкое применение. В железнодорожном и водном транспорте, в ряде отраслей промышленности используются различные паровые двигатели и установки.

Для того чтобы правильно рассчитать двигатель или какую-либо установку для работы с водяным паром высокого давления и температуры, необходимо знать свойства пара в этих условиях. Работа по теоретическому и опытному изучению свойств воды и водяного пара при высоких температурах и давлениях велась и ведется учеными различных стран в течение весьма длительного времени. Особенно большая работа в этом направлении проведена за последние годы советскими учеными.

В этой маленькой книжке рассказывается о тех способах, с помощью которых можно получить электрическую энергию в достаточно больших количествах. Выясняется, что электрическую энергию можно получить различными путями. Можно воспользоваться для этой цели теплотой, образующейся при сжигании топлива. Но можно также ис-

пользовать энергию рек и водопадов, энергию морских приливов и отливов, энергию морского прибоя, солнечную энергию и энергию ветра.

В книге рассказывается, почему в настоящее время наибольшее количество электрической энергии получают на тепловых электрических станциях за счет теплоты, образующейся в результате сжигания топлива. Объясняются устройство и принцип работы тепловой электрической станции, а также устройство и принцип работ парового котла и паровой турбины — главных составных частей тепловой станции. Рассказывается о том, почему именно водяной пар, а не какое-нибудь другое вещество используется в современных мощных двигателях, предназначенных для получения электрической энергии. Почему в этих двигателях особенно выгодно применять водяной пар, имеющий высокие температуру и давление. Здесь говорится также о некоторых важных особенностях физических свойств воды и водяного пара и о теоретических и экспериментальных работах, проводимых с целью исследования этих свойств.

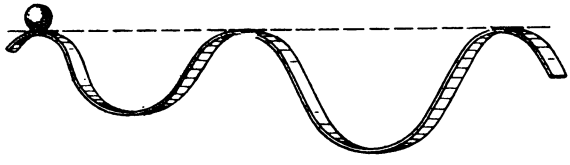
1. Превращения энергии и назначение тепловой электрической станции

В основе всех естественных наук, т. е. наук, изучающих природу, лежат два основных закона: закон сохранения материи и закон сохранения и превращения энергии. Как известно читателю, закон сохранения материи состоит в том, что материя не может быть уничтожена или создана «из ничего». Материя может только переходить из одного вида в другой, из одного состояния в другое. Можно, например, поставив на огонь чайник с водой, нагреть воду до температуры кипения; если чайник с водой оставить на огне и дальше, то через некоторое время он окажется пустым — вся вода выкипит. Это не будет, однако, означать, что произошло исчезновение материи. Это значит только то, что материя из одного вида превратилась в другой: вода испарилась и превратилась в пар. Или можно, например, сжечь кусок дерева, бросив его в костер или в печь. Дерево, конечно, сгорит, но материя уничтожена не будет: в результате сгорания куска дерева образуются зола и газы, главным образом углекислота. И в этом примере происходит превращение материи из одного вида в другой, но количество ее остается неизменным.

Читатель, конечно, знаком и с законом сохранения и превращения энергии. Но так как этот закон имеет для дальнейшего изложения особенно большое значение, остановимся на нем несколько подробнее. Предположим, что в нашем распоряжении имеется волнообразной формы лоток и шарик. Подобное устройство, представленное на фиг. 2, соорудить нетрудно. Представим также, что при движении шарика по лотку трение между шариком и поверхностью лотка вовсе отсутствует. Это последнее условие можно действительно только представить. Осуществить же его невозможно, так как даже при самой ровной поверхности шарика

и лотка никогда не удастся полностью избавиться от трения.

Проследим за движением шарика по лотку при условии, что трение отсутствует. Допустим, что в начале шарик неподвижен и находится в верхней части лотка, как это и показано на фиг. 2. Под влиянием собственного веса шарик может катиться вниз по лотку, причем чем ниже будет положение шарика, тем большей окажется скорость его движения. По инерции шарик может двигаться и вверх по лотку. При этом скорость его движения будет уже не увели-



Фиг. 2. Движение без трения.

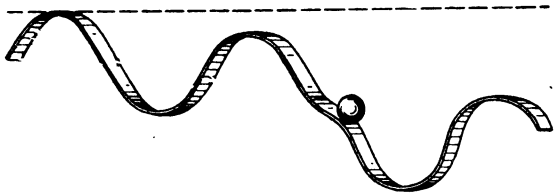
чиваться, а уменьшаться. Даже при полном отсутствии трения шарик не смог бы подняться по лотку на высоту, большую чем начальная.

Наибольшую скорость шарик имел бы в самой низкой точке своего пути, в самой высокой точке скорость шарика была бы равна нулю. Эту же мысль можно выразить другими словами: чем ниже находится шарик, тем больше его кинетическая энергия, чем выше находится шарик, тем больше его потенциальная энергия. В нашем воображаемом опыте приходится сталкиваться со взаимным превращением только двух видов энергии: кинетической и потенциальной. Первая из них зависит от скорости движения тела, в данном случае шарика, а вторая — от его положения. На основе принципов механики можно утверждать, что сумма кинетической и потенциальной энергии шарика остается неизменной. Иначе: ни кинетическая, ни потенциальная энергия шарика не могут быть уничтожены, они могут только переходить одна в другую. Сказанное и представляет собой закон сохранения и превращения энергии применительно к частному, сравнительно простому случаю.

А как обстояло бы дело, если бы трение было принято во внимание?

Рассмотрим движение шарика по лотку в этом случае (фиг. 3). В отличие от предыдущего примера опыт с движением шарика по лотку при наличии трения можно не

только представить себе, но и осуществить. Так же как и в предыдущем случае, скорость шарика будет тем больше, чем ниже он находится. Иначе говоря, кинетическая энергия шарика снова будет тем больше, чем ниже находится шарик, а потенциальная энергия тем больше, чем выше находится шарик. Но в отличие от рассмотренного ранее случая сумма кинетической и потенциальной энергии шарика не будет оставаться постоянной, а будет постепенно, по мере движения шарика, уменьшаться. Это не значит, конечно, что для данного примера закон сохранения и превращения энергии



Фиг. 3. Движение с трением.

теряет свою силу. Закон этот является всеобщим и применим к любому частному случаю. Сказанное означает только, что в последнем случае приходится сталкиваться не только с кинетической и потенциальной энергией, но и еще с одним видом энергии, который необходимо принять в расчет. Речь идет о так называемой тепловой энергии. Оказывается, что всегда в результате трения часть кинетической энергии превращается в энергию тепловую. Применительно к рассматриваемому примеру это сказывалось бы в том, что шарик и поверхность лотка в результате трения при движении шарика несколько нагревались бы. Чем большее расстояние по лотку прокатился бы шарик, тем более образовалось бы тепловой энергии. Поэтому закон сохранения и превращения энергии для данного частного случая следовало бы сформулировать так: сумма кинетической, потенциальной и тепловой энергии при движении шарика с трением остается неизменной.

Но что представляет собой тепловая энергия? Как можно ее измерить?

Тепловая энергия по современным физическим воззрениям представляет собой кинетическую и потенциальную энергию мельчайших частиц тела — молекул и атомов. Следовательно, тепловая энергия шарика, о котором шла речь выше, должна быть равна сумме кинетической и потенциальной энергии всех атомов, из которых он состоит. Было

бы, конечно, совершенно безнадежным делом пытаться с целью определения тепловой энергии шарика измерить энергию каждого из атомов, входящих в состав шарика. Для определения тепловой энергии шарика существует куда более простой способ. Известно, что тепловая энергия тела может быть увеличена путем его нагревания. В результате же нагревания растет температура тела, которую легко можно измерить, например, с помощью ртутного термометра. Но определение температуры тела в начале и в конце нагревания еще недостаточно для того, чтобы сказать, сколько тепла подведено к телу, на сколько увеличилась его тепловая энергия. Если на плиту положить металлическую гирю весом в 1 килограмм, то для нагревания ее, например, на 10° С * потребуется значительно меньшее время, чем для нагревания на то же число градусов металлической болванки, отлитой из того же металла и весящей 100 килограммов. Ясно, что для нагревания металлической болванки потребуется значительно больше тепла, чем для нагревания до той же температуры во много раз меньшей гири. На основе всего сказанного можно сделать такое предположение: нельзя ли за единицу количества тепла принять количество тепла, необходимое для нагревания тела определенного состава и веса на определенное число градусов? Высказанное предположение оказывается очень удачным. В технике за единицу количества тепла принимается обычно б о л ь ш а я к а л о р и я или просто к а л о р и я. Она равна тому количеству тепла, которое требуется для нагревания 1 килограмма воды на 1 градус стоградусной температурной шкалы, а именно: от 19,5 до 20,5° С. Начальная и конечная температуры (19,5 и 20,5° С) указаны потому, что согласно опытным данным количество тепла, необходимое для нагревания 1 килограмма воды, например, от 10 до 11° С несколько отличается от количества тепла, потребного для нагревания 1 килограмма воды, скажем, от 20 до 21° С. Иначе говоря, теплоемкость воды несколько зависит от температуры. Зависимость эта, правда, невелика. Но для точного определения единицы количества тепла зависимость теплоемкости воды от температуры все же приходится учитывать, почему при определении калории и указана начальная и конечная температуры.

---

* 10° С означает: 10 градусов стоградусной температурной шкалы, т. е. шкалы, 0 градусов которой соответствует температуре таяния льда, а 100 градусов — температуре кипения воды при обычном атмосферном давлении.

Определив количество тепла, подведенное к какому-либо телу, например к шарику, мы тем самым довольно точно определяем, на сколько увеличилась тепловая энергия шарика. Если же тепловую энергию шарика при какой-либо произвольно выбранной температуре, например при 0° С, условно считать равной нулю, то таким путем можно определить тепловую энергию шарика при любой другой температуре. Ясно, что при отрицательной температуре, т. е. при температуре меньше 0° С, тепловая энергия шарика в этом случае будет выражаться каким-то числом с отрицательным знаком. Хотя энергия в принципе не может быть отрицательной, но полученный результат не должен вызывать удивления: все дело заключается в том, что мы произвольно приняли тепловую энергию шарика при температуре 0° С равной нулю.

Как мы уже сказали, тепловую энергию принято выражать в калориях. Единицей же механической энергии (кинетической и потенциальной) служит килограммометр, т. е. количество работы, которое нужно затратить, чтобы поднять груз весом в 1 килограмм на высоту 1 метра. Так как согласно закону сохранения и превращения энергии данный вид энергии можно превратить в любой другой вид, причем при таком превращении энергия не может ни «исчезнуть», ни возникнуть «из ничего», то определенное количество калорий тепловой энергии, превращаясь, например, в кинетическую энергию, должно при таком превращении дать вполне определенное количество килограммометров. Сколько бы раз мы ни повторяли подобный опыт, соотношение между числом «превращенных» калорий и числом полученных килограммометров должно оставаться неизменным. В противном случае был бы нарушен закон сохранения и превращения энергии, чего быть, конечно, не может. Из сказанного следует, что 1 калория должна быть равна вполне определенному числу килограммометров,— так оно и есть в действительности. Многочисленные опыты, проведенные исследователями, показали, что 1 калория равна примерно 427 килограммометрам. Поскольку между калорией и килограммометром существует вполне определенная зависимость, а именно: число килограммометров энергии равно числу калорий, умноженному на 427, ясно, что энергию любого вида можно измерять и в килограммометрах, и в калориях. Можно, например, тепловую энергию выражать в килограммометрах, а кинетическую и потенциальную энергию — в калориях. Принято, однако, посту-

пать как раз наоборот: тепловую энергию выражать в калориях, а механическую — в килограммометрах.

В настоящее время между физиками нет никаких разногласий относительно того, что представляет собой тепловая энергия. Как уже было сказано, тепловая энергия любого тела складывается из кинетической и потенциальной энергии мельчайших частиц этого тела: молекул и атомов. Такой взгляд на природу тепловой энергии утвердился в науке давно. Но было время, когда ученые считали теплоту не формой энергии, а некоторой невесомой жидкостью, тепловым веществом или «теплородом». По этой теории нагревание одного тела за счет другого происходит вследствие перехода части теплорода от второго тела к первому. Следствием этого является нагревание первого тела и охлаждение второго. До поры до времени теория теплорода могла более или менее удовлетворительно объяснять наблюдаемые явления. Течение теплорода от одного тела к другому можно уподобить течению воды. При таком сопоставлении сам теплород подобен воде. Как вода всегда течет от более высокого уровня к более низкому, так и теплород перетекает от более нагретого тела к менее нагретому. Как течение воды происходит до тех пор, пока оба уровня не сравняются, так и переход теплорода совершается до тех пор, пока температура обоих тел не станет одинаковой. Если происходит, например, таяние куска льда, то по теории теплорода это значит, что лед получает теплород от окружающей среды и поэтому обращается в воду. Названия, до сих пор уцелевшие в физике, — теплоемкость, теплосодержание — сохранились со времен теории теплорода.

Но скоро физики столкнулись с таким явлением, объяснить которое с точки зрения теории теплорода было не так-то просто. Было замечено, что много теплоты выделяется в результате трения, например, при сверлении целого куска металла. Для объяснения этого явления естественно было предположить, что теплота образуется в результате затраты механической энергии, является сама одним из видов энергии, и отказаться от теории теплорода. Однако защитники теории теплорода высказали такое соображение: Может быть, — сказали они, — теплоемкость мелких кусков металла, стружек меньше, чем теплоемкость целого куска металла того же веса. В таком случае вполне понятно выделение большого количества тепла при сверлении металла, при этом часть монолитного куска металла превращается в стружки, имеющие по предположению меньшую тепло-

емкость. Это возражение было легко опровергнуто. На основании опытов было показано, что теплоемкость металла не зависит от того, имеем ли мы целый кусок или стружки того же веса. Кроме того, был проделан особенно наглядный опыт, доказавший несостоятельность теории теплорода. Были взяты два куска льда. В результате трения этих кусков между собой лед таял и получалась вода. Ясно было, что затраченная на трение льда теплота могла возникнуть только за счет механической энергии, так как теплоемкость воды не только не меньше, но примерно в 1,25 раза больше, чем теплоемкость льда.

Теория теплорода должна была сойти со сцены и уступить свое место современной так называемой молекулярной теории теплоты. Однако некоторые сопоставления между переходом теплоты от нагретого тела к холодному и течением воды от верхнего уровня к нижнему будут нам в дальнейшем полезны для пояснения существа тепловых явлений.

В самом общем случае энергия может существовать не только в виде кинетической, потенциальной и тепловой, но и во многих других формах: химической, электрической, лучистой и т. д. Для такого наиболее общего случая можно сформулировать в наиболее общем виде и закон сохранения и превращения энергии. Энергия может пребывать во всех своих существующих формах: в виде кинетической, потенциальной, тепловой, химической, электрической, лучистой и т. д. При любых превращениях энергия не может быть уничтожена или создана «из ничего» ни полностью, ни частично.

Ну, а что же представляет собой машина, именуемая двигателем? Ведь можно подумать, что двигатель как раз и существует для того, чтобы производить энергию?

Выше уже было сказано, что закон сохранения и превращения энергии является всеобщим и ни при каких обстоятельствах не может быть нарушен. Не может быть нарушен этот основной закон природы и при работе двигателя. С помощью любого двигателя получить энергию «из ничего» не представляется возможным. Более того, двигатель, в котором энергия будто бы получается без всяких затрат, «из ничего» назвали «вечным двигателем», и так как построить такой двигатель невозможно, закон сохранения и превращения энергии иногда формулируют так: осуществление вечного двигателя невозможно.

Существующие двигатели имеют куда более простое, но зато вполне осуществимое назначение. Они предназначены

для получения механической энергии, но не без затрат, не «из ничего», а из других видов энергии. Иначе говоря, двигатели имеют своим назначением превращение различных видов энергии в энергию механическую. В частности, тепловым двигателем называется машина, с помощью которой тепловая энергия превращается в энергию механическую. Такие двигатели имеют очень широкое распространение. К их числу относятся, в частности, автомобильные и самолетные двигатели, паровые машины, широко используемые в настоящее время на паровозах, паровые турбины, предназначенные для получения больших количеств механической энергии, газовые турбины, нашедшие широкое применение в авиации.

О том, насколько хорошо работает тепловой двигатель, судят по так называемому коэффициенту полезного действия (к. п. д.). Под к. п. д. двигателя понимается отношение работы (механической энергии), полученной в двигателе, к тому количеству теплоты (тепловой энергии), которое было «израсходовано» для получения работы. Коэффициент полезного действия теплового двигателя всегда меньше единицы. Это значит, что количество полученной механической энергии всегда меньше количества израсходованной тепловой энергии: часть тепловой энергии превратить в механическую не удается и она в конечном итоге передается окружающей среде в виде тепла.

Как было сказано во введении, для жизни современного общества особенно большое значение имеет электричество, электрическая энергия. К сожалению, природа не предоставляет нам возможности черпать электрическую энергию непосредственно из ее запасов. Пожалуй, единственным сколько-нибудь значительным, естественным проявлением электрической энергии является молния.

Молния — большая электрическая искра, проскакивающая между облаками или между облаком и землей — может иметь очень большую длину, достигающую в отдельных случаях десятков километров. Изучение молнии показало, что сила тока в ней может достигать нескольких сотен тысяч ампер. Если вспомнить при этом, что в проводах электрического освещения сила тока составляет всего лишь несколько ампер, то можно подумать, что атмосферное электричество — молния — представляет собой большой запас электрической энергии. Оказывается, однако, что это далеко не так. Вследствие того, что продолжительность молнии очень невелика и составляет всего лишь незначительную

долю секунды (0,01—0,001 сек.), энергия молнии незначительна и в большинстве случаев не превышает 10—20 киловаттчасов. Это значит, что при сгорании двух килограммов каменного угля выделяется в виде тепла примерно такое же количество энергии, каким обладает молния. Ясно поэтому, что об использовании молнии для получения сколько-нибудь значительных количеств электрической энергии говорить не приходится.

Чтобы получить электрическую энергию в большем количестве, остается единственный путь: превратить другие виды энергии в энергию электрическую. Именно такое превращение и является задачей электрических станций.

Тепловые электрические станции предназначены для превращения теплоты, выделившейся при сгорании топлива, в механическую энергию, а этой последней в энергию электрическую. Сжигание топлива — вот начало цепочки превращений, в результате которых получают электрическую энергию в нужных количествах.

Какие же топлива используются для этой цели на электрических станциях? Почему при горении топлива образуется много тепла? На эти вопросы ответ дается в следующем разделе.

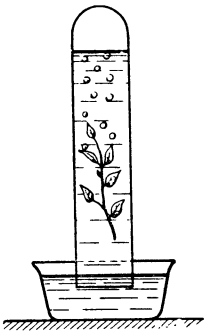
2. Почему при сгорании топлива выделяется теплота

В прошлом веке основным топливом являлись дрова. Даже в наше время дрова как топливо имеют еще большое значение, особенно для отопления зданий в сельских местностях. Сжигая дрова в печах, трудно представить себе, что мы, по существу дела, используем энергию, полученную от Солнца, находящегося на расстоянии около 150 миллионов километров от Земли. Тем не менее именно так и обстоит дело.

Каким же образом солнечная энергия оказалась аккумулированной в дровах? Почему можно утверждать, что, сжигая дрова, мы используем энергию, полученную от Солнца?

Ясный ответ на поставленные вопросы дал выдающийся русский ученый К. А. Тимирязев. Оказывается, развитие почти всех растений возможно только под действием солнечных лучей. Жизнь подавляющего большинства растений от маленькой травки и до мощного эвкалипта, достигающего 150 метров высоты и 30 метров по окружности ствола, основана на восприятии солнечных лучей. Зеленые листья расте-

ний содержат особое вещество — хлорофилл. Это вещество дает растениям важное свойство: поглощать энергию солнечных лучей, разлагать за счет этой энергии углекислый газ, являющийся соединением углерода и кислорода, на его составные части, т. е. на углерод и кислород, и образовывать в своих тканях органические вещества, из которых собственно и состоят ткани растений. Это свойство растений без преувеличения можно назвать замечательным, так как благодаря ему растения оказываются способными превращать вещества неорганической природы в органические вещества. Кроме того, растения поглощают из воздуха углекислый газ, являющийся продуктом деятельности живых существ, промышленности и вулканической деятельности, и насыщают воздух кислородом, без которого, как известно, невозможны процессы дыхания и горения. Именно поэтому, между прочим, зеленые насаждения являются необходимыми для жизни человека.



Фиг. 4. Листья растений разлагают углекислый газ.

Убедиться в том, что листья растений поглощают углекислый газ и разделяют его на углерод и кислород, легко с помощью очень простого опыта. Представим себе, что в пробирке (фиг. 4) находится вода с растворенным в ней углекислым газом и зеленые листья какого-нибудь дерева или травы. Вода, содержащая углекислый газ, имеет очень широкое распространение: в жаркий день именно эта вода, именуемая газированной, очень приятна для утоления жажды.

Вернемся, однако, к нашему опыту. Через некоторое время на листьях можно заметить небольшие пузырьки, которые по мере их образования поднимаются и скапливаются в верхней части пробирки. Если этот газ, полученный на листьях, собрать в отдельный сосуд и затем внести в него слегка тлеющую лучину, то она вспыхнет ярким пламенем. По этому признаку, а также по ряду других можно установить, что мы имеем дело с кислородом. Что касается углерода, то он усваивается листьями и из него образуются органические вещества — ткани растений, химическая энергия которых, представляющая собой преобразованную энергию солнечных лучей, выделяется при горении в виде теплоты.

В нашем рассказе, который по необходимости затрагивает различные отрасли естествознания, встретилось еще одно новое понятие: химическая энергия. Необходимо хотя бы кратко объяснить, что она собой представляет. Химическая энергия вещества (в частности дров) имеет много общего с тепловой энергией. Тепловая энергия, как помнит читатель, складывается из кинетической и потенциальной энергии мельчайших частиц тела: молекул и атомов. Тепловая энергия тела определяется, таким образом, как сумма энергии поступательного и вращательного движения молекул и атомов данного тела и энергии притяжения или отталкивания между ними. Химическая энергия тела в отличие от тепловой складывается из энергии, накопленной внутри молекул. Эта энергия может быть освобождена только в результате химического преобразования, химической реакции, когда одно или несколько веществ превращаются в другие вещества.

К сказанному необходимо добавить два важных пояснения. Но предварительно нужно напомнить читателю некоторые положения о строении материи. Долгое время ученые предполагали, что все тела состоят из мельчайших и далее неделимых частиц — атомов. В переводе с греческого слово «атом» означает неделимый. В первой своей части это предположение подтвердилось: все тела действительно состоят из атомов, а размеры этих последних чрезвычайно малы. Вес атома водорода, например, равен 0,000 000 000 000 000 000 000 0017 грамма. Размер атомов настолько мал, что их не представляется возможным увидеть даже в самый сильный микроскоп. Если бы можно было так уложить атомы, как мы насыпаем горох в стакан, т. е. соприкасая их друг с другом, то в очень маленьком объеме 1 кубического миллиметра уместилось бы около 10 000 000 000 000 000 000 000 атомов.

Всего известно около ста видов атомов. Вес атома урана — одного из наиболее тяжелых атомов — примерно в 238 раз больше веса самого легкого водородного атома. Простые вещества, т. е. вещества, состоящие из атомов одного сорта, именуются элементами.

Соединяясь между собой, атомы образуют молекулы. Если молекула состоит из различного сорта атомов, то вещество именуется сложным. Молекула воды, например, состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Так же как и атомы, молекулы очень малы. Ярким примером, свидетельствующим о малом размере молекул и о том,

сколь большое число их находится даже в сравнительно малом объеме, служит пример, приведенный английским физиком Томсоном. Если взять стакан воды и все молекулы воды, находящейся в этом стакане, определенным образом пометить, а затем вылить воду в море и основательно размешать, то окажется, что в каком бы океане или море мы ни почерпнули стакан воды, в нем будет около ста помеченных нами молекул.

Все тела представляют собой скопления очень большого числа молекул или атомов. В газах эти частицы находятся в хаотическом движении, имеющем тем большую интенсивность, чем выше температура газа. В жидкостях силы сцепления между отдельными молекулами значительно больше, чем в газах. Поэтому хотя молекулы жидкости также находятся в движении, но оторваться друг от друга уже не могут. Твердые тела построены из атомов. Силы притяжения между атомами твердого тела значительно больше не только по сравнению с силами притяжения между молекулами газов, но по сравнению с молекулами жидкости. Вследствие этого атомы твердого тела совершают только колебательные движения вокруг более или менее неизменных положений равновесия. Чем выше температура тела, тем значительнее кинетическая энергия атомов и молекул. Собственно говоря, именно кинетическая энергия атомов и молекул и определяет температуру.

Что касается предположения о том, что атом неделим, что он является якобы наименьшей частицей материи, то это предположение в дальнейшем было отвергнуто. Ученые-физики имеют теперь единую точку зрения, заключающуюся в том, что атом не является неделимым, что он состоит из еще более малых частиц материи. Более того, эта точка зрения физиков подтверждена в настоящее время с помощью опытов. Итак, атом в свою очередь является сложной частицей, состоящей из протонов, нейтронов и электронов. Протоны и нейтроны образуют ядро атома, окруженное электронной оболочкой. Почти вся масса атома сосредоточена в его ядре. Наименьшее из всех существующих атомных ядер — ядро атома водорода, состоящее всего лишь из одного протона — обладает массой, которая больше массы электрона в 1 850 раз. Массы протона и нейтрона примерно равны между собой. Таким образом, масса атома определяется массой его ядра, или, иначе говоря, числом протонов и нейтронов. Протоны имеют положительный электрический заряд, электроны — отрицательный, а нейтроны

вовсе не имеют электрического заряда. Заряд ядра, следовательно, всегда является положительным и равен числу протонов. Эта величина называется порядковым номером элемента в периодической системе Д. И. Менделеева. Обычно число электронов, составляющих оболочку, равно числу протонов, а так как заряд электронов отрицателен, то атом в целом электрически нейтрален.

Несмотря на то, что объем атома весьма мал, ядро и окружающие его электроны занимают лишь незначительную долю этого объема. Можно представить себе поэтому, какой колоссальной плотностью обладают ядра атомов. Если бы можно было так разместить ядра водорода, чтобы они плотно заполнили объем всего лишь 1 кубического сантиметра, то вес их составил бы примерно 100 миллионов тонн.

Изложив кратко некоторые положения о строении материи и напомнив ещё раз, что химическая энергия представляет собой энергию, накопленную внутри молекул, можно, наконец, перейти к изложению двух, обещанных ранее, важных соображений, полнее раскрывающих существо химической энергии.

Выше мы сказали, что тепловая энергия тела складывается из энергии поступательного и вращательного движений молекул и энергии притяжения или отталкивания между ними. Это определение тепловой энергии является не совсем точным или, лучше сказать, не совсем полным. В случае, когда молекула вещества (жидкости или газа) состоит из двух или большего числа атомов, то в тепловую энергию надлежит включить также энергию колебательного движения атомов внутри молекулы. К этому выводу пришли на основании следующих соображений. Опыт показывает, что теплоемкость почти всех веществ возрастает с увеличением температуры. Иначе говоря, количество тепла, необходимое для повышения температуры 1 килограмма вещества на 1° С, делается, как правило, тем больше, чем больше температура этого вещества. Этому правилу следует и большинство газов. Чем это объясняется? Современная физика отвечает на этот вопрос так: основной причиной, вызывающей увеличение теплоемкости газа с ростом температуры, является быстрое увеличение колебательной энергии атомов, из которых состоит молекула газа, по мере увеличения температуры. Такое объяснение подтверждается тем, что теплоемкость тем больше увеличивается с ростом температуры, чем из большего числа атомов состоит молекула газа. Теплоемкость же одноатомных

газов, т. е. газов, мельчайшими частицами которых являются атомы [1], вообще почти не изменяется при увеличении температуры.

Но если энергия колебательного движения атомов внутри молекулы изменяется, да еще весьма существенно, при нагревании газа, происходящем без изменения химического состава этого газа, то, видимо, эту энергию нельзя рассматривать как энергию химическую. А как же быть тогда с приведенным выше определением химической энергии, согласно которому она является энергией, накопленной внутри молекулы?

Этот вопрос вполне уместен. В приведенное выше определение химической энергии надо внести первое уточнение: к химической энергии относится не вся энергия, аккумулированная внутри молекулы, а лишь та часть ее, которая может быть изменена только путем химических превращений.

Второе соображение, касающееся существа химической энергии, состоит в следующем. Не вся энергия, аккумулированная внутри молекулы, может быть освобождена в результате химической реакции. Часть энергии, и притом очень большая, никак не изменяется в итоге химического процесса. Это энергия, заключенная внутри атома, или, точнее сказать, внутри ядра атома. Ее именуют атомной или ядерной энергией. Собственно говоря, в этом нет ничего удивительного. Пожалуй, даже на основе всего сказанного выше это обстоятельство можно было предугадать. Действительно, ведь с помощью любой химической реакции невозможно превратить один элемент в другой, атомы одного сорта в атомы другого сорта. Такую задачу в прошлом ставили перед собой алхимики, стремившиеся во что бы то ни стало превратить в золото другие металлы, например ртуть. Успеха в этом деле алхимикам добиться не удалось. Но если с помощью химической реакции не удалось превратить один элемент в другой, атомы одного сорта в атомы другого сорта, то это значит, что сами атомы, а точнее сказать их основные части — ядра — остаются при химической реакции неизменными. Поэтому и не удается освободить ту очень большую энергию, которая аккумулирована в ядрах атомов. А энергия эта действительно очень велика. В настоящее время ученые-физики научились освобождать ядерную энергию атомов урана и некоторых других элементов. Это значит, что появилась возможность превращать один элемент

[1] К числу одноатомных газов относятся пары металлов

в другой. При разделении атомов урана, взятого в количестве всего 1 грамма, выделяется около 10 миллионов калорий тепла. Чтобы получить такое количество тепла, потребовалось бы сжечь примерно полторы тонны хорошего каменного угля. Можно представить себе, какие большие возможности таит в себе использование ядерной (атомной) энергии.

Поскольку превращение атомов одного вида в атомы другого вида и связанное с таким превращением освобождение ядерной энергии не входит уже в задачу химии, постольку ядерную энергию не включают в состав химической энергии вещества.

Итак, химическая энергия растений, представляющая собой как бы законсервированную солнечную энергию, может быть освобождена и использована по нашему усмотрению. Для того чтобы освободить химическую энергию вещества, превратив ее хотя бы частично в другие виды энергии, надо организовать такой химический процесс, в результате которого были бы получены такие вещества, химическая энергия которых была бы меньше химической энергии первоначально взятых веществ. В этом случае часть химической энергии может быть превращена в теплоту, а эта последняя использована на тепловой электрической станции с конечной целью получения электрической энергии.

Применительно к дровам — растительному топливу — таким подходящим химическим процессом является процесс горения. Читатель, безусловно, знаком с ним. Поэтому мы напомним лишь кратко, что горением или окислением какого-либо вещества называется химический процесс соединения этого вещества с кислородом. В результате соединения горящего вещества с кислородом освобождается значительное количество химической энергии — выделяется теплота. Теплота выделяется не только при горении дров, но и при любом другом процессе горения или окисления. Хорошо известно, например, как много тепла выделяется при горении соломы или каменного угля. В нашем организме тоже происходит медленный процесс окисления и поэтому температура внутри организма несколько выше температуры обычно окружающей нас среды. Ржавление железа тоже процесс окисления. Тепло выделяется и здесь, но только этот процесс протекает настолько медленно, что практически нагревания мы не замечаем.

В настоящее время в промышленности дрова почти не используются. Слишком большое значение для жизни лю-

дей имеют леса, чтобы можно было сжигать дрова в топках паровых котлов фабрик, заводов и электрических станций. Да и не надолго хватило бы всех лесных богатств на земле, если бы вздумали использовать их для этой цели. В нашей стране проводится совершенно иная работа: производятся массовые посадки лесозащитных полос и лесных массивов для улучшения климатических условий местности.

Однако все сказанное выше об образовании растительных тканей за счет энергии солнечных лучей и об использовании химической энергии растительных тканей для получения теплоты имеет самое прямое отношение к тем топливам, которые широко используются в наше время в промышленности и, в частности, на тепловых электрических станциях. К таким топливам прежде всего относятся: торф, бурый уголь и каменный уголь. Все эти топлива являются продуктами разложения умерших растений в большинстве случаев без доступа воздуха или при малом доступе воздуха. Такие условия для отмирающих частей растений создаются в воде, под слоем водных осадков. Поэтому образование этих топлив происходило чаще всего в болотах, в часто затопляемых низменных местностях, в мелеющих или вовсе пересыхающих реках и озерах.

Из трех перечисленных выше топлив самым молодым по происхождению является торф. В нем встречается большое количество частей растений. Качество того или иного топлива во многом характеризуется его теплотворной способностью. Теплотворная способность, или теплота сгорания — это то количество теплоты, измеряемое в калориях, которое выделяется при сжигании 1 килограмма топлива. Если бы в нашем распоряжении был сухой торф, не содержащий влаги, то его теплотворная способность была бы несколько выше теплотворной способности дров: сухой торф имеет теплотворную способность около 5 500 калорий на 1 килограмм, а дрова — примерно 4 500. Торф, добываемый на разработках, содержит обычно довольно много влаги и поэтому имеет более низкую теплотворную способность. Использование торфа на электростанциях России началось в 1914 г., когда была построена электростанция, носящая имя выдающегося русского инженера Р. Э. Классона, основоположника нового способа добычи торфа, так называемого гидравлического способа. После Великой Октябрьской социалистической революции использование торфа на электростанциях получило широкое распространение. Советскими инженерами разработаны наиболее рациональные ме-

тоды добычи и сжигания этого дешевого топлива, залежи которого на территории Советского Союза очень значительны.

Более старым по сравнению с торфом продуктом разложения растительных тканей является так называемый бурый уголь. Однако и в буром угле еще имеются растительные клетки и части растений. Сухой бурый уголь с малым содержанием негорючих примесей — золы — имеет теплотворную способность свыше 6 000 калорий на 1 килограмм, т. е. еще более высокую, чем дрова и сухой торф. В действительности бурый уголь представляет собой топливо с гораздо меньшей теплотой сгорания вследствие значительной влажности, а часто и большой зольности. В настоящее время бурый уголь является одним из наиболее часто применяемых топлив на электрических станциях Советского Союза. Залежи его в нашей стране весьма велики.

Торф, бурый уголь и каменный уголь представляют собой продукты разложения растений и отличаются друг от друга различным «возрастом». Наиболее старым из них является каменный уголь — топливо значительно более ценное по сравнению с торфом и бурым углем. В каменном угле растительные клетки можно обнаружить только с помощью микроскопа, процессы разложения растительных тканей здесь уже можно считать законченными. Влажность каменного угля обычно невелика и поэтому, а также вследствие большего содержания в его составе углерода, теплотворная способность каменного угля выше, чем торфа и бурого угля. Каменный уголь — топливо, используемое также весьма широко на электростанциях Советского Союза.

Что касается таких ценных топлив, как нефть и природный газ, то они почти не применяются на электростанциях Советского Союза. Как уже было сказано, в нашей стране использование запасов топлива производится с учетом интересов всех отраслей промышленности, планово и экономно. В отличие от капиталистических стран, в которых топливные ресурсы расходуются хищнически, без какого-либо плана, в Советском Союзе на электростанциях сжигаются в основном низкосортные топлива, мало пригодные для других целей. При этом электростанции, как правило, сооружаются в районах добычи топлива, что исключает дальние его перевозки. Советским инженерам-энергетикам пришлось немало потрудиться над сооружением таких устройств для сжигания топлива — топок, которые позволили бы использовать низкосортное, влажное топливо.

3. На долго ли хватит топлива электрическим станциям и каковы перспективы использования других видов энергии?

Хорошо, — скажет нам на это читатель, — роль тепловых электрических станций в народном хозяйстве нашей страны никаких сомнений не вызывает. Но ведь работа этих электрических станций основана на сжигании топлива, а запасы этого последнего ограничены. Может быть запасы топлива сравнительно скоро будут исчерпаны и тогда не будет возможности использовать тепловые электрические станции? Если же это действительно так, то есть ли смысл строить теперь новые?

Конечно, — ответим мы читателю, — запасы угля и других видов топлива (торфа, нефти, природного газа), имеющиеся на нашей планете, не безграничны. Можно считать даже, что эти естественные запасы практически не восполняются, так как для образования угля, нефти и природного газа требуется весьма длительное время. Так, например, для образования каменного угля требуются миллионы лет. Что касается древесного топлива, то, как сказано выше, в настоящее время оно вовсе не используется для нужд энергетики.

Каковы же естественные запасы перечисленных топлив? На долго ли хватит этих запасов человечеству?

Особенно большое значение для энергетики имеет бурый и каменный уголь. Запасы угля на Земле весьма велики. Попытки хотя бы ориентировочного определения запасов угля производились неоднократно. Международный геологический конгресс, происходивший в 1913 г., определил запасы угля примерно в 4 500 кубических километров (точнее в 7 300 000 000 000 тонн). В эту цифру входили все предполагаемые запасы угля на глубине, не превышающей 1 800 метров. Потребление угля в 1913 г. составляло около 0,75 кубического километра в год (точнее, 1 200 000 000 тонн в год). Таким образом, при неизменном потреблении угля запасов его должно было бы хватить примерно на 6 000 лет.

Однако в эти цифры необходимо внести весьма существенные поправки и уточнения. Прежде всего потребление угля, как показывает статистика, возрастает из года в год. За 60 лет, с начала восьмидесятых годов прошлого столетия по начало сороковых годов настоящего столетия, мировое потребление угля возросло почти в 10 раз. Особенно быстро потребление угля возрастает в Советском Союзе. Поэтому

мы не имеем никаких оснований считать годовое потребление угля неизменным.

Кроме того, оказывается невозможным использовать весь уголь, залегающий на глубине до 1 800 метров. Во-первых, некоторые пласты угля являются настолько тонкими, что разработка их экономически не оправдывается. Во-вторых, часть угля при разработке пластов всегда теряется. И, наконец, в-третьих, добыча угля на большой глубине — свыше полутора километров — связана с весьма большими трудностями, ставящими под сомнение целесообразность ее.

Правда, нужно учесть и то обстоятельство, что далеко не все залежи угля разведаны даже и в настоящее время. Тем более это справедливо по отношению к 1913 г. На территории Советского Союза, например, серьезное исследование и изучение природных ресурсов, в том числе и топливных, началось только после Великой Октябрьской социалистической революции. За годы советской власти были открыты Карагандинский, Печорский, Бурейский, Канский и Тунгусский угольные бассейны. Разведанные запасы угля на территории СССР оказались поэтому в 1939 г. в 7 раз превышающими разведанные запасы угля в 1913 г. До сего времени в Африке, Америке и Азии имеются огромные неразведанные пространства.

Учитывая все сказанное, академик П. П. Лазарев определил, что имеющихся на Земле запасов каменного угля человечеству хватит еще на 1 500—2 000 лет.

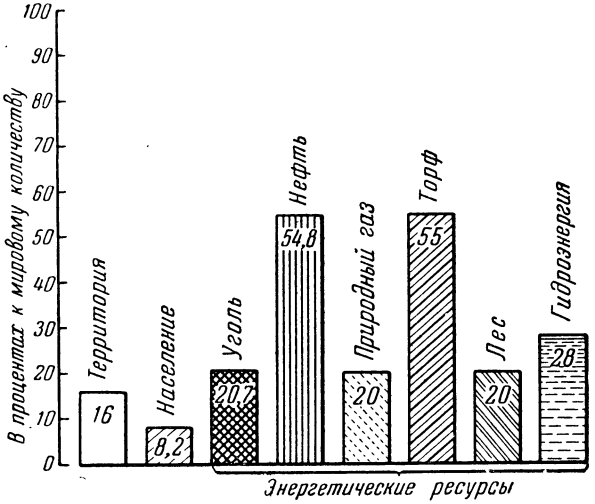
Небезинтересным является вопрос о том, как распределены естественные топливные богатства между отдельными странами и, прежде всего, каково в этом отношении положение Советского Союза. Для ответа на этот вопрос мы воспользуемся материалом, приведенным в работе С. Ф. Шершова (фиг. 5). На фиг. 5, кроме величины территории и численности населения СССР по отношению ко всей поверхности суши и общей численности населения земного шара, представлены также запасы угля, нефти, природного газа и торфа, имеющиеся на территории Советского Союза, по отношению к соответствующим мировым запасам. На этой же фигуре приведены также лесные и гидроэнергетические ресурсы СССР по отношению к соответствующим мировым ресурсам.

Из фиг. 5 видно, что Советский Союз по своим энергетическим ресурсам является богатейшей в мире страной. По запасам нефти, природного газа и торфа, по лесным и

гидроэнергетическим ресурсам СССР занимает первое место среди всех стран мира, а по запасам угля — второе.

Какой же итог можно подвести на основе всего сказанного? Угрожает ли человечеству в будущем топливный голод? Есть ли расчет и в дальнейшем сооружать тепловые электрические станции?

На все эти вопросы можно ответить с полной уверенностью. Имеющихся на Земле запасов топлива, прежде всего



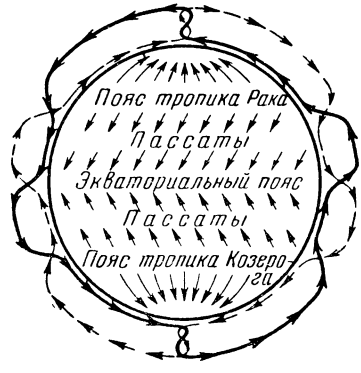
Фиг. 5. Территория, население и энергетические ресурсы СССР.

угля, хватит еще на очень большой срок, порядка 2 000 лет, с учетом возможного возрастания его потребления. Поэтому работа тепловых электрических станций, дальнейший рост мощности этих станций могут считаться обеспеченными на весьма долгий период времени. Более того, следует полагать также, что и по истечении весьма длительного периода времени, скажем, 2 000 лет, человечеству не придется столкнуться с проблемой топливного голода. В настоящее время наука развивается столь быстрыми темпами, что через такой значительный промежуток времени, бесспорно, станет возможным использовать, и при этом в крупных масштабах и с большим экономическим эффектом, другие источники энергии.

К источникам энергии, которые, в принципе, могут быть использованы взамен химической энергии топлива, отно-

сятся: гидравлическая энергия рек и водопадов, именуемая часто белым углем; энергия ветра, или, как ее иногда называют, голубой уголь; энергия морских приливов и отливов; солнечная энергия, поступающая на землю в виде солнечных лучей; атомная или ядерная энергия, о которой мы говорили выше.

Что касается гидравлической энергии рек и водопадов, то об ее использовании более подробно говорится в следующем разделе. Здесь же мы скажем только, что гидравлическая энергия с успехом используется в настоящее время для получения электрической энергии на гидростанциях. Однако можно с уверенностью сказать, что колоссальная, непрерывно растущая потребность в электрической энергии не может быть удовлетворена с нужным экономическим эффектом только лишь за счет гидроэлектростанций.



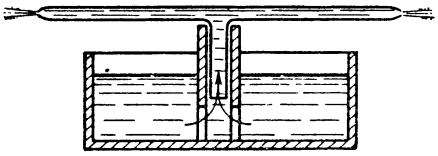
Фиг. 6. Направление пассатов.

Энергия ветра, или энергия движущихся масс воздуха, начала использоваться людьми с древних времен. Использование ветра для передвижения морских и речных судов дало возможность совершить много замечательных открытий, перевезти громадное количество грузов. Ветряные мельницы, крылья которых приводятся в движение за счет энергии движущегося воздуха, также получили распространение весьма давно.

Некоторые воздушные течения отличаются относительным постоянством, что облегчает их использование. К числу их относятся прежде всего воздушные течения, носящие наименование п а с с а т о в. Ветры, именуемые пассатами, дуют из обоих умеренных поясов (фиг. 6) [1] к югу и к северу, т. е. из северного умеренного пояса в направлении экватора и северного полюса, а из южного умеренного пояса — в направлении экватора и южного полюса. Возникновение пассатов объясняется главным образом тем, что в районе экватора большие массы воздуха поднимаются вверх, а на место их поступают новые количества воздуха, движение

[1] Фиг. 6 заимствована из книги П. П. Лазарева «Энергия, ее источники на земле и ее происхождение», ГЭИ, 1947.

которых и создает более или менее постоянно дующие ветры. Подъем больших масс воздуха в районе экватора объясняется двумя причинами. Главная из них — это вращение Земли вокруг своей собственной оси. Почему вращение Земли вызывает подъем воздуха на экваторе, лучше всего можно уяснить, если представить устройство, показанное на фиг. 7. На этой фигуре представлена трубка, вращающаяся вокруг вертикальной оси. За счет образующейся в результате вращения центробежной силы вода поднимается по вертикальному колену и с силой тем большей, чем больше скорость вращения трубки, выбрасывается в стороны. Нечто подобное происходит и с воздухом вследствие вращения Земли: под действием большой центробежной силы воздух отбрасывается в районе экватора в стороны, или, иначе говоря, поднимается. Подъему воздуха содействует также сильное нагревание поверхности земли вблизи экватора за счет солнечного тепла. Нагретые нижние слои воздуха становятся легче и стремятся по этой причине подняться. Как видно из фиг. 6, пассаты дуют в направлении меридианов, т. е. с севера на юг или с юга на север.



Фиг. 7. Движение воды за счет центробежной силы.

Периодически действующие воздушные течения образуются за счет различного нагревания суши и воды в морях и океанах. В дневные часы поверхность суши имеет температуру, значительно более высокую, чем температура верхних слоев моря. Поэтому воздух, находящийся над поверхностью суши, также нагревается больше и поднимается. На его место поступает воздух с моря, образуется воздушное течение — дневной бриз — ветер, дующий от моря к суше. Наоборот, ночью поверхность суши принимает температуру, более низкую, чем поверхность моря. Находящийся над морем более теплый воздух поднимается. На его место поступает воздух с суши. Так образуется ночной бриз — ветер, дующий от суши к морю. То, что верхние слои воды морей и океанов охлаждаются и нагреваются медленнее, чем поверхность суши, объясняется очень просто. Во-первых, вода имеет бо́льшую теплоемкость, чем скалы или земля, и, во-вторых, поверхность воды менее способна к поглощению или излучению тепла, чем поверх-

ность суши. Море всегда сохраняет более постоянную температуру, чем суша. Отсюда, как известно, и различие между морским и континентальным климатом.

Итак, бриз возникает в результате неодинаковой температуры суши и моря в дневное и ночное время. Еще одна разновидность периодически действующих воздушных течений — муссоны — образуется вследствие различия температуры между поверхностью суши и морем в зависимости от времени года. Нетрудно догадаться, что летом поверхность суши может разогреться более, чем верхние слои моря. Зимой, наоборот, поверхность суши может в большей мере охладиться. Это является причиной для возникновения муссонов: летнего муссона, дующего от моря к суше, и зимнего муссона, дующего от суши к морю. Бризы изменяют свое направление в зависимости от времени суток, муссоны — в зависимости от времени года.

Энергия движущихся слоев воздуха — энергия ветра — очень велика. Академик П. П. Лазарев писал, что если бы энергия всех ветров, дующих на земле, была использована, то она более чем в 3 000 раз превысила бы энергию, получаемую за счет сжигания топлива. Нет сомнения, что в будущем энергия ветра будет использоваться значительно шире. Большие работы по использованию энергии ветра ведутся в Советском Союзе.

К сожалению, использование энергии ветра наталкивается на очень значительные трудности. Это прежде всего непостоянство силы воздушных течений, изменяющихся в очень широких границах. Кроме того, для получения больших мощностей ветросиловые установки по необходимости должны быть очень большими и громоздкими. Можно предполагать поэтому, что в дальнейшем получат распространение главным образом такие электростанции, использующие силу ветра, мощность которых будет сравнительно небольшой.

Морские приливы и отливы, возникновение которых объясняется притяжением Солнца и главным образом Луны, представляют собой периодические колебания уровня моря. За время несколько более суток (за так называемые лунные сутки — 24 часа 50 минут) происходит дважды наибольший подъем уровня воды и наибольший его спад. В различных частях света величина приливов различна. Обычно приливы и отливы делаются почти незаметными на широтах свыше 65° к северу и югу от экватора. Кроме того, колебания уровня воды зависят от характера прибрежной полосы. Наибольший подъем воды, достигающий 21 метра, наблю-

дается у берегов Северной Америки. В Советском Союзе приливы значительны (до 10 метров) на побережье Баренцова, Белого и Охотского морей.

Мысль об использовании энергии приливов возникла давно. Принципиальная схема установки, использующей энергию приливов, очень проста. Во время прилива при наибольшем уровне воды заполняются водохранилища, расположенные выше среднего уровня моря. Во время отлива вода из водохранилищ выпускается, а образовавшийся перепад уровней используется для привода в действие гидравлической машины, т. е. для получения электрической энергии. Если принять во внимание, что суточная энергия приливной волны во много раз превышает суточную энергию всех рек и водопадов, то, на первый взгляд, может показаться, что за счет энергии приливов можно полностью обеспечить нужную выработку электрической энергии.

К сожалению, на этом пути нас также ожидают серьезные разочарования. Прежде всего в большинстве мест приливы имеют очень незначительную высоту, измеряемую не метрами, а сантиметрами. Конечно, не может быть и речи о том, чтобы при такой незначительной разности уровней сооружать мощные установки для получения электрической энергии. Кроме того, значительные неудобства создает непрерывное изменение разности уровней и даже необходимость временами (в часы приливов) вовсе останавливать установку.

Суммируя все сказанное, можно предполагать, что использование энергии приливной волны имеет известную перспективу в местах, где происходит значительный подъем воды (порядка 10 метров и более). Можно думать, что в будущем такие установки будут сооружены. Нет основания, однако, предполагать, что энергия приливов сможет заменить энергию топлива.

Солнце представляет собой практически неиссякаемый источник энергии. Тепло, получаемое Землей от Солнца, — ничтожная доля всего того количества тепла, которое Солнце излучает. Но даже эта незначительная доля солнечного тепла громадна. За год Земля получает от Солнца больше энергии, чем ее аккумулировано во всех ископаемых углях нашей планеты. Естественно поэтому, что мысль ученых и инженеров давно уже направлена на то, чтобы использовать хотя бы часть того громадного количества энергии, которое солнечные лучи приносят на Землю.

Но получить электрическую энергию за счет теплоты солнечных лучей оказывается непросто. Любой тепловой двигатель, т. е. машина, превращающая тепловую энергию в энергию механическую, работает достаточно экономично только тогда, когда температура пара или газа в нем значительно выше температуры окружающей среды. Об этом подробнее будет сказано в дальнейшем. Но можно сказать заранее, что современные совершенные тепловые двигатели работают на паре или газе, имеющем температуру порядка 500° С и даже значительно выше. Это значит, что для продуктивного использования солнечного тепла необходимо применить специальные устройства, например систему зеркал, с тем чтобы достигнуть достаточно высоких температур. Но такие устройства получаются весьма громоздкими и дорогими. Значительное неудобство заключается также в том, что работа такой установки зависит не только от времени суток и от времени года, но также и от погоды.

Долголетняя работа советских ученых, направленная на использование солнечной энергии, в частности группы ученых Энергетического института Академии наук, принесла немалые плоды. В настоящее время на юге СССР построены и работают установки, в которых за счет солнечного тепла нагревается вода, используемая для бань, прачечных и других бытовых целей; построены солнечные установки, предназначенные для сушки фруктов.

Но для того чтобы использовать тепло солнечных лучей для получения электрической энергии, необходимо еще много работать. Возможно, что наиболее перспективным в этом отношении является использование метода фотохимических реакций, т. е. искусственного воспроизведения реакций такого характера, как совершающиеся в зеленых листьях растений. Читатель помнит, что зеленые листья растений с помощью особого вещества — хлорофилла — обладают способностью поглощения энергии солнечных лучей и превращения ее в химическую энергию органических тканей.

Особенно большие перспективы имеет использование ядерной (атомной) энергии.

Трудно, конечно, сказать, что будет представлять собой техника и, в частности, энергетика, скажем, через 2 000 лет, но можно думать, что в качестве практически неиссякаемого источника энергии будет использоваться ядерная энергия. Есть все основания полагать, что для экономически выгодного использования ядерной энергии для целей энергетики потребуется не 2 000 лет, а во много раз меньшее время.

Можно предположить также, что при использовании ядерной энергии для энергетических целей тепловые электрические станции, конечно, существенно измененные, будут представлять не меньшее значение.

В буржуазной литературе за последние 50 лет неоднократно поднимался вопрос о якобы неизбежном топливном голоде и связанным с ним крушением цивилизации, перед лицом которых рано или поздно окажется человечество. Мы можем сказать, что все эти рассуждения и измышления лишены научного основания и должны быть решительно отвергнуты.

Из сказанного никак нельзя сделать вывод, что экономия угля является лишним делом. Это далеко не так. Не говоря уже о том, что добыча угля требует большого труда, следует помнить, что уголь является не только важным энергетическим топливом, но и весьма ценным сырьем для ряда отраслей промышленности. В еще большей мере сказанное относится к нефти. В нашем социалистическом государстве использование топливных и других природных ресурсов поставлено на научную основу, ведется планово и экономно.

4. Не выгоднее ли строить гидростанции

Из всего сказанного читатель мог сделать вывод, что запасы ископаемых топлив очень велики. Существующие и вновь создаваемые тепловые электрические станции на много сотен лет полностью обеспечены топливом. Но можно предвидеть другой вопрос читателя: не является ли более целесообразным строительство гидроэлектростанций? Ведь используемая для получения электрической энергии гидравлическая энергия рек является для нас «даровой». Не будут ли тепловые электрические станции со временем вытеснены гидроэлектростанциями?

Отвечая на этот вопрос, следует прежде всего сказать, что гидроэлектростанции имеют ряд преимуществ по сравнению с теплоэлектростанциями. Эти преимущества заключаются, в первую очередь, в том, что энергия движущейся воды является энергией восполняемой, энергией предоставляемой нам природой, так сказать, «в готовом к использованию виде», энергией даровой. Используя энергию движущейся в реках воды, мы по существу также используем солнечную энергию, так как именно за счет энергии солнца вода совершает свой круговорот. Испаряясь под влиянием

солнечного тепла с поверхности главным образом морей и океанов, вода образует облака и затем возвращается частично обратно в моря и океаны, а частично на поверхность суши в виде осадков. Вода, попавшая на поверхность суши, увлажняет ее и просачивается до водонепроницаемых слоев, образуя затем ключи, ручьи и реки, по которым возвращается в моря и океаны. Такой круговорот вода совершает непрерывно, и так как солнечная энергия практически является неисчерпаемой, то энергия движущейся в реках воды представляет собой энергию восполняемую.

Существенным преимуществом гидроэлектростанций является также меньшая потребность в обслуживающем персонале по сравнению с теплоэлектростанциями равной мощности и относительная легкость автоматизации всех основных процессов. В силу перечисленных причин стоимость электрической энергии, полученной на гидроэлектростанции, оказывается меньше стоимости электроэнергии, полученной на теплоэлектростанции.

Очевидна поэтому целесообразность получения электрической энергии на гидроэлектростанциях, а следовательно, и необходимость дальнейшего увеличения их мощности. Как сказано выше, Советский Союз занимает первое место в мире по гидроэнергетическим ресурсам. Согласно подсчетам, сделанным до начала Великой Отечественной войны, мощность всех рек Советского Союза составляет около 300 миллионов киловатт, т. е. во много раз превышает мощность всех электростанций СССР в настоящее время. Конечно, далеко не вся мощность рек может быть практически использована для выработки электрической энергии.

До Великой Октябрьской социалистической революции в России вообще не было крупных гидроэлектростанций. Мощность наибольшей из них составляла всего 1 250 киловатт. После Великой Октябрьской социалистической революции началось сооружение крупных гидроэлектростанций. В 1940 г. на гидроэлектростанциях Советского Союза было выработано около 13% всей электроэнергии.

Но особенно грандиозный масштаб строительство гидроэлектростанций приняло за последние годы. В настоящее время развернуто строительство крупнейших гидроэлектростанций — Куйбышевской и Сталинградской. По своим масштабам эти сооружения не имеют раных в истории. Куйбышевская и Сталинградская гидроэлектростанции будут крупнейшими в мире. Мощность гидрогенераторов первой из них составит 2,1 миллиона киловатт, а второй — 1,7 миллиона

киловатт, в то время как мощность крупнейшей из действующих гидростанций — гидроэлектростанции Боулдэр-Дэм в США — равна примерно 1 миллиону киловатт. Усилиями советского народа количество электрической энергии, вырабатываемой на гидроэлектростанциях, в ближайшие годы будет на много увеличено.

Изложенные выше факты и соображения свидетельствуют о большом значении гидроэлектростанций, а также о том, что роль гидроэлектростанций в энергетическом хозяйстве в дальнейшем будет увеличиваться. Однако вероятный вопрос читателя — не будут ли тепловые электростанции со временем вытеснены гидроэлектростанциями? — пока остался без ответа. Ответим теперь на этот вопрос. Тепловые электростанции не будут в дальнейшем вытеснены гидравлическими, так как разумное решение вопроса заключается в комплексном использовании как тех, так и других.

Существо дела заключается в следующем. Так же как использование энергии морских приливов целесообразно далеко не на любом побережье, а только там, где приливная волна достаточно велика, использование гидравлической энергии текущей воды целесообразно отнюдь не на каждой реке. Мощные гидроэлектростанции могут быть построены только на достаточно полноводных реках, несущих большое количество воды. Нельзя же, действительно, соорудить мощную гидроэлектростанцию на небольшой речке. Кроме того, производя выбор места для строительства плотины будущей гидростанции, необходимо учитывать ряд важных обстоятельств. В частности, нельзя не учитывать, какие площади окажутся затопленными водохранилищем, насколько большой длины должна быть построена плотина. Разумеется, что все это скажется и на стоимости строительства, и на его общем народнохозяйственном эффекте. Поэтому, планируя строительство электрических станций, никак нельзя заранее отдать предпочтение гидростанциям перед тепловыми станциями. Во многих случаях строительство тепловых электрических станций оказывается экономически более выгодным.

Необходимо также иметь в виду ряд других трудностей при строительстве и эксплуатации гидростанций. Сооружение гидростанций требует, как правило, очень больших капитальных затрат даже при его высокой механизации. Работа же гидростанций в большинстве случаев зависит от времени года, так как количество воды, несомой реками, меняется в зависимости от времени года. Счастливым исключением в этом отношении является река Ангара. Озеро Бай-

кал, из которого Ангара вытекает, является настолько большим, практически неиссякаемым водохранилищем, что расход воды в Ангаре сравнительно мало зависит от времени года. Это создает чрезвычайно благоприятные условия для строительства на Ангаре гидростанций.

Наконец, необходимо помнить, что, кроме электрической энергии, для производства и для удовлетворения нужд населения требуется много тепла. И этот довод, пожалуй, больше, чем всякий другой, говорит в пользу сооружения тепловых электрических станций. Мы уже говорили выше о работе теплоэлектроцентралей, или ТЭЦ, — электростанций, снабжающих потребителя как электрической энергией, так и теплом. Сооружение ТЭЦ — электростанций, работа которых оказывается особо выгодной, будет в дальнейшем производиться в очень широких масштабах.

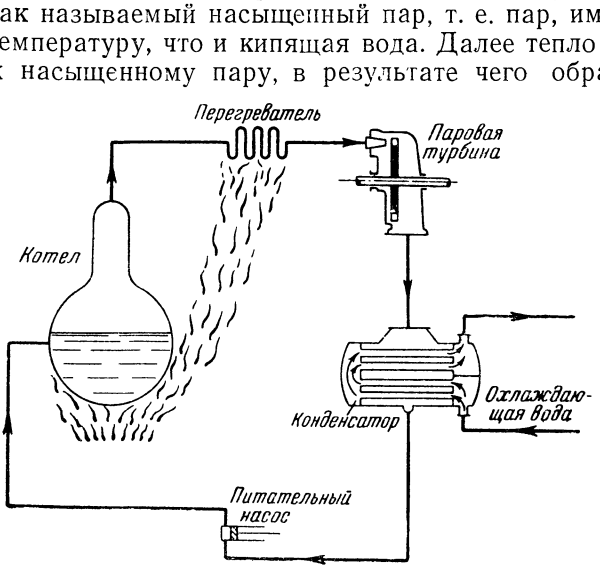
Между советскими учеными и инженерами нет разногласий в отношении того, что единственно правильным направлением развития нашей энергетики является комплексное использование тепло- и гидроэлектростанций. Выше было сказано, что в предвоенные годы на гидроэлектростанциях Советского Союза было выработано около 13% всей электроэнергии. В ближайшие годы эта цифра должна достигнуть величины порядка 20%. Роль гидростанций будет, тем самым, увеличена, но основное количество электрической энергии попрежнему будет производиться на тепловых электрических станциях.

5. Устройство тепловой электрической станции

Теперь, когда читатель, повидимому, уже не имеет оснований сомневаться в целесообразности получения электрической энергии с помощью теплоэлектростанций и в целесообразности их дальнейшего строительства, перейдем к объяснению принципа работы тепловой электрической станции.

Как уже было сказано выше, назначение теплоэлектростанции заключается в превращении химической энергии топлива в электрическую энергию. Так как совершить такое преобразование непосредственно оказывается практически невозможным, то приходится сначала превращать химическую энергию топлива в тепло, что производится путем сжигания топлива, затем преобразовывать тепло в механическую энергию и, наконец, эту последнюю превращать в электрическую энергию.

На фиг. 8 представлена простейшая схема тепловой части электрической станции, именуемой часто паросиловой установкой. Сжигание топлива производится в топке котла. При этом выделяется большое количество тепла. Полученное тепло передается воде, находящейся в паровом котле. Вследствие этого вода нагревается и затем испаряется, образуя так называемый насыщенный пар, т. е. пар, имеющий ту же температуру, что и кипящая вода. Далее тепло подводится к насыщенному пару, в результате чего образуется



Фиг. 8. Схема паросиловой установки.

перегретый пар, т. е. пар, имеющий более высокую температуру, чем испаряющаяся при том же давлении вода. Перегретый пар получается из насыщенного в пароперегревателе, в большинстве случаев представляющем собой змеевик из стальных труб. Пар движется внутри труб, с внешней же стороны змеевик омывается горячими газами.

Если бы давление в котле было равно атмосферному, то воду необходимо было бы нагреть до температуры 100° С; при дальнейшем сообщении тепла она начала бы быстро испаряться. Получающийся при этом насыщенный пар имел бы также температуру 100° С. При атмосферном давлении пар будет перегретым в том случае, когда температура его выше 100° С. Если давление в котле выше атмосферного, то насыщенный пар имеет температуру выше 100° С. Температура насыщенного пара тем выше, чем больше давление. В настоящее время в энергетике вообще не приме-

няются паровые котлы с давлением, близким к атмосферному. Гораздо более выгодным оказывается применение паровых котлов, рассчитанных на значительно большее давление, порядка 100 атмосфер и более. Температура насыщенного пара при этом составляет 310° С и более.

Из пароперегревателя перегретый водяной пар по стальному трубопроводу подается к тепловому двигателю, чаще всего — паровой турбине, представленной схематически на фиг. 8. В существующих паросиловых установках электрических станций другие двигатели почти никогда не применяются. Перегретый водяной пар, поступающий в тепловой двигатель, содержит большой запас тепловой энергии, выделившейся в результате сжигания топлива. Задачей теплового двигателя является преобразование тепловой энергии пара в механическую энергию.

Давление и температура пара на входе в паровую турбину, именуемые обычно начальными параметрами пара, значительно выше, чем давление и температура пара на выходе из турбины. Давление и температура пара на выходе из паровой турбины, равные давлению и температуре в конденсаторе, называются обычно конечными параметрами. В настоящее время, как уже было сказано, в энергетике применяется пар весьма высоких начальных параметров, с давлением до 300 атмосфер и с температурой до 600° С. Конечные параметры, напротив, выбираются низкими: давление около 0,04 атмосферы, т. е. в 25 раз меньше атмосферного, а температура около 30° С, т. е. близкой к температуре окружающей среды. При расширении пара в турбине вследствие уменьшения давления и температуры пара количество заключенной в нем тепловой энергии на много уменьшается. Так как процесс расширения пара происходит весьма быстро, то за это весьма короткое время сколько-нибудь значительный переход тепла от пара к окружающей среде осуществиться не успевает. Куда же идет избыток тепловой энергии? Известно ведь, что согласно основному закону природы — закону сохранения и превращения энергии — невозможно уничтожить или получить «из ничего» любое, даже самое малое, количество энергии. Энергия может только переходить из одного вида в другой. Очевидно, именно с такого рода преобразованием энергии мы имеем дело и в данном случае. Избыток тепловой энергии, заключенный ранее в паре, перешел в механическую энергию и может быть использован по нашему усмотрению. О том, как работает паровая турбина, рассказывается ниже.

Здесь мы скажем только, что струя пара, поступающая на лопатки турбины, имеет весьма большую скорость, часто превышающую скорость звука. Струя пара приводит во вращение диск паровой турбины и вал, на который диск насажен. Вал турбины может быть связан, например, с электрической машиной — генератором, не показанным на фиг. 8. В задачу генератора входит преобразование механической энергии вращения вала в энергию электрическую. Таким образом, химическая энергия топлива в паросиловой установке превращается в механическую и далее в электрическую энергию.

Пар, совершивший работу в двигателе, поступает в конденсатор (фиг. 8). По трубкам конденсатора непрерывно прокачивается охлаждающая вода, забираемая обычно из какого-либо естественного водоема: реки, озера, моря. Охлаждающая вода забирает тепло от пара, поступившего в конденсатор, вследствие чего пар конденсируется, т. е. превращается в воду. Образовавшаяся в результате конденсации вода с помощью насоса подается в паровой котел, в котором снова испаряется, и весь процесс повторяется заново.

Таково в принципе действие паросиловой установки теплоэлектрической станции. Как видно, пар служит посредником, так называемым рабочим телом, с помощью которого химическая энергия топлива, преобразованная в тепловую энергию, превращается в механическую энергию.

Не следует думать, конечно, что устройство современного, мощного, парового котла или теплового двигателя столь просто, как это показано на фиг. 8. Напротив, котел и турбина, являющиеся важнейшими элементами паросиловой установки, имеют весьма сложное устройство.

К объяснению работы парового котла и паровой турбины мы сейчас и приступаем.

6. Паровой котел

Паровой котел предназначен для получения водяного пара обычно высокого давления и температуры. Так как тепловые электрические станции в подавляющем большинстве случаев имеют весьма большую мощность (порядка многих десятков, а зачастую и сотен, тысяч киловатт), то для их работы требуется очень много пара. Поэтому современные паровые котлы электрических станций имеют большую паропроизводительность, т. е. с их помощью можно получить

много тонн пара в час. Многие паровые котлы мощных электрических станций имеют паропроизводительность 200 и даже более тонн пара в час.

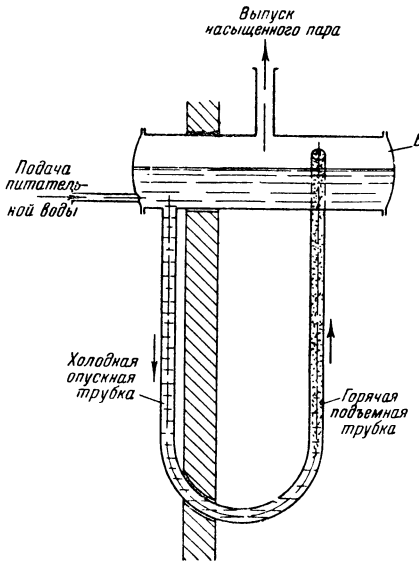
Котел высокого давления с такой большой паропроизводительностью потребляет очень много топлива. Если в качестве топлива используется, например, бурый уголь Подмосковного бассейна, то его потребуется около 65 тонн в час, что составит около 65 двухосных саморазгружающихся вагонов в сутки. Такой котел (или, точнее сказать, котельная установка) весит около тысячи тонн и стоит несколько миллионов рублей. Котельная установка включает большое число различных устройств и механизмов и для размещения ее необходимо большое многоэтажное помещение.

Много сложных вопросов должно быть решено для обеспечения хорошей, надежной работы котельной установки. К числу таких вопросов, в частности, относятся: правильная организация процесса сжигания топлива, позволяющая с высокой экономичностью использовать низкосортные сорта топлива; предварительная очистка подаваемой в котел воды, в результате которой сводятся к минимуму отложения солей при испарении и унос солей с паром в тепловой двигатель (паровую турбину); улавливание золы из дымовых газов — вопрос, имеющий исключительно важное значение при сжигании топлива в виде пыли, и многие другие. В настоящее время Энергетический институт Академии наук СССР работает над проблемой комбинированного производства не только электрической энергии и тепла для отопительных нужд, но также и высококалорийного газа для бытового потребления и промышленности.

Современные паровые котлы электрических станций можно разделить на два основных вида: котлы с естественной циркуляцией и котлы с принудительной циркуляцией; среди котлов второго типа на электростанциях Советского Союза наибольшее распространение получили так называемые прямоточные котлы.

Принцип работы котла с естественной циркуляцией легко себе представить с помощью фиг. 9. В барабан котла, представляющий собой стальной цилиндр, рассчитанный на высокое давление, непрерывно подводится питательная вода, предназначенная для образования из нее пара. Барабан имеет систему опускных (холодных) и подъемных (обогреваемых) трубок. Тепло, образовавшееся в результате сжигания топлива, подводится к подъемным (обогреваемым) трубкам, одна из которых показана на фиг. 9. В результате

подвода тепла вода в этой трубке испаряется — образуется насыщенный пар. Так как удельный вес пара во много раз меньше веса воды, то образовавшийся в подъемной трубке пар поднимается и заполняет объем барабана над уровнем питательной воды. На место испарившейся воды поступает новая ее порция через опускные необогреваемые трубки. Таким образом, через систему опускных и подъемных трубок происходит непрерывная циркуляция воды и пара, возникающая вследствие разности удельных весов воды и пара. Такая циркуляция именуется естественной, откуда возникло и наименование котла. Насыщенный пар, поступающий в барабан, непрерывно отводится из него, а вода подается и, таким образом, уровень питательной воды в барабане поддерживается постоянным.

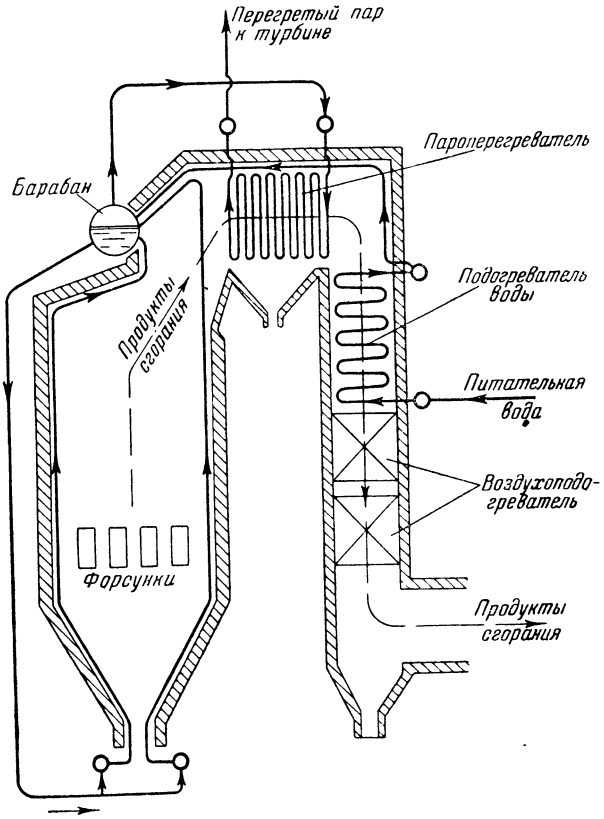


Фиг. 9. Контур естественной циркуляции.

На фиг. 10 представлена принципиальная схема современной котельной установки с естественной циркуляцией большой паропроизводительности. Топливо (обычно размолотый порошкообразный уголь) и необходимый для его сгорания воздух подаются через форсунки в топку котла. Образовавшиеся в результате горения топлива газы следуют по пути, указанному на фиг. 10 пунктирной линией, отсасываются дымососом (не показанном на схеме) и выбрасываются в атмосферу. Из котла продукты сгорания выходят уже охлажденными, так как тепло, выделившееся при сгорании топлива, в своей большей части передается воде и пару.

Питательная вода (конденсат) поступает в подогреватель, а затем в барабан котла. Барабан котла снабжен необогреваемыми, расположенными вне пределов топки опускными трубами и подъемными, обогреваемыми трубами. В результате естественной циркуляции, происходящей,

как сказано выше, вследствие разности удельных весов воды и насыщенного пара, в барабан непрерывно поступает насыщенный пар. Из барабана насыщенный пар поступает в пароперегреватель, в котором благодаря дальнейшему подводу тепла нагревается и превращается в перегретый пар. Пере-



Фиг. 10. Схема котла с естественной циркуляцией.

гретый пар из пароперегревателя подается к тепловому двигателю (паровой турбине). Воздух, необходимый для горения топлива, предварительно нагревается в воздухоподогревателе.

Обогреваемые подъемные трубы, в которых происходит собственно процесс парообразования, как это видно из фиг. 10, расположены вдоль стенок топочной камеры. Они

обогреваются в основном за счет излучения [1] и называются экранными поверхностями нагрева. В современных котельных агрегатах высокой производительности основная часть кипятильных труб, т. е. труб, в которых из воды образуется пар, устанавливается по стенкам топки, образуя большую экранную поверхность. Именно такой тип котельной установки, именуемый установкой экранного типа, представлен на фиг. 10.

Широкое распространение котельных установок экранного типа объясняется их значительными преимуществами. Дело в том, что температура внутри топочной камеры современного, мощного котельного агрегата достигает 1 500° С и более. Такая высокая температура действует разрушающе на стенки топочной камеры, несмотря на то, что они всегда выполняются из огнеупорного материала, большей частью из огнеупорного кирпича; кроме того, плавящаяся при таких температурах зола топлива оказывает разъедающее действие на огнеупорный кирпич. Возникает необходимость защиты стен топочной камеры. Наиболее удачным способом защиты является устройство экранных поверхностей, предохраняющих стенки топки от разрушающего воздействия высокой температуры и плавящейся золы топлива.

Подогреватель поступающей в котел воды (или, как его называют, экономайзер) и пароперегреватель в отличие от испарительных (экранных) труб работают по прямоточному принципу. Это отличие заключается в том, что для превращения в пар всей заполняющей испарительные трубы воды эта последняя должна несколько раз протечь через испарительные трубы, т. е. мы сталкиваемся здесь с так называемой многократной циркуляцией, в то время как через водяной подогреватель или пароперегреватель вода или пар проходят 1 раз.

Как уже было сказано выше, из котлов с принудительной циркуляцией большое применение нашли прямоточные котлы.

Принцип устройства прямоточного котла весьма прост. В принципе прямоточный котел представляет собой обогре-

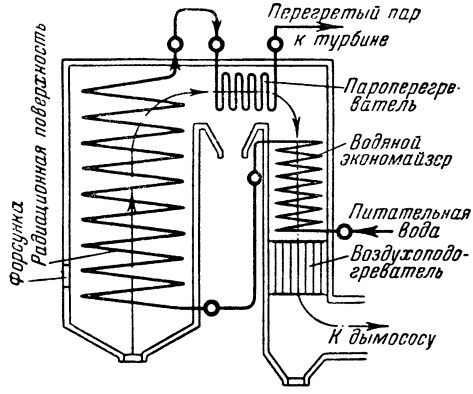
---

[1] Как известно, тепло может передаваться от одного тела к другому тремя способами: теплопроводностью, т. е. в результате непосредственного соприкосновения двух тел; конвекцией — способом, основанным на переносе тепла движущимися частицами жидкости или газа; излучением. Передача тепла излучением замечательна тем, что может осуществляться на очень большие расстояния и через весьма разреженную среду; таким путем, например, Земля получает тепло от Солнца.

ваемый змеевик, в один конец которого подается вода, а из другого конца непрерывно поступает перегретый пар. Схема прямоточного котла представлена на фиг. 11. Она настолько проста, что не требует специальных пояснений.

В этом случае вода или пар протекают через трубы котельной установки благодаря напору, создаваемому насосом. Естественная циркуляция здесь вообще отсутствует, в силу чего прямоточные котлы именуются также котлами с принудительной циркуляцией.

Основное отличие между современными крупными котельными установками с естественной циркуляцией и с принудительной циркуляцией (в частности, прямоточными) сводится к устройству испарительной поверхности (экранной поверхности) и к отсутствию барабана у прямоточного котла. По трубам экранной поверхности прямоточного котла вода и пар движутся за счет работы насоса. В котле же с естественной циркуляцией движение воды и пара по трубам экранной поверхности происходит вследствие разности удельных весов воды и пара. Что касается прочих элементов котельной установки (водяного подогревателя, пароперегревателя, воздушного подогревателя, топки), то они по существу одинаковы у обоих типов котлов.



Фиг. 11. Схема прямоточного котла.

Благодаря отсутствию барабана и необогреваемых труб экранной поверхности нагрева расход металла на прямоточный котел при прочих равных условиях меньше, чем на котел с естественной циркуляцией. Это является преимуществом прямоточных котлов перед котлами барабанными (с естественной циркуляцией). Кроме того, следует иметь в виду, что котельные установки с естественной циркуляцией практически могут быть использованы только в том случае, когда давление воды не превышает так называемого критического давления, равного для воды примерно 226 атмосферам. С понятием критического давления (критического состояния) читатель бесспорно знаком из курса физики. Здесь

мы отметим только, что при давлениях, больших, чем критическое (т. е. для воды при давлениях, больших 225,65 атмосферы), само понятие «испарение» теряет смысл, так как при этих условиях уничтожается различие между жидкостью и паром. Поэтому принцип естественной циркуляции, основанный на значительной разнице удельных весов между насыщенным паром и кипящей жидкостью, не может быть использован в так называемой надкритической области, т. е. для водяного пара при давлениях выше 226 атмосфер. Естественно, что котлы, рассчитанные на выработку пара сверхкритического давления, должны быть котлами с принудительной циркуляцией.

К недостаткам прямоточных котлов по сравнению с барабанными котлами следует отнести особо высокие требования к качеству питательной воды, предъявляемые эксплуатацией прямоточных котлов. Кратко поясним сказанное. Для того чтобы любой котельный агрегат работал надежно и длительно, без аварий, нельзя допускать отложения сколько-нибудь значительного количества солей (накипи) на внутренней поверхности обогреваемых труб. Когда труба, например, экранной поверхности свободна от накипи, тогда, несмотря на высокую температуру в топке, температура стенки трубы не делается слишком высокой, так как труба энергично охлаждается протекающим внутри ее потоком воды или пара. Если же внутри трубы образуется значительный слой накипи, отличающейся плохой проводимостью тепла, охлаждение стенки трубы водой или паром делается в несколько раз меньшим, температура стенки резко повышается и она может через сравнительно короткое время перегореть, что приведет к необходимости остановки и охлаждения котла для ремонта.

Что представляет собой накипь, образующаяся в котельных трубах и как она возникает? Накипь представляет собой отложение солей на внутренней поверхности труб и возникает она вследствие того, что питательная вода, подаваемая в котельную установку, в том или ином количестве, обязательно содержит в себе в растворенном виде различные соли. Образующийся вследствие испарения воды пар обычно уносит с собой сравнительно небольшое количество солей, большая же часть солей остается в еще не испарившейся воде. Таким образом, содержание солей, отнесенных на 1 литр воды (солесодержание воды, измеряемое обычно количеством миллиграммов солей, растворенных в 1 литре воды), по мере испарения воды и образования пара, непре-

рывно увеличивается. Чем меньше остается не испарившейся еще воды, тем больше содержание в ней солей. При испарении оставшейся воды высокого солесодержания большая часть солей переходит из растворенного состояния в твердое и отлагается на внутренней поверхности труб. Из сказанного следует, что отложение солей должно происходить главным образом в испарительных трубках в конце процесса парообразования. Очевидно, что для уменьшения возможного отложения накипи следует снижать количество солей, растворенных в питательной воде.

В прямоточном котле, работающем по схеме, представленной на фиг. 11, почти все соли, вносимые с питательной водой (за исключением солей, уносимых паром), должны отложиться на поверхностях нагрева испарительной зоны. Для того чтобы отложение солей происходило не слишком быстро, прямоточные котлы питают только конденсатом с весьма малым солесодержанием. Кроме того, для увеличения надежности и срока безостановочной работы котла прибегают к специальным мероприятиям. К числу таких мероприятий принадлежат, в частности, периодические промывки котла слабым раствором кислоты.

Требования, предъявляемые к питательной воде барабанных котлов, несколько меньше. Это объясняется следующим. В результате многократной циркуляции в испарительных трубах и в барабане котла образуется вода (котловая вода), обладающая значительно бо́льшим солесодержанием, чем питательная вода на входе в котел. Солесодержание котловой воды все время увеличивается вследствие непрерывно происходящего испарения, несмотря на безостановочную подачу в барабан котла подогретой питательной воды, обладающей значительно меньшим солесодержанием. Однако солесодержание котловой воды легко поддержать на неизменном уровне, не допуская его дальнейшего увеличения. Для этого достаточно производить непрерывный или периодический выпуск котловой воды из барабана (устроить так называемую продувку котла) с таким расчетом, чтобы количество солей, вносимых в котельный агрегат с питательной водой, в единицу времени было бы равно количеству солей, выбрасываемых из котельного агрегата за то же время с продувочной водой. Очевидно, что количество продувочной воды, выпускаемой из котла, например, в час, будет во столько раз меньше количества питательной воды, подаваемой за час в котел, во сколько раз солесодержание котловой воды больше солесодержания питательной воды. В со-

временных мощных барабанных котлах в большинстве случаев применяют непрерывную продувку.

С целью улучшения водного режима прямоточного котла, увеличения надежности и длительности непрерывной его работы в последние годы делаются попытки выполнения так называемых сепараторных прямоточных котлов. Отличие сепараторного прямоточного котла от обычного прямоточного котла заключается в том, что в первом, в конце зоны испарения, устанавливается сепаратор — устройство, позволяющее отделить воду от пара. Таким образом, влажный пар (т. е. смесь сухого насыщенного пара и кипящей воды), имеющий уже весьма малую долю влаги, поступает в сепаратор. В сепараторе влага, содержащаяся в паре и обладающая тем большим солесодержанием, чем меньше ее количество, отделяется от пара и может быть выброшена из котла путем непрерывной продувки сепаратора. Если бы сепаратор мог отделить всю влагу, а эта последняя целиком удалялась бы, то отложений на стенках труб прямоточного котла практически не было бы вообще.

Нет сомнения в том, что прямоточные котлы с сепараторами пара имеют большую перспективу развития. К сожалению, создание сепаратора, обладающего высоким к. п. д. по влагоудалению, является делом нелегким. Также сложным делом является регулирование работы такого котла. Кроме того, расход металла на сепараторный прямоточный котел значительно повышается.

Котлы с естественной циркуляцией и прямоточные котлы, как сказано выше, имеют свои преимущества и недостатки и в настоящее время котлостроительная промышленность Советского Союза выпускает в большом количестве котельные агрегаты обоих типов.

7. Паровая турбина

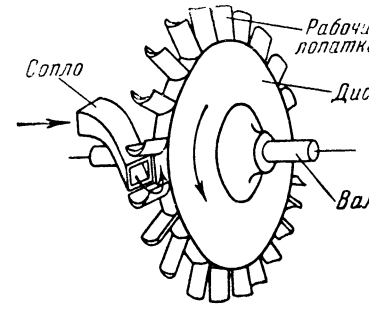
Паровая турбина является единственным нашедшим широкое распространение двигателем современных мощных тепловых электрических станций. Это объясняется большими преимуществами турбины перед другими тепловыми двигателями, о чем мы расскажем далее.

Познакомимся прежде всего с принципом работы турбодвигателя.

Принципиальное отличие турбин от поршневых двигателей заключается в том, что поршневые двигатели (паровые машины, поршневые двигатели внутреннего сгорания)

превращают в работу тепловую энергию, заключенную в паре или газе, а в турбинах (паровых или газовых) тепловая энергия сначала превращается в энергию движения потока газа или пара (кинетическую энергию парового или газового потока), а затем эта последняя превращается в механическую работу. В соответствии с темой книги нас прежде всего интересует паровая турбина (турбина, работающая на водяном паре). Поэтому мы кратко расскажем сейчас именно о работе паровой турбины.

Простейшая схема устройства турбины показана на фиг. 12. На валу турбины помещается диск. Вал и диск турбины составляют одно целое (вращаются вместе); диск насаживается на вал в нагретом состоянии и закрепляется с помощью шпонки. На внешней окружности турбинного диска расположено большое количество так называемых рабочих лопаток, жестко закрепленных на поверхности диска. Для преобразования тепловой энергии пара в энергию движения имеется одно или несколько сопел. Струя пара, обладающая незначительной скоростью (порядка нескольких десятков метров в секунду), поступает в сопло в направлении стрелки, показанной на фиг. 12. Площадь сечения канала сопла неодинакова по длине сопла. Характер изменения поперечных сечений сопла (профиль сопла) выбирается таким, чтобы скорость струи пара непрерывно возрастала. В современных паровых турбинах скорость потока на выходе из сопла обычно очень велика; она измеряется сотнями метров в секунду и во многих случаях превышает скорость распространения звука[1].



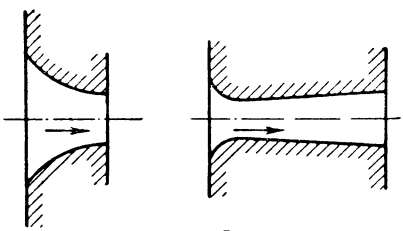
Фиг. 12. Простейшая схема устройства турбин.

Как показывают теория и опыт, в случаях, когда скорость струи пара на выходе из сопла не должна превышать скорости звука, сопло должно быть суживающимся, т. е. площади поперечных сечений канала сопла должны уменьшаться в направлении движения потока. В этом случае

[1] Следует напомнить читателю, что скорость звука при распространении его в воздухе составляет около 340 метров в секунду. В водяном паре скорость распространения звука обычно еще больше.

площадь сечения канала сопла на входе будет наибольшей, и площадь сечения канала сопла на выходе — наименьшей. Сопло будет представлять собой подобие воронки, по которой струя пара движется от большого входного отверстия к малому, выходному.

В случаях же, когда скорость потока на выходе из сопла должна быть больше скорости звука, площади поперечных сечений канала сопла сначала должны уменьшаться в направлении движения потока, а затем снова увеличиваться. При этом наименьшая площадь поперечного сечения сопла будет где-то в середине. Такое сопло обычно именуют расширяющимся, или сверхзвуковым, соплом. В наиболее узком сечении сопла достигается звуковая скорость (именуемая также критической скоростью), а на выходе из сопла, как уже сказано, — сверхзвуковая скорость.



Фиг. 13. Сопла.

Суживающееся и расширяющееся сопла представлены на фиг. 13.

Таким образом, скорость струи пара на выходе из сопла намного превышает скорость потока на входе в сопло. Приращение кинетической энергии потока, естественно, не может происходить «бесплатно». Действительно, за счет увеличения скоростной энергии потока уменьшается тепловая энергия газа или пара. Это видно из того, что температура и давление пара на входе в сопло значительно больше, чем на выходе из сопла.

Струя пара, обладающая весьма большой скоростью, часто превышающей скорость звука, по выходе из сопла поступает в канал между рабочими лопатками. Если бы рабочие лопатки были плоскими, канал, образуемый ими, прямолинейным, а направление скорости струи, выходящей из сопла, совпадало бы с осью канала, то рабочее колесо турбины осталось бы неподвижным, а скорость на входе в канал, образуемый рабочими лопатками, и на выходе из него (если пренебречь сравнительно небольшими потерями скорости вследствие трения) была бы одинаковой. На самом деле, как то видно из фиг. 12, рабочие лопатки имеют изогнутую форму и образуемый ими канал также

имеет криволинейную форму. Поэтому направление скорости потока пара при протекании между рабочими лопатками непрерывно изменяется (см. стрелку на фиг. 12).

Известно, что для того, чтобы изменить скорость какого-либо движущегося тела, необходимо приложить к этому телу определенную силу. Сила эта должна быть тем больше, чем больше изменение скорости. Для того чтобы изменить скорость движущегося поезда, например остановить его, требуется приложить значительную силу к колодкам тормозов. При этом скоростная энергия движущегося поезда вследствие трения колес о колодки тормозов переходит в тепло и поезд останавливается.

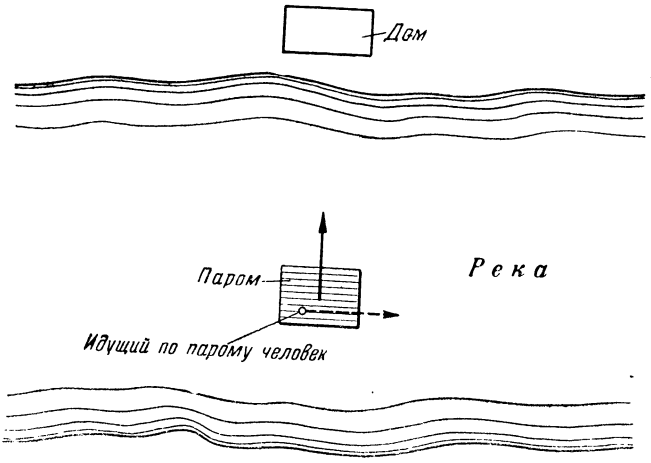
Приведем другой пример. Допустим, что по ровной горизонтальной поверхности катится с определенной скоростью шар. Если на пути шара встречается препятствие, например достаточной прочности стенка, то шар, ударившись об эту стенку, покатится в обратную сторону. Если предположить, что трение отсутствует, а удар является абсолютно упругим (т. е. ни шар, ни стенка не изменяют своей формы: не получают вмятин, стенка не прогибается и т. п.), то скорость шара после удара по своей величине будет равна скорости шара до удара; по направлению же эти две скорости будут противоположны. Усилие, необходимое для изменения направления скорости шара, выразилось в данном случае в том, что стенка, обладая достаточной прочностью, восприняла силу удара.

Для того чтобы изменить направление скорости потока пара, тоже требуется приложить усилие. Так же как и в случае с шаром, это усилие обусловливается прочностью рабочей лопатки. Отличие же заключается в том, что лопатка закреплена на подвижном диске, который может вращаться вместе с валом. Поэтому сила давления струи на рабочие лопатки, возникающая при изменении направления скорости потока, вызывает вращение турбинного диска.

Не следует думать, что диск турбины приводится во вращение вследствие удара струи газа или пара о рабочие лопатки. В этом смысле между примером с шаром и движением потока в турбине существует различие. Более того, конструируя проточную часть турбины (сопла, рабочие лопатки) всегда стремятся к тому, чтобы по возможности совсем избежать удара, так как следствием его практически всегда является потеря скорости в результате завихривания потока и трения. Вращение вала турбины с жестко насаженным на нем диском достигается благодаря давлению

струи пара на вогнутую поверхность лопаток, возникающему вследствие изменения направления скорости потока.

У читателя может возникнуть справедливый вопрос: за счет чего же происходит вращение диска? Если величина скорости пара (при отсутствии трения) на входе в канал между рабочими лопатками и на выходе из него остается



Фиг. 14. Сложное движение.

неизменной (меняется только направление скорости), то и скоростная энергия потока тоже должна остаться неизменной.

Для того чтобы ответить на этот вопрос, необходимо прежде всего дать определение абсолютной и относительной скоростям, указать на различие между ними.

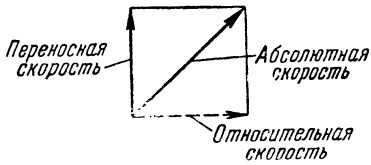
С этой целью разберем следующий пример. Допустим, что от одного берега реки к другому движется паром (см. фиг. 14). Скорость движения парома на фиг. 14 представлена стрелкой, длина которой соответствует численному значению скорости, взятому в определенном масштабе, а направление стрелки совпадает с направлением движения парома [1]. Представим себе, кроме того, что по движущемуся парому идет человек, скорость передвижения которого на фиг. 14 представлена пунктирным отрезком; направление этого отрезка, так же как и в предыдущем случае, совпадает с направлением передвижения человека по парому, а длина отрезка соответствует величине скорости, взятой

[1] Скоростью течения воды в реке пренебрегаем вследствие ее малой величины.

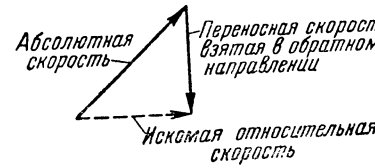
в том же масштабе, что и скорость парома. Из фиг. 14 видно, что направления и величины скорости передвижения парома и скорости передвижения человека по парому различны.

Как определить в этом и подобных ему случаях скорость перемещения человека по отношению к неподвижным предметам, например по отношению к дому, стоящему на берегу реки? [1].

Скорость передвижения человека по отношению к предметам, рассматриваемым нами как неподвижные, например по отношению к стоящему на берегу реки дому, называется абсолютной скоростью. Величина и направление абсо-



Фиг. 15. Сложение скоростей.



Фиг. 16. Определение относительной скорости (вычитание скоростей).

лютной скорости человека будут зависеть, во-первых, от величины и направления скорости парома и, во-вторых, от величины и направления скорости передвижения человека по отношению к парому. Первую из этих скоростей называют переносной скоростью, а вторую относительной.

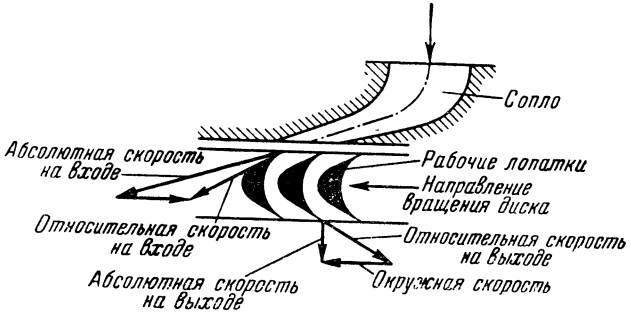
Если переносная и относительная скорости известны, то определить абсолютную скорость оказывается совсем нетрудно. Для этого нужно только (фиг. 15) отрезки, изображающие переносную и относительную скорости, приложить к телу, абсолютную скорость перемещения которого требуется определить, и совершить построение, подобное представленному на фиг. 15. Из фиг. 15 можно установить направление и величину абсолютной скорости перемещения человека, идущего по движущемуся парому. Очевидно, что, зная направление и величины абсолютной скорости и, например, переносной, можно определить направление и величину относительной скорости согласно построению фиг. 16.

Все сказанное имеет прямое отношение к случаю протекания струи пара по каналу, образуемому рабочими лопат-

---

1 Так называемые неподвижные предметы на самом деле неподвижны условно. Дом, стоящий на берегу реки, совершает определенное перемещение вместе со всем земным шаром: движение по эллипсису вокруг Солнца и вращательное движение вокруг оси Земли.

ками вращающегося турбинного диска. Струя пара, протекающая по каналу между рабочими лопатками, очевидно, перемещается вместе с рабочими лопатками вследствие вращения диска турбины. Таким образом, окружная скорость рабочих лопаток будет являться переносной скоростью для потока пара аналогично скорости перемещения парома в рассмотренном ранее примере. Скорость потока по отношению к рабочим лопаткам явится относительной скоростью подобно скорости передвижения человека по отношению к движущемуся парому. Наконец, абсолютная скорость по-



Фиг. 17. Движение пара через сопла и рабочие лопатки турбины.

тока пара, т. е. скорость по отношению к предмету, принятому за неподвижный (в данном случае, например, по отношению к соплу турбины), может быть определена путем геометрического построения (так называемого правила параллелограмма) по известным величинам и направлениям переносной и относительной скоростей, подобно тому как это было показано раньше.

На фиг. 17 схематически представлены сопло и рабочие лопатки, а также показаны абсолютные и относительные скорости потока и окружная (переносная) скорость турбинного диска. На выходе из сопла струя пара обладает определенной абсолютной скоростью. Зная, кроме того, окружную скорость диска, с помощью известного уже построения (фиг. 17) легко определить относительную скорость потока при входе в канал между рабочими лопатками. Если удар струи о рабочие лопатки и трение отсутствуют, то численные значения относительных скоростей потока на входе в канал между рабочими лопатками и на выходе из него должны быть равны. Относительная скорость струи при выходе из канала, образованного рабочими лопатками,

представлена также на фиг. 17. Зная величину этой скорости, а также окружную скорость, легко определить абсолютную скорость потока при выходе из рабочих лопаток. Из фиг. 17 ясно видно, что величина абсолютной скорости на входе в канал между рабочими лопатками больше величины абсолютной скорости на выходе из этого канала.

Теперь мы можем дать исчерпывающий ответ на вопрос, поставленный читателем. Скоростная энергия потока (кинетическая энергия) за рабочими лопатками меньше кинетической энергии потока перед рабочими лопатками, так как по своему численному значению равны только лишь относительные скорости, но не равны (а это главное) абсолютные скорости. Следовательно, вращение турбинного диска происходит не «бесплатно», а за счет уменьшения кинетической энергии потока.

Как показывает опыт, абсолютную скорость на выходе не удается использовать полностью. Поэтому турбина будет работать тем более экономично, чем меньше будет, при прочих равных условиях, численное значение абсолютной выходной скорости. Из фиг. 17 видно, что для этого необходимо так выбрать направления всех других скоростей, чтобы отрезок, представляющий абсолютную выходную скорость, оказался бы расположенным вертикально (перпендикулярно к направлению окружной скорости). Оказывается, что это условие будет выполнено в том случае, когда абсолютная скорость потока на выходе из сопла будет примерно в два раза превышать окружную скорость [1].

Для того чтобы при протекании 1 килограмма пара через сопла и рабочие лопатки турбины превратить большее количество тепловой энергии в энергию механическую и далее в энергию электрическую, необходимо повышать температуру и давление пара при входе в турбину и понижать на выходе из турбины [2].

Чем же устанавливается предел повышения давления и температуры пара перед турбиной (так называемых начальных параметров пара) и понижения давления и температуры пара за турбиной (так называемых конечных параметров пара)?

Чем выше начальные параметры пара, тем в более тяжелых условиях приходится работать металлу, из которого выполнены детали котла и турбины и в первую очередь

---

[1] Строго говоря, сказанное справедливо не для всех паровых турбин, а для так называемых активных турбин.

[2] Подробнее об этом сказано в следующей главе.

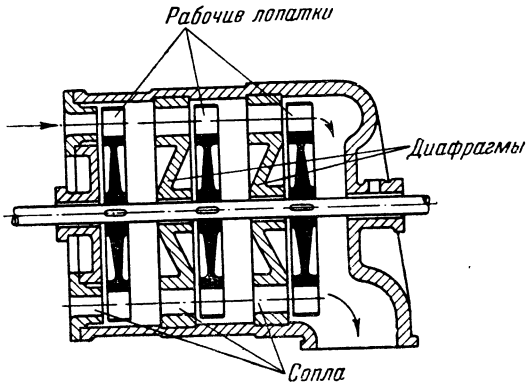
трубы пароперегревателя котла и рабочие лопатки турбины. Качество металла — вот что определяет наибольшие значения начальных параметров пара. В настоящее время в Советском Союзе полностью освоены установки, работающие на водяном паре с давлением 90—140 атмосфер, с температурой около 500° С. В ближайшее время начнется широкое внедрение установок, работающих на водяном паре с начальным давлением около 175 атмосфер и с температурой 550° С. Имеются уже экспериментальные установки, использующие водяной пар при давлении 300 атмосфер, с температурой 600° С. В результате работы наших металлургов качество металла непрерывно повышается. Вместе с улучшением качества металла растут и начальные параметры пара.

Из турбины пар поступает в конденсатор, предназначенный для превращения пара в воду. Для того чтобы сконденсировать пар в воду, необходимо непрерывно охлаждать конденсатор. Для этой цели служит охлаждающая вода, забираемая обычно из естественных водоемов. Температура конденсирующегося пара не может быть ниже температуры охлаждающей воды. Таким образом, температура пара на выходе из турбины, а вместе с тем и давление пара определяются температурой охлаждающей воды. Опыт показывает, что конечная температура пара при охлаждении конденсатора водой естественных источников может поддерживаться около 30° С, а конечное давление около 0,04 атмосферы. Следовательно, в конденсаторе паровой турбины давление во много раз меньше атмосферного.

Если бы в соплах турбины пар расширялся от начального давления 100 атмосфер и температуры 600° С до конечного давления 0,04 атмосферы, то абсолютная скорость пара на выходе из сопла составила бы около 1 750 метров в секунду. Согласно сказанному выше для экономичной работы турбины необходимо было бы иметь окружную скорость свыше 800 метров в секунду. Но центробежные силы, являющиеся следствием таких колоссальных окружных скоростей, были бы настолько велики, что напряжения в диске турбины и особенно рабочих лопатках намного превысили бы допустимые и они разрушались бы.

Таким образом, мы пришли к противоречию, которое на первый взгляд кажется трудно разрешимым: для наиболее экономичной работы турбины требуется реализовать такие высокие окружные скорости, которые являются явно недопустимыми с точки зрения прочности.

Однако, решение вопроса оказывается неожиданно простым. Окружная скорость может быть в несколько раз снижена, а экономичность работы нисколько не уменьшится, если турбину выполнить многоступенчатой, т. е. пропускать пар последовательно через несколько рядов сопел и рабочих лопаток. Схематическое изображение многоступенчатой турбины представлено на фиг. 18. Каждая ступень такой турбины представляет собой как бы простейшую турбину, подобную изображенной на фиг. 12. Представленная на фиг. 18 турбина состоит из трех ступеней, т. е. имеет три ряда последовательно расположенных сопел и рабочих



Фиг. 18. Схема многоступенчатой турбины.

лопаток. На валу турбины закреплены три вращающихся вместе с ним диска, снабженных рабочими лопатками. В промежутке между вращающимися вместе с валом дисками установлены неподвижные, скрепленные с корпусом турбины, перегородки (диафрагмы), назначением которых является сохранение разности давлений между соседними ступенями турбины. В каждой из диафрагм укреплены сопла. Первый ряд сопел, обычно располагающийся только лишь на части окружности, укреплен непосредственно в корпусе турбины.

Количество тепловой энергии, превращающееся в механическую в каждой ступени многоступенчатой турбины, отнесенное к 1 килограмму пара, примерно во столько раз меньше по сравнению с одноступенчатой турбиной, сколько ступеней имеет турбина. Следовательно, в многоступенчатой турбине меньше будет и абсолютная скорость пара на

выходе из сопел, а вместе с тем и окружная скорость рабочих лопаток.

В настоящее время все мощные, обладающие высоким к. п. д. турбины, являются многоступенчатыми. Такие машины являются весьма сложными, имеют много различных вспомогательных устройств и механизмов, а заводы, изготовляющие их, оборудованы по последнему слову техники. Выпускаемые Ленинградским металлическим заводом имени И. В. Сталина паровые турбины высокого давления, мощностью в 100 000 и в 150 000 киловатт, являются замечательным достижением советского энергомашиностроения.

8. В чем заключается преимущество применения водяного пара на тепловых электрических станциях

В предыдущих разделах было показано, что тепловые электрические станции, работающие на водяном паре, являются в настоящее время наиболее распространенными. Было показано также, что и в дальнейшем наряду со строительством гидростанций будут создаваться новые, мощные теплоэлектростанции, оборудованные новейшими паровыми котлами и турбинами. Было дано описание схемы паросиловой установки и объяснение принципа ее работы, а также рассмотрено устройство основного оборудования тепловой электрической станции: парового котла и паровой турбины.

Итак на тепловой электростанции происходят следующие превращения энергии. Прежде всего химическая энергия топлива превращается в тепловую энергию. Это превращение происходит в паровом котле. Сначала теплота, образовавшаяся в результате сжигания топлива, воспринимается газами, образующимися при горении, а затем она передается воде и далее водяному пару.

Второе превращение энергии происходит в тепловом двигателе. Здесь тепловая энергия, которой обладает водяной пар, превращается в механическую энергию, в работу. Работа совершается водяным паром, приводящим во вращение диски и вал турбины. По этой причине вещество, поступающее в тепловой двигатель и обладающее значительным запасом тепловой энергии, а затем производящее работу, в нашем случае водяной пар, именуется р а б о ч и м в е щ е с т в о м или р а б о ч и м т е л о м теплового двигателя.

Третье превращение энергии происходит в электрическом генераторе — машине, приводимой в действие тепловым двигателем и предназначенной для превращения механической энергии, работы, в электрическую энергию.

Теперь мы можем перейти к обсуждению следующего вопроса: почему именно водяной пар, а не какой-либо иной пар или газ нашел такое широкое применение в паросиловых установках?

В принципе в паросиловой установке может быть использован любой пар или газ. Однако оказывается, что далеко не безразлично, какой именно пар или газ будет избран для этой цели. Теория и опыт показывают, что водяной пар обладает рядом преимуществ по сравнению с другими парами и газами. Прежде чем назвать эти преимущества водяного пара, необходимо остановиться на вопросе о том, какими же свойствами должно обладать вещество, избранное в качестве рабочего тела, чтобы обеспечить наиболее экономичную работу тепловой электростанции.

Для того чтобы ответить на этот вопрос, следует сказать несколько слов относительно особых свойств тепловой энергии. Допустим, что в нашем распоряжении имеются две группы тел. Первая группа тел имеет одинаковую сравнительно низкую температуру, а вторая — также одинаковую, но отличную от первой и более высокую температуру. Допустим также, что все тела, имеющиеся в нашем распоряжении, изолированы от окружающей среды. Это значит, в частности, что тепло от этих тел не может быть передано окружающей среде, равно как и окружающая среда не может передать тепла этим телам. В теплотехнике (точнее сказать, в термодинамике — науке, изучающей процессы превращения тепла в работу) такие полностью изолированные от окружающей среды тела называются изолированной системой.

Если тела, составляющие изолированную систему, как мы и предполагали, имеют различную температуру, то, как показывает опыт, такая система способна произвести работу. По мере того как производится работа, разность температур между различными телами системы будет уменьшаться, а когда температура всех тел станет одинаковой, дальнейшее производство работы системой будет невозможным. Такую систему, все тела которой обладают одной и той же температурой, именуют системой, находящейся в тепловом равновесии.

Всякое выравнивание температур в изолированной си-

стеме является, конечно, результатом перехода тепла от тела, более нагретого, к телу, менее нагретому. Переход тепла от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой может сопровождаться производством работы. Если количество тепла, перешедшее от одного тела к другому — известно (допустим, что это количество тепла равно одной калории), то о величине работы, которая могла бы быть произведена при наиболее благоприятном проведении процесса, нельзя еще сказать ничего определенного. Для того чтобы можно было судить о том, какая работа может быть произведена системой, кроме количества тепла, перешедшего от одного тела к другому, необходимо знать еще температуры обоих тел. Опыт показывает, что работа, которую может произвести система, тем больше, чем больше тепла переходит от одних тел к другим и чем больше разность температур между этими телами.

С точки зрения производства работы переход тепла от одного тела (более нагретого) к другому телу (менее нагретому) можно уподобить падению воды с более высокого уровня на более низкий уровень. Известно, что падение воды с одного уровня на другой может быть использовано для получения работы. Собственно говоря, работа всех гидростанций основана именно на этом принципе. Известно также, что работа, которая может быть получена в результате падения воды, будет тем больше, чем больше количество падающей воды и чем больше разность уровней падения. Более того, величина наибольшей работы, которая может быть получена, равна произведению веса падающей воды на разность уровней. Также и при переходе тепла: возможная работа тем больше, чем больше количество тепла (в предыдущем случае—количество воды) и разность температур (разность уровней падения). Правда, величина наибольшей, возможной работы, которая может быть получена в результате перехода тепла, не равна произведению количества тепла на разность температур. Вообще приведенное сравнение является не более как иллюстрацией, позволяющей на первых порах лучше представить явление перехода тепла и производства работы.

Таким образом, чтобы судить о том, какое количество работы может произвести рассматриваемая изолированная система, необходимо знать, какое количество тепла должно перейти от тел, более нагретых, к телам, более холодным, прежде чем температуры этих тел сделаются одинаковыми, и каковы температуры тел в начале.

Особенно важно отметить следующее обстоятельство: так же как перетекание воды с более высокого уровня на более низкий без совершения работы представляет собой потерю возможной работы, так и всякий переход тепла от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой без производства работы, также представляет собой потерю возможной работы.

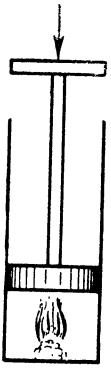
Рабочее тело теплового двигателя, например, водяной пар, приводящий в движение турбинное колесо, получает тепло из внешнего источника. В паросиловой установке таким источником тепла являются газы, образующиеся в результате горения топлива. Так как сжигание топлива в топке парового котла производится непрерывно, то и рабочее тело может непрерывно получать тепло от этого горячего источника. Собственно для этой цели и предназначен паровой котел. Каждый килограмм водяного пара при прочих равных условиях может совершить в тепловом двигателе тем бо́льшую работу, чем выше его температура при входе в двигатель, аналогично тому, как каждый килограмм воды, падая, может совершать тем бо́льшую работу, чем выше верхний уровень падающей воды. При этом важно отметить, что большое значение имеет не только температура рабочего тела на входе в двигатель, но и характер процесса подвода тепла от источника тепла к рабочему телу. Для того чтобы уменьшить потери возможной работы, необходимо уменьшать разность температур между источником тепла и рабочим телом, или, иначе говоря, стараться подводить тепло к рабочему телу при наивысшей температуре последнего.

Такого же рода соображения справедливы и в случае отвода тепла от рабочего тела. Рабочее тело по выходе из теплового двигателя отдает известное количество тепла среде, имеющей практически неизменную температуру. Так, например, водяной пар из паровой турбины поступает в конденсатор, в котором отдает тепло охлаждающей воде, а сам превращается в воду. Очевидно, что для того чтобы произвести возможно больше работы, рабочее тело должно охлаждаться в двигателе до температуры среды, а затем передавать тепло среде, находясь при наинизшей температуре, равной температуре среды.

Таким образом, мы пришли к следующему, весьма важному выводу: для того чтобы получить возможно больше работы, а это значит заставить двигатель работать с наибольшей экономичностью, необходимо, чтобы рабочее тело

на входе в двигатель имело возможно бо́льшую температуру, а на выходе из двигателя — возможно меньшую; кроме того, необходимо, чтобы тепло сообщалось рабочему телу при возможно большей его температуре, а отводилось — при возможно меньшей. В этом смысле лучше всего было бы, чтобы тепло подводилось к рабочему телу т о л ь к о при наивысшей его температуре, а отводилось от рабочего тела т о л ь к о при наиболее низкой его температуре.

Понижение температуры рабочего тела от наиболее высокой до низкой происходит, как уже сказано выше, в тепловом двигателе в процессе производства работы. Но как можно поднять температуру рабочего тела от низкой до высокой, не подводя к нему тепла?



Фиг. 19. Пневматическое огниво.

Оказывается в принципе такой процесс осуществить весьма просто. Нечто подобное можно наблюдать в так называемом пневматическом огниве, представленном на фиг. 19. Как видно из рисунка, пневматическое огниво представляет собой закрытый цилиндр с подвижным поршнем. Внутрь цилиндра кладется кусок ваты, пропитанной легковоспламеняющейся жидкостью, например, бензином. Затем поршень быстро вдвигается в цилиндр. Воздух, находящийся в цилиндре, быстро, т. е. практически без теплообмена с окружающей средой, сжимается. Одновременно с ростом давления воздуха растет и его температура, вследствие чего вата воспламеняется. Такие быстро протекающие процессы расширения или сжатия газа, во время которых теплообмен практически произойти не успевает, называются в технике адиабатическими.

Следовательно, для того чтобы увеличить температуру рабочего тела от температуры среды до наивысшей, нужной температуры, не подводя при этом тепла от внешнего источника, необходимо произвести адиабатическое сжатие рабочего тела. При этом, конечно, необходимо затратить определенную работу.

Таким образом, на основе проведенных рассуждений мы приходим к очень интересному выводу: для того чтобы двигатель работал экономично, рабочее тело должно последовательно совершить ряд вполне определенных процессов. Сначала рабочее тело должно быть адиабатически сжато от начальной температуры, равной температуре окружающей среды, до наивысшей температуры. Затем к рабочему

телу должно быть подведено тепло от внешнего источника (например, от горячих газов), а температура рабочего тела в процессе подвода тепла должна остаться неизменной; такое нагревание (или охлаждение) именуется в технике изотермическим. Вслед за этим рабочее тело адиабатически расширяется, производя работу; температура рабочего тела в конце расширения снова должна стать равной температуре окружающей среды[1]. Последним процессом, в результате которого рабочее тело возвращается в исходное состояние, должен быть изотермический отвод тепла от рабочего тела и передача этого тепла окружающей среде.

В науке, именуемой термодинамикой и занимающейся, как мы уже сказали, исследованием процессов превращения тепла в работу, строго доказывается, что двигатель будет работать наиболее экономично в том случае, когда рабочее тело будет последовательно совершать следующие процессы: адиабатическое сжатие, изотермический подвод тепла (изотермическое расширение), адиабатическое расширение, изотермический отвод тепла (изотермическое сжатие). Сочетание этих четырех процессов именуется циклом Карно[2]. Большое теоретическое и практическое значение цикла Карно заключается в том, что он является наиболее выгодным из всех возможных циклов эталоном, по которому можно проверять степень совершенства любого теплового двигателя.

Как видим, мы пришли к такому же выводу с помощью сравнительно простых рассуждений о свойствах теплоты.

Итак, какие же требования предъявляются к рабочему телу? Какими свойствами должно обладать рабочее тело для того, чтобы двигатель работал наиболее экономично?

Из сказанного следует, что для наиболее экономичной работы установки необходимо подводить тепло к рабочему телу изотермически, при наивысшей его температуре, и отводить тепло также изотермически, но при наинизшей температуре рабочего тела. Оказывается, что это важное условие экономичной работы двигателя далеко не всегда удается выполнить.

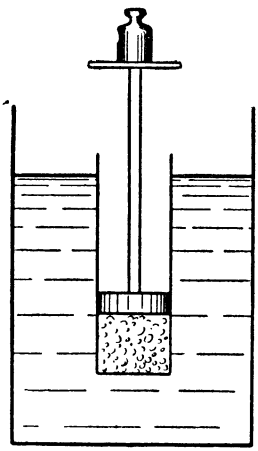
Как можно представить себе изотермический подвод тепла? Разберем для этой цели конкретный случай. Допустим,

---

[1] Работа, произведенная в процессе адиабатического расширения в случаях, аналогичных описываемому, всегда будет больше работы, затрачиваемой на адиабатическое сжатие. В противном случае вся рассматриваемая комбинация процессов не имела бы смысла.

[2] По имени французского ученого С. Карно.

что в цилиндре с подвижным поршнем (фиг. 20) находится воздух. Для того чтобы подвести тепло к воздуху, необходимо привести в соприкосновение цилиндр с каким-либо телом, имеющим более высокую температуру, например погрузить цилиндр в сосуд с нагретой жидкостью. Только в этом случае вообще возможен переход тепла от греющего тела к воздуху, заключенному в цилиндре. Чем больше будет разность температур между греющим телом и воздухом, тем быстрее будет происходить переход тепла. Но если переход тепла осуществляется сравнительно быстро, то температура воздуха, конечно, не будет оставаться неизменной — она, по всей вероятности, будет повышаться. Мы говорим «по всей вероятности» потому, что изменение температуры воздуха будет определяться двумя обстоятельствами. В результате подвода тепла температура воздуха будет стремиться к увеличению. Но в процессе подвода тепла поршень не будет оставаться неподвижным — он будет перемещаться (на фиг. 20 снизу вверх). Перемещение поршня и преодоление им сопротивления внешних сил, в частности, давления окружающей среды, обусловливается расширением воздуха, увеличением его объема или работой расширения, производимой воздухом. На изменение температуры воздуха будут одновременно влиять два обстоятельства. Первое — это подвод тепла, он будет вызывать повышение температуры воздуха. Второе — это расширение воздуха, совершение им работы; последнее будет вызывать понижение температуры воздуха. В результате изменение температуры воздуха будет определяться соотношением подведенного к воздуху тепла и произведенной за то же время работы. Если количество подведенного в единицу времени тепла будет превышать произведенную за то же время работу [1], то температура воздуха будет увеличиваться. Наоборот, если произведенная работа будет больше подведенного тепла, то воздух будет охлаждаться. Температура воздуха



Фиг. 20. Изотермический подвод тепла.

[1] Сравниваемые величины тепла и работы должны быть выражены, конечно, в одних и тех же единицах, например, в калориях или килограммометрах.

должна оставаться неизменной только в одном случае, когда количество подведенного тепла равно совершаемой за то же время работе [1].

Но как же осуществить это последнее требование? Как добиться того, чтобы произведенная за определенное время работа была равна подведенному за то же время теплу?

Представить себе это можно таким образом. Допустим, что разность температур между греющим телом (источником тепла) и заключенном в цилиндре воздухом очень мала. Очевидно, что в этом случае и переход тепла будет происходить чрезвычайно медленно. Столь же медленно должно происходить и расширение воздуха, а значит и перемещение поршня. При этих условиях можно представить себе, что все подведенное тепло успевает превратиться в работу, а температура воздуха не изменяется, т. е. процесс расширения воздуха и подвода к нему тепла является изотермическим.

Но одно дело представить себе мысленно какой-либо процесс, а другое дело осуществить его на практике. Процессы в двигателях протекают в действительности очень быстро и ясно, потому что попытка осуществить изотермический процесс описанным способом заранее обречена на неудачу.

Таким образом, мы снова (в который уже раз!) оказались как будто бы в очень трудном положении: с одной стороны, для экономичной работы паросиловой установки требуется осуществить изотермический процесс, а с другой стороны, предлагаемый способ его проведения оказывается практически неосуществимым.

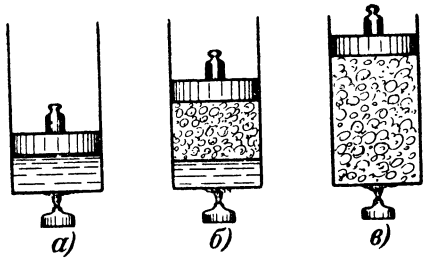
Но как уже мог наблюдать читатель на примерах, приведенных в настоящей книжке, наука не знает неразрешимых проблем. В результате длительного и упорного труда всегда удается найти правильное решение любой, казалось бы, неразрешимой задачи. Так было и в данном случае. Если изотермический процесс оказывается крайне трудно осуществить для воздуха или какого-либо другого газа, то осуществление его для испаряющейся при неизменном давлении жидкости или конденсирующегося, также при неизменном давлении, пара, наоборот, провести весьма просто.

Из опыта известно, что если производить испарение жидкости при неизменном давлении, то за время парообра-

---

[1] Строго говоря, все сказанное справедливо по отношению к газам.

зования температура жидкости и образующегося пара остаётся постоянной. С такими примерами приходится сталкиваться на каждом шагу. Если нагревать воду, налитую, скажем, в чайник, на пламени газовой горелки, то через некоторое время будет достигнута температура кипения, равная примерно 100° С. Если крышка чайника открыта, то давление на поверхности воды постоянно и, очевидно, равно атмосферному давлению. Если оставить чайник на пламени горелки и далее, то, несмотря на продолжающийся подвод тепла к воде, температура ее больше повышаться не будет, в чем легко убедиться, опустив в воду термометр. Так будет продолжаться до тех пор, пока не испарится вся вода, находящаяся в чайнике. Известно, что температура кипения для данной жидкости зависит от давления, при котором происходит парообразование. Представим себе, что вода налита не в чайник, а в цилиндр с подвижным поршнем (фиг. 21,*а*). Давление, под которым будет находиться вода, зависит исключительно от веса гири, положенной на подвижный поршень; чем больше вес гири, тем больше и давление воды. Если подводить тепло к воде, заключенной в цилиндре, то через определенное время начнется процесс парообразования (фиг. 21,*б*). В процессе парообразования температура будет оставаться неизменной, а величина ее будет определяться только лишь давлением, при котором происходит испарение. После того как превратится в пар последняя капля воды, начнется перегрев пара: при дальнейшем подводе тепла температура пара снова будет возрастать (фиг. 21,*в*). Аналогичным образом при отводе тепла от пара и при неизменной его температуре происходит процесс конденсации.



Фиг. 21. Парообразование при постоянном давлении.

Таким образом, каждому значению давления соответствует для данного вещества определенная температура кипения. В результате тщательных измерений установлена зависимость температуры кипения от давления для многих веществ, в том числе и для воды. Так, например, зависи-

мость температуры кипения от давления для воды можно проиллюстрировать следующей табличкой.

Давление и температура кипения для воды

Давление, атмосферы	Соответствующая ему температура кипения, °С	Давление, атмосферы	Соответствующая ему температура кипения, °С
0,01	6,7	30,0	232,8
0,04	28,6	100,0	300,5
1,0	99,1	170,0	350,7
1,033	100,0	200,0	364,1
5,0	151,1	220,0	372,1

Следует иметь в виду, что каждое вещество имеет свою так называемую критическую температуру. Критическая температура замечательна тем, что любой газ (пар) может быть превращен в жидкость только в случае, если он будет охлажден до более низкой температуры, чем критическая. Для воды критическая температура равна 374,15° С.

Из всего сказанного ясно, что в качестве рабочих тел мощных тепловых энергетических установок выгоднее использовать легко превращаемые в жидкости пары.

Почему же из большого числа самых различных паров именно водяной пар заслуживает особого предпочтения? Ответить на этот вопрос нетрудно. Очевидно, что в качестве рабочего тела нужно избрать такое вещество, критическая температура которого является достаточно высокой. В противном случае не удастся осуществить изотермический подвод тепла при высокой температуре. Кроме того, желательно, чтобы давление парообразования, соответствующее температуре изотермического подвода тепла, было бы не слишком высоким, а давление конденсации при изотермическом отводе тепла было бы не слишком низким. Последнее требование основывается на том, что с технико-экономической точки зрения в паросиловой установке желательно избежать как весьма высоких давлений так и глубокого разрежения (вакуума). Водяной пар лучше, чем любое другое вещество, отвечает этим требованиям. Правда, было бы еще лучше, если бы критическая температура водяного пара была бы не 374° С, а, например, 800° С. В этом случае удалось бы осуществить изотермический подвод тепла при более высокой температуре, например при 500—

550° С. Также было бы лучше, если бы давление парообразования при высоких температурах было бы ниже, а при низких температурах — несколько выше. Тогда не было бы необходимости итти на весьма высокие давления пара перед турбинной, а также не было бы необходимости создавать в конденсаторе глубокий вакуум. Но с этими недостатками водяного пара как рабочего вещества приходится мириться, так как другое, более подходящее вещество нам неизвестно.

Водяной пар обладает, кроме перечисленных, рядом других физических свойств, подтверждающих целесообразность использования его в качестве рабочего вещества.

Одновременно следует отметить, что, кроме нужных физических свойств, рабочее тело должно обладать и рядом других необходимых качеств. В частности, рабочее тело должно быть невзрывоопасно и неядовито, не должно разлагаться при используемых в установке температурах и вредно действовать на металл. Кроме того, вещество, используемое в качестве рабочего тела, должно быть широко распространено в природе, т. е. недорого. Перечисленным требованиям водяной пар также отвечает лучше других веществ.

Теперь читатель может судить о том, что современные мощные энергетические тепловые двигатели — паровые турбины — не случайно работают на водяном паре. Использование водяного пара в качестве рабочего тела является наиболее целесообразным.

9. Почему выгодно повышать начальное давление и температуру пара

Собственно говоря, на этот вопрос уже дан ответ в предыдущем разделе. Действительно, подобно тому как каждый килограмм воды при падении может произвести тем бо́льшую работу, чем больше разность уровней падения, так и каждый килограмм пара может произвести тем бо́льшую работу, чем больше его температура на входе в двигатель и чем меньше его температура на выходе из двигателя.

Что касается температуры пара на выходе из двигателя, или, иначе говоря, той самой температуры, при которой должно быть отнято от пара тепло, то она в лучшем случае может быть снижена до температуры окружающей среды (воды, охлаждающей трубки конденсатора). Как видно из

приведенной выше таблицы (см. стр. 69), температуре 28,6° С соответствует давление конденсации, равное 0,04 атмосферы. Производить конденсацию пара при более низкой температуре было бы практически затруднительно. Таким образом, температура пара на выходе из двигателя имеет вполне определенный предел, устанавливаемый температурой окружающей среды и обычно близка к 30° С. Вместе с тем определено и давление в конденсаторе.

Иное дело температура пара на входе в двигатель. Теоретически она могла бы быть поднята до температуры продуктов сгорания в топке котла, т. е. более чем до 1 000° С. С точки зрения экономичности процесса превращения тепла в работу именно это и следовало бы сделать. К сожалению, нас ждет здесь еще одно огорчение.

Металл, из которого выполнены рабочие лопатки паровой турбины (обычно это высококачественная сталь) работает в очень трудных условиях. Напряжения, которые приходится выдерживать рабочим лопаткам, очень велики, что обусловливается большим числом оборотов, с которым работает турбина (обычно 3 000 оборотов в минуту). Известно, что допустимая нагрузка на любое металлическое изделие уменьшается при высоких температурах. Другими словами, механические качества металла снижаются с ростом его температуры.

В результате большой работы, проводимой металлургами, качество металла, применяемого в энергомашиностроении, неуклонно повышается. Одновременно повышается и допустимая температура пара на входе в турбину. Совсем недавно такой максимальной температурой считалась температура 420—450° С. В годы перед второй мировой войной удалось повысить ее до 500° С. В настоящее время в Советском Союзе имеются установки, работающие с начальной температурой до 600° С.

Остается еще выяснить: какое начальное давление водяного пара целесообразно поддерживать в паросиловой установке. Как мы уже установили выше, подвод тепла к рабочему телу выгоднее всего производить изотермически, при максимальной температуре рабочего тела. Кроме того, установлено, что изотермический подвод тепла практически удается осуществить в процессе парообразования. Тут мы опять встречаемся с новой трудностью. Критическая температура для водяного пара равна примерно 374° С. Следовательно, процесс испарения можно осуществить только при

более низкой температуре, так как жидкость вообще не может существовать при температуре выше критической. Остается, очевидно, примириться с этим положением и постараться, хотя бы частично осуществить изотермический подвод тепла при возможно более высокой температуре. Из таблицы, приведенной на стр. 69, видно, что чем выше температура, при которой производится испарение воды (изотермический подвод тепла), тем выше должно быть и давление. Если процесс парообразования происходит при 100° С, то давление должно быть около 1 атмосферы. Если поднять давление до 30 атмосфер, то парообразование будет происходить уже при 232,8° С, если поднять давление до 100 атмосфер — при 309,5° С; если поднять давление до 170 атмосфер — при 350,7° С и т. д. Таким образом, чем выше мы изберем начальное давление, тем при более высокой температуре можно осуществить подвод тепла.

Теоретически всегда выгодно повышать начальное давление. Практически же это не всегда так. Дело в том, что с ростом давления в установке растет и стоимость установки. Поэтому окончательное решение о выборе начального давления приходится принимать на основе технико-экономического расчета. Так как стоимость высококачественных сталей из года в год снижается, то и с этой точки зрения применение высокого давления становится все более целесообразным.

История развития паросиловых установок есть в то же время история внедрения в энергетику пара все более высоких начальных параметров. Особенно наглядно это можно проследить на развитии энергетики Советского Союза.

В конце XIX века давление в паросиловых установках не превышало 10—12 атмосфер, а производительность котельных агрегатов была не больше 15—20 тонн пара в час. К началу первой мировой войны начальные параметры пара несколько повысились, но все еще давление не превышало 16 атмосфер, а температура — 350° С.

После Великой Октябрьской социалистической революции энергетика нашего социалистического государства сразу же получила быстрое развитие. При этом станции строились на все более высокие начальные параметры пара. По Государственному плану электрификации России (план ГОЭЛРО), принятому в 1920 г. VIII съездом Советов по инициативе В. И. Ленина, предполагалось в основном со-

оружать теплоэлектрические станции, работающие на водяном паре с давлением 20 атмосфер и температурой 375° С. Однако план ГОЭЛРО был перевыполнен не только по установленной мощности, но и по уровню техники созданных электростанций.

За годы первой пятилетки тепловые электростанции строились в основном на давление 30—37 атмосфер и температуру 375—450° С. Производительность котельных установок достигла 200 тонн пара в час. В этот же период были сооружены станции высокого давления. В 1930 г. была начата эксплуатация теплоэлектроцентрали (Москва), работающей на паре с давлением 60 атмосфер и температурой 425° С. В 1931 г. была пущена мощная Березниковская теплоэлектроцентраль с давлением пара 60 атмосфер и температурой 450° С. В 1933 г. вошла в эксплуатацию теплоэлектроцентраль, работающая на паре с давлением около 140 атмосфер и температурой 500° С. В дальнейшем за годы перед Великой Отечественной войной осуществлялся массовый переход паросиловых установок на давление 31,5 атмосферы и температура 420° С; кроме того, сооружались новые установки высокого давления.

После победного окончания Великой Отечественной войны началось решительное внедрение паросиловых установок высокого давления, рассчитанных на 100 атмосфер и 500° С. Переход со среднего на высокое давление, или, говоря точнее, от начальных параметров пара 31,5 атмосферы и 420° С к 100 атмосферам и 510° С, дает большую выгоду для народного хозяйства страны, обеспечивая при равной выработке электроэнергии экономию топлива на 12—15%.

В настоящее время научно-исследовательские институты, предприятия энергомашиностроительной промышленности, электрические станции ведут большую работу, имеющую целью переход на еще более высокие начальное давление и температуру. Дальнейшее повышение начальных параметров пара от 100 атмосфер и 500° С до 170—225 атмосфер и 550—600° С (сверхвысокие параметры) может дать новую экономию топлива, превышающую десять процентов при равной выработке электроэнергии.

Нет никакого сомнения в том, что дальнейшее укрепление энергетической базы Советского Союза — ввод новых мощностей — будет сопровождаться все бо́льшим применением водяного пара высоких и сверхвысоких параметров.

10. Найдут ли применение в паросиловых установках другие вещества

Стремление повысить экономичность работы паросиловых установок заставляет инженеров-теплотехников исследовать тепловые свойства самых различных веществ в поисках наиболее совершенного рабочего тела. Вслед за водяным паром, пожалуй, наибольший интерес представляет ртуть. Как известно, ртуть является металлом, имеющим весьма низкую температуру плавления: при атмосферном давлении ртуть затвердевает при — 39° С. Поэтому в обычных условиях ртуть находится в жидком состоянии. При атмосферном давлении температура кипения ртути равна 357° С. Ртуть обладает большим атомным весом (200,6) и большим удельным весом (при нормальных условиях 13,6 грамма на кубический сантиметр).

С точки зрения целесообразности применения того или иного вещества в качестве рабочего тела паросиловой установки особый интерес представляют, как мы уже говорили, следующие свойства: критическая температура, давление парообразования для максимально возможной температуры рабочего тела и давление парообразования для минимальной температуры рабочего тела.

Посмотрим, каковы эти свойства у ртути.

Критическая температура ртути равна примерно 1 450° С, а давление парообразования для температуры 500° С составляет 8,3 атмосферы. Названные тепловые свойства характеризуют ртуть как рабочее тело с самой положительной стороны. Очевидно, что, используя ртуть, можно осуществить изотермический подвод тепла при наивысшей температуре (500—600° С) рабочего тела, чего нельзя сделать применительно к водяному пару. При этом не потребуется даже создавать в установке высокого давления.

К сожалению, дело обстоит значительно хуже в отношении давления, соответствующего минимальной температуре рабочего тела. Давление парообразования ртути для температуры 30° С составляет всего лишь 0,0000035 атмосферы [1]. Конечно, нечего и думать о достижении столь малого давления в громоздком, имеющем большое число уплотнений, конденсаторе турбины. Если же давление в конденсаторе составляло бы 0,04 атмосферы, т. е. было бы равно

[1] Как помнит читатель, давление насыщенного водяного пара для этой температуры (30° С) составляет 0,04 атмосферы, т. е больше примерно в 11 000 раз.

давлению, обычно поддерживаемому в конденсаторах турбин, работающих на водяном паре, то температура конденсации ртутного пара составляла бы примерно 217° С. Паросиловая установка, в которой рабочее тело охлаждается всего лишь до 200° С, а затем бесполезно передает тепло окружающей среде, всегда будет малоэкономичной. Следует напомнить, что при давлении, равном атмосферному, ртуть кипит при температуре около 357° С.

К названному существенному недостатку ртути как рабочего тела нужно еще добавить, что пары ртути весьма ядовиты[1], а стоимость ее сравнительно высока.

Из всего сказанного как будто бы следует, что, несмотря на ряд положительных качеств ртути (высокая критическая температура, относительно низкое давление при температуре испарения 500—600° С), использовать ее в качестве рабочего тела все же не представляется целесообразным. Действительно, создавать паросиловую установку, работающую только лишь на ртутном паре, хотя и возможно, но совершенно невыгодно. Коэффициент полезного действия такой установки был бы гораздо ниже по сравнению с паросиловой установкой, работающей на водяном паре.

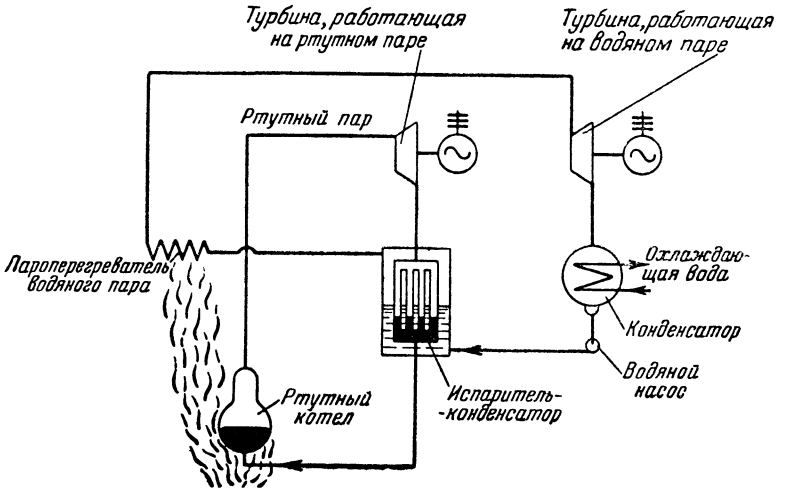
Тем не менее было бы слишком поспешно вообще отказаться от использования ртути в качестве рабочего вещества. Сопоставляя свойства водяного пара и свойства ртутного пара, легко убедиться в одном любопытном обстоятельстве. В области высоких температур, при подводе тепла к рабочему телу, ртутный пар имеет несомненные преимущества перед водяным, а в области низких температур, при отводе тепла от рабочего тела преимущества, безусловно, на стороне водяного пара. Напрашивается вопрос: нельзя ли устроить такую установку, которая при высоких температурах использовала бы ртутный пар, а при низких температурах — водяной?

На первый взгляд такая задача кажется совершенно неразрешимой. Но только на первый взгляд. При более внимательном рассмотрении оказывается, что установку с одновременным использованием ртутного и водяного пара вполне можно создать. Более того, такие установки, именуемые бинарными, уже созданы и находятся в эксплуатации.

На фиг. 22 представлена простейшая схема ртутноводяной бинарной установки. Принцип действия этой установки

[1] Поэтому установки, работающие на ртутном паре, должны быть особенно тщательно уплотнены, а помещение, в котором находятся эти установки, необходимо энергично вентилировать.

заключается в следующем. Испарение жидкой ртути и превращение ее в сухой, насыщенный, ртутный пар происходит в специальном ртутном котле (фиг. 22), за счет тепла, выделяющегося при сжигании топлива. Этот процесс происходит при постоянном давлении и, как всякий изобарический процесс парообразования, протекает при неизменной темпера-



Фиг. 22. Схема бинарной установки.

туре. Если температура образования ртутного пара составляет, например, 500° С, то давление в ртутном котле должно быть всего лишь 8,3 атмосферы. Из котла ртутный пар поступает в специальную ртутную турбину, в которой, как обычно, происходит адиабатическое расширение. Ртутная турбина приводит в действие электрический генератор, а ртутный пар, совершивший определенную работу, поступает далее в испаритель-конденсатор.

В испарителе-конденсаторе ртутный пар конденсируется, и образовавшаяся жидкая ртуть возвращается в ртутный котел. При этом нет необходимости даже в специальном насосе для перекачки ртути: вследствие большого удельного веса жидкой ртути она может перетекать самотеком из испарителя-конденсатора в котел, конечно, при условии, что испаритель-конденсатор расположен на большей геометрической высоте, чем ртутный котел. Конденсируясь в испарителе-конденсаторе, ртутный пар должен отдать тепло какому-то другому телу подобно тому, как водяной пар в кон-

денсаторе обычной паросиловой установки, превращаясь в воду, отдает тепло охлаждающей воде, протекающей по трубкам конденсатора. Ртутный пар в испарителе-конденсаторе также отдает тепло охлаждающей воде. Но различие заключается в том, что вода, получая тепло от конденсирующегося ртутного пара, сама испаряется и в дальнейшем также может быть использована в качестве рабочего тела. Таким образом, в задачу конденсатора-испарителя входит: конденсация ртутного пара и испарение воды за счет тепла, выделившегося при образовании жидкой ртути. Если температура получаемого водяного пара была бы в точности равна температуре конденсирующегося ртутного пара, а конденсатор-испаритель не имел бы никаких потерь (отдачи тепла в окружающую среду), то образование водяного пара за счет конденсации ртутного происходило бы без какого бы то ни было уменьшения возможной работы.

Ртутный пар поступает в испаритель-конденсатор обычно с давлением около 0,12 атмосферы, имея температуру примерно 257° С. Учитывая практически неизбежную разность температур между ртутным и водяным паром, это позволяет получить водяной пар с температурой около 240° С и с давлением порядка 34 атмосфер. Полученный в испарителе-конденсаторе водяной пар поступает сначала в пароперегреватель, а затем в пароводяную турбину, где расширяется до давления около 0,04 атмосферы, и далее поступает в конденсатор. Вода, полученная в конденсаторе, подается с помощью насоса в испаритель-конденсатор.

В ртутно-водяной бинарной установке, использующей и водяной и ртутный пар, удается, следовательно, осуществить изотермический подвод тепла при максимальной температуре рабочего тела и изотермический отвод тепла — при минимальной температуре рабочего тела. Если современные наиболее совершенные тепловые электрические станции, работающие на водяном паре высоких давления и температуры, имеют общестанционный к. п. д. порядка 33—34%, то использование ртутно-водяных бинарных установок обещает повысить этот к. п. д. до 44—45%. Не нужно и говорить о том, что это имело бы весьма большое значение для всего народного хозяйства.

Конечно, в таком новом и ответственном деле, как создание мощных ртутно-водяных теплосиловых установок, имеется много технических трудностей. Но все эти трудности преодолимы. В настоящее время коллектив Центрального

котлотурбинного института (ЦКТИ) имени выдающегося русского теплотехника Ивана Ивановича Ползунова ведет большую работу по использованию ртутного пара в энергетике.

11. О некоторых особенностях свойств воды и водяного пара

Для того чтобы правильно рассчитать, сконструировать и выполнить паросиловую установку, необходимо точно знать свойства рабочего тела при тех давлениях и температурах, которые находят практическое применение. Поскольку из всех рабочих тел водяной пар представляет наибольший интерес, постольку сказанное касается, в первую очередь, воды и водяного пара.

Действительно, для того, например, чтобы выбрать правильные размеры сопла паровой турбины, обеспечив нужные скорости парового потока, необходимо знать удельные объемы пара. Но удельные объемы пара зависят от давления и температуры. Следовательно, для правильного расчета сопел турбины (а также многих других элементов паросиловой установки) необходимо знать зависимость между давлением, температурой и удельным объемом водяного пара. Такая зависимость именуется термическим уравнением состояния.

Можно ли правильно рассчитать все элементы паросиловой установки, если известны удельные объемы для всех температур и давлений, которые принимают вода или водяной пар?

Легко убедиться в том, что знания одних лишь удельных объемов недостаточно. Допустим, что требуется определить количество топлива, необходимое для превращения 1 тонны воды при температуре 20 °С в перегретый пар при температуре 600° С. Такая задача, несомненно, представляет большой практический интерес. Для того чтобы решить ее, необходимо знать теплоемкость воды [1] при нагревании ее при постоянном давлении от 20° С до температуры кипения, скрытую теплоту парообразования, т. е. количество тепла, необходимое для испарения 1 килограмма воды, теплоемкость пара при изобарическом нагревании его от температуры кипения до 600° С. Мы говорим о теплоемкости воды или пара при постоянном давлении, потому, что ве-

[1] Напомним, что теплоемкостью называется количество тепла, необходимое для нагревания определенного количества вещества (например, 1 килограмма) на 1 градус.

личина теплоемкости зависит от характера процесса, в котором к телу подводится тепло, а изобарический процесс представляет наибольший практический интерес.

Но величина теплоемкости, например, при постоянном давлении зависит также от давления и температуры. Так, например, для изобарического нагревания 1 килограмма водяного пара от 400 до 401° С при 250 атмосферах требуется примерно в 5 раз больше тепла, чем для изобарического нагревания 1 килограмма водяного пара при давлении, равном 1 атмосфере от 600 до 601° С. Следовательно, для определения потребного количества топлива известной теплотворной способности необходимо знать зависимость между давлением, температурой и теплоемкостью воды и водяного пара. Такая зависимость именуется калорическим уравнением состояния. Кроме того, нужно знать величину скрытой теплоты парообразования, в свою очередь зависящую от давления и температуры.

Теория и опыт показывают, что важнейшими тепловыми свойствами рабочих тел являются: зависимость удельного объема от давления и температуры и зависимость теплоемкости при постоянном давлении от давления и температуры. Для того чтобы правильно рассчитать теплосиловую установку, необходимо в первую очередь знать удельные объемы и теплоемкости воды и пара для всех используемых температур и давлений.

Определение этих важнейших тепловых свойств воды и водяного пара является делом столько же важным, сколько и сложным. Водяной пар, как это будет показано здесь, принадлежит к числу таких веществ, свойства которых особенно трудно поддаются определению.

Несмотря на то, что исследование свойств воды и водяного пара ведется учеными различных стран уже свыше 150 лет, до самого последнего времени эти свойства были изучены все же совершенно недостаточно. Так, например, в результате тщательно поставленных опытов удельные объемы водяного пара были определены только при температурах, не превышающих 460° С, а теплоемкость при постоянном давлении — при температурах, не превышающих 450° С. Свойства же водяного пара при высоких давлениях и при температурах свыше 450—460° С почти не исследовались.

Такое положение ни в какой мере не могло устроить наших советских энергетиков. Пар высокой температуры и давления находит на наших электростанциях самое широ-

кое применение. Отсутствие точных проверенных данных по свойствам воды и водяного пара при высоких давлениях и температурах тормозило дальнейшее развитие теплоэнергетики.

Перед советскими учеными встала важная задача: нужно было определить свойства воды и водяного пара при высоких давлениях и температурах. Несмотря на большую сложность этой задачи, она была решена успешно и в короткий срок. В результате большой работы советских ученых тепловые свойства воды и водяного пара были тщательно исследованы при всех важных для практики давлениях и температурах.

Исследование свойств воды и водяного пара является, как мы уже сказали, делом весьма сложным. Объясняется это тем, что вода представляет собой вещество своеобразное, многие свойства которого совсем не похожи на свойства большинства других веществ. Целесообразно будет поэтому, прежде чем перейти к рассказу об исследованиях свойств воды и водяного пара, познакомить читателя хотя бы вкратце с основными из этих свойств.

Как известно, вода является одним из наиболее распространенных в природе веществ. Свыше 70 процентов всей земной поверхности покрыто слоем воды, образующей моря и океаны. Слой воды, покрывающий земную поверхность, является весьма значительным: если бы глубина морей и океанов повсюду была бы одинаковой, то она составила бы около 3 800 метров. Большое количество воды вмещают также озера и реки. Наконец, вода имеется и в недрах земли либо в виде так называемых подземных вод, либо в глубоких слоях земной коры.

Но вода встречается в большом количестве в природе не только в жидком состоянии. Она существует также и в газообразном состоянии — в виде пара и в твердом — в виде льда. В нашей земной атмосфере содержится весьма большое количество воды во всех трех агрегатных состояниях: в виде пара, жидкости и льда. Жидкая вода и лед находятся в атмосфере в виде мельчайших частиц, составляющих облака.

Вода, находящаяся в нижних слоях земной коры, имеет весьма высокую температуру и давление, достигающее 30 тысяч атмосфер.

Так как вода в изобилии встречается во всех почти местах земного шара и является наиболее распространенной в природе жидкостью, то многие ее свойства положены

в основу ряда единиц измерения. Так, объем 1 килограмма воды принят за единицу объема — литр; количество тепла, необходимое для нагревания 1 килограмма воды при атмосферном давлении на 1° С *, принято за единицу тепла — большую калорию; температура замерзания воды при атмосферном давлении принята за начало отсчета шкалы температур — 0° С и т. д.

С химической точки зрения вода представляет собой соединение водорода и кислорода. Молекула воды состоит из трех атомов: 2 атомов водорода и 1 атома кислорода. Молекулярный вес воды — около 18. Долгое время считали, что вода является элементом, т. е. таким веществом, которое не может быть разложено на составные части химическим путем. Однако со временем удалось показать, что под действием высокой температуры или электрического тока вода разлагается, образуя около 11 процентов (по весу) водорода и около 89 процентов кислорода.

В чем же заключаются особенности воды, чем вода по своим свойствам отличается от других веществ?

Своеобразный характер воды легко обнаружить, если внимательно присмотреться к некоторым ее свойствам. Рассмотрим некоторые из свойств воды, отличающие ее от других веществ.

Обычно все тела при нагревании расширяются. Чем выше температура тела, тем больше его объем. Примеров этому можно найти очень много. На занятиях по физике часто демонстрируется опыт с кольцом и шариком. Металлический шарик выполняется таких размеров, что, будучи холодным, он может пройти через кольцо. Но если шарик нагреть, например, на пламени газовой горелки, то он уже через кольцо не проходит: металл при нагревании расширяется, объем шарика увеличивается. Учитывая, что при нагревании металл расширяется, между отдельными рельсами железнодорожного пути всегда оставляется небольшой промежуток. Если этого не сделали бы, то в жаркий день, нагревшись, рельсы изогнулись бы. Вода в этом отношении представляет редкое исключение. Наименьший объем вода имеет при 4° С. Если нагревать воду и увеличивать ее температуру, то удельный объем ее будет расти. Если охлаждать воду ниже 4° С, то объем ее вопреки ожиданию также будет расти. Эта особенность воды имеет очень большое

* От 19,5 до 20,5° С.

значение. Именно благодаря ей пруды, озера и реки обычно не замерзают полностью, а только лишь покрываются снаружи более или менее толстым слоем льда. Образование ледяного покрова происходит следующим образом. Охлаждение воды происходит с поверхности, в результате соприкосновения поверхностных слоев воды с холодным воздухом. Охлажденные слои воды становятся более плотными и опускаются поэтому на дно водоема. На их место поднимаются новые более теплые слои воды. Так происходит как бы естественное перемешивание воды в водоеме, в результате которого охлаждается вся вода. Но процесс естественного перемешивания воды заканчивается после того, как вода охладится до 4° С, т. е. до температуры наибольшей плотности. Охладившиеся до 4° С наиболее плотные слои воды опускаются на дно водоема и больше вверх не поднимаются, так как дальнейшее охлаждение приводит уже к уменьшению плотности. Благодаря этому замерзают только верхние слои воды. Это свойство воды имеет большое значение. Если бы вода вела себя так, как и большинство других жидкостей, то водоемы промерзли бы до дна, а населяющие их живые существа могли бы погибнуть.

Большинство жидкостей при переходе в твердое состояние уменьшает свой объем. Если кусок твердого вещества, например олова, опустить в жидкость того же вещества (в жидкое олово), то твердая частица потонет. Вода и в этом отношении представляет исключение. Все мы часто наблюдали картину весеннего ледохода. Но мы были бы лишены этой возможности, если бы вода была подобна другим жидкостям, т. е. если бы лед был более тяжелым, чем вода. Кроме того, если бы вода была в этом отношении подобна другим жидкостям, то это опять-таки привело бы к полному промерзанию всех прудов, озер, рек и других водоемов. Действительно, охладившиеся вследствие соприкосновения с воздухом поверхностные слои воды замерзли бы и превратились в лед. Лед как более плотный и тяжелый опустился бы на дно водоема. На поверхности оказались бы новые, более теплые слои воды, которые, в свою очередь охладившись и замерзнув, опустились бы вниз. Такой процесс продолжался бы до полного промерзания водоема. Меньшая плотность или (что то же) больший удельный объем льда по сравнению с водой является причиной многих преобразований, происходящих в природе. Несколько капель воды, попавших, например, в трещину скалы, замерзая и, следовательно, расширяясь, могут при-

вести к разрушению скалы. Водители автомашин хорошо знают, что зимой в морозные дни нельзя оставлять машину на улице или в холодном гараже с заполненным водой радиатором: замерзая и расширяясь, вода может разорвать трубы радиатора.

Нам уже хорошо известно, что температура парообразования для любого вещества (в том числе и для воды) растет с увеличением давления. Для большинства веществ такая же картина имеет место и при замерзании жидкости: чем выше давление, тем выше температура замерзания. Но вода составляет исключение из этого правила. Температура замерзания воды уменьшается, а не возрастает с ростом давления. Это свойство воды доставляет нам очень большое удовольствие, когда, одев коньки, мы выходим на лед. Под довольно значительным давлением, оказываемым лезвием конька на лед, последний плавится и образовавшаяся вода служит прекрасной смазкой, способствующей легкому скольжению. Однако уменьшение температуры плавления льда, связанное с ростом давления, имеет свои пределы. При давлении около 2 115 атмосфер лед плавится при температуре — 22° С. Но при дальнейшем росте давления температура плавления льда начинает возрастать, и если мы достигнем очень высокого давления, например в 20 000 атмосфер, то лед будет плавиться уже при температуре около +80° С, т. е. мы сможем получить так называемый горячий лед.

Теплоемкость большинства жидкостей растет с увеличением температуры. Зависимость теплоемкости воды от температуры имеет более сложный характер. Так, например, если взять воду при 0° С и при атмосферном давлении и начать подогревать ее, то теплоемкость воды сначала будет уменьшаться и достигнет наименьшего значения примерно при 35° С. При дальнейшем нагревании теплоемкость снова начнет возрастать, а при температуре 100° С почти достигнет начального значения. Именно поэтому, учитывая изменение теплоемкости воды с температурой, необходимо было при определении единицы количества тепла (большой калории) указывать интервал температур (от 19,5 до 20,5° С), в котором производится нагревание 1 килограмма воды.

Таков далеко не полный перечень особенностей в свойствах воды, или, как часто говорят, а н о м а л и й воды.

Здесь следует также сказать несколько слов о некоторых других особенностях воды. В данном случае речь идет не об аномалиях, т. е. не о таких свойствах, которые являются прямо противоположными свойствам большинства других

веществ, а только лишь о свойствах, чрезмерно преувеличенных по сравнению со свойствами других веществ.

Теплоемкость жидкой воды интересна не только особым характером ее изменения в зависимости от температуры. Она интересна также и с точки зрения ее величины: ни одно другое вещество не имеет такой большой теплоемкости, как вода. Так, например, теплоемкость воды примерно в 3 раза больше теплоемкости бензина и серной кислоты, в 14 раз больше теплоемкости жидкого серебра и в 30 раз больше теплоемкости ртути. Многие хорошо известные нам явления объясняются большой теплоемкостью воды. Известно, что районы, расположенные вблизи морей или океанов, отличаются обычно мягким климатом, отсутствием резких колебаний температуры. Наоборот, в районах, расположенных вдали от морей и океанов, наблюдаются значительные колебания температуры: зимой — сильные морозы, летом — жара. Это объясняется тем, что моря и океаны, поглощая большое количество тепла в теплое время года и затем возвращая это тепло в более холодное время года, играют роль как бы колоссальных аккумуляторов тепла. Большая величина теплоемкости воды способствует увеличению аккумулирующей способности тепла морей и океанов.

Количество тепла, потребное для превращения 1 килограмма льда в воду той же температуры, или, иначе говоря, теплота плавления, также очень велика у воды по сравнению с другими веществами. По своей величине теплота плавления льда стоит на втором месте, уступая только лишь теплоте плавления алюминия. Чтобы превратить 1 килограмм льда в воду, нужно затратить примерно в 5 раз больше тепла, чем для того, чтобы расплавить 1 килограмм золота, в 14 раз больше, чем нужно для плавления свинца, и в 29 раз больше, чем нужно для плавления ртути. Большая величина теплоты плавления льда имеет очень важное значение. Если бы теплота плавления льда была бы такой же малой, как, например, у ртути, насколько быстрее таял бы весной лед и какое огромное было бы половодье. Весьма велика у воды и так называемая скрытая теплота парообразования, т. е. количество тепла, необходимое для превращения 1 килограмма воды в пар той же температуры.

Все изложенное подтверждает, что вода по своим свойствам во многом не похожа на большинство других веществ. Можно предполагать поэтому, что определение свойств воды на основе теоретических исследований должно явиться делом особенно сложным.

12. Теоретические исследования свойств водяного пара

Это предположение оказывается вполне справедливым и подтверждается многолетней работой ученых различных стран.

С практической точки зрения, как мы уже говорили, одной из важнейших задач в изучении свойств веществ является определение зависимости, связывающей между собой температуру, давление и удельный объем данного тела.

Как уже сказано, уравнение, с помощью которого выражена эта зависимость, именуется термическим уравнением состояния данного вещества. Если бы удалось составить термическое уравнение состояния для водяного пара, то с его помощью можно было бы не только определить удельный объем для нужных давлений и температур, но и вычислить теплоемкость и некоторые другие величины также для различных давлений и температур. Понятно поэтому, какую неоценимую помощь оказало бы достаточно точное уравнение состояния во всех теплотехнических расчетах.

Над составлением уравнения состояния водяного пара теоретическим путем работали многие годы ученые различных стран мира. Но задача оказалась настолько трудной, что решение ее найти не удавалось. Более того, международные конференции, специально собиравшиеся для выбора наиболее точных и надежных данных по свойствам воды и водяного пара, по существу пришли к выводу, что уравнение состояния для водяного пара теоретическим путем составить невозможно.

Только в последние годы в результате длительной работы ученые сумели в значительной мере разрешить эту трудную задачу. Особенно велика в этом деле заслуга наших советских ученых. О работе ученых-теоретиков мы расскажем читателю несколько позже, а пока поставим такой вопрос: чем объяснить большую сложность определения теоретическим путем уравнения состояния для водяного пара?

Составление уравнения состояния для различных веществ представляет задачу различной трудности: чем сложнее, многообразнее свойства данного вещества, тем труднее выбрать для него уравнение состояния. Особенно трудной является эта задача в отношении водяного пара.

Проще всего составить уравнение состояния для так называемого идеального газа. Что представляет собой идеаль-

ный газ? Почему для него сравнительно просто решается трудная задача определения уравнения состояния?

Современная наука представляет себе любой газ, в том числе и водяной пар, как скопление мельчайших, неделимых механическим путем, частиц — молекул. Все молекулы находятся в непрерывном беспорядочном тепловом движении. Во время этого движения они часто испытывают столкновения то между собой, то со стенками сосуда, в котором находится газ. Чем выше температура газа, тем больше скорость движения его молекул. Поэтому говорят, что температура является мерой кинетической энергии движения молекул. Давление газа на стенки сосуда есть результат непрерывных ударов молекул об эти стенки. Поэтому, если при прочих равных условиях увеличить температуру газа то увеличится и давление, оказываемое газом на стенки сосуда.

Так представляет себе современная наука любой газ или пар; в чем же заключаются отличительные черты идеального газа? Чтобы представить себе идеальный газ, надо допустить, во-первых, что молекулы являются настолько малыми, что их собственным объемом можно пренебречь, рассматривать их как материальные точки и, во-вторых, полагать, что между отдельными молекулами не существует никаких сил притяжения или отталкивания.

Сразу же необходимо отметить, что оба названные допущения противоречат действительному положению вещей: как бы ни был мал объем каждой молекулы, но все же он никак не может быть равен нулю, а силы взаимного притяжения или отталкивания между отдельными молекулами на самом деле всегда существуют. Следовательно, идеального газа в природе вообще существовать не может.

Для чего же понадобилось вводить в науку какой-то воображаемый идеальный газ, хотя заведомо известно, что в природе такого газа не существует?

Отвечая на этот вопрос, следует сказать прежде всего, что в науке сравнительно часто приходится прибегать к такого рода упрощениям для того, чтобы облегчить решение различных сложных задач. Введение понятия идеального газа тем более оправдано, что некоторые действительные, или, как их называют, реальные, газы по своим свойствам очень близки к идеальному газу. Точнее сказать, любой реальный газ тем более походит на идеальный, чем меньше его давление, т. е. чем дальше отстоит реальный газ от состояния конденсации, от превращения в жидкость.

Поэтому такие газы, как кислород, азот, водород, воздух и др., при обычных атмосферных условиях мало отличаются по своим свойствам от воображаемого идеального газа. Что касается водяного пара, то почти при всех важных для практики давлениях и температурах он резко отличается от идеального газа.

Термическое уравнение состояния идеального газа, т. е. уравнение, дающее взаимосвязь между температурой, давлением и удельным объемом, может быть легко получено на основании несложных теоретических рассуждений. Единственно, что нужно знать при составлении такого уравнения, — это молекулярный вес газа. Такое уравнение будет давать достаточно точный результат для всех тех газов, которые при заданных условиях близки к идеальному, в частности для кислорода, азота, водорода, воздуха и многих других [1].

Как же поступить в тех случаях, когда свойства реального газа заметно отличаются от свойств газа идеального? Как в этом случае получить правильное, отвечающее опыту уравнение состояния?

Очевидно, что для этой цели следует отказаться от сделанных ранее допущений и попытаться учесть влияние собственного объема молекул и сил взаимодействия между ними. Такая попытка была предпринята еще в прошлом веке голландским физиком ван дер Ваальсом и увенчалась известным успехом. Соображения ван дер Ваальса были сравнительно просты. Если объемом, который занимают сами молекулы, пренебречь нельзя, то нужно учесть, что действительный объем, в котором происходит движение молекул, будет меньше как раз на величину их собственного объема. Но если объем, в котором движутся молекулы, сокращается, а число молекул и их средняя скорость остаются неизменными, то количество соударений молекул между собой и со стенками сосуда неизбежно должно увеличиться. В результате этого давление также должно несколько увеличиться. Наоборот, предположив наличие взаимного притяжения между молекулами, ван дер Ваальс пришел к выводу, что следствием этого должно быть некоторое умень-

---

[1] Уравнение состояния идеального газа имеет очень простой вид: $pv = RT$. В этом уравнении p представляет собой давление газа, v — его удельный объем, T — температуру в градусах абсолютной шкалы, R — так называемую газовую постоянную. Значения R, различные для различных газов, определяются как частное от деления 848 на молекулярный вес данного газа.

шение внешнего давления газа, так как скорость молекулы перед ударом о стенку сосуда должна несколько уменьшаться, затормаживаться. Действие сил взаимного притяжения между молекулами приводит к тому, что газ оказывается как бы сжатым некоторым внутренним давлением.

Если в уравнение состояния идеального газа ввести две названные поправки, то можно получить уравнение состояния реального газа, носящее имя ван дер Ваальса [1].

Уравнение ван дер Ваальса в большинстве случаев дает качественно правильную картину поведения не только реальных газов, но и жидкостей. Последнее обстоятельство не должно вызвать удивления, так как с точки зрения современной физики жидкость, как и газ, представляет собой совокупность молекул, находящихся в хаотическом движении. Различие же между газом и жидкостью заключается в том, что силы взаимодействия (притяжения) между молекулами гораздо больше у жидкости, чем у газа. Таким образом, жидкости как бы уже сжаты весьма большим внутренним давлением. По проведенным подсчетам оказалось, что при обычных атмосферных условиях вода уже сжата внутренним давлением свыше 10 000 атмосфер. Понятно теперь, почему вода является практически несжимаемой: что значат лишние десятки и даже сотни атмосфер по сравнению с 10 000 атмосфер внутреннего давления!

К сожалению, уравнение ван дер Ваальса, дающее, как уже сказано, качественно правильную картину поведения газов и жидкостей, не может быть использовано для практических расчетов. Это объясняется весьма низкой точностью этого уравнения. Многие ученые делали попытки изменить, улучшить уравнение ван дер Ваальса, с тем чтобы повысить его точность. Но все эти попытки не привели к желаемому результату. Использование уравнения ван дер Ваальса применительно к воде и водяному пару приводит к весьма большим ошибкам.

Теперь мы должны изложить читателю существо работы, проделанной за последние годы по созданию уравнения

[1] Уравнение состояния ван дер Ваальса имеет следующий вид:

$$\left(p+\frac{a}{v^2}\right)\cdot(v-b)=RT.$$

В этом уравнении p, v, T и R имеют те же значения, что и в уравнении состояния идеального газа. Величины же a и b, именуемые постоянными ван дер Ваальса, определяются из известной температуры и давления критического состояния данного газа и имеют для каждого газа свое собственное значение.

состояния для водяного пара. Задача авторов настоящей книжки является далеко не легкой. В самом деле, очень не просто изложить сложную теорию уравнения состояния, не слишком упрощая описание явлений и не прибегая в то же время к языку математики, т. е. написанию всякого рода формул. Тем не менее мы должны эту задачу выполнить и поэтому заранее просим извинения у читателей, если сделано это будет недостаточно ясно и убедительно.

Многие ученые в своих работах исходили из того, что недостаточная точность уравнения ван дер Ваальса объясняется не ошибочностью положений, взятых в его основу, а недостаточностью этих положений. Уравнение ван дер Ваальса не учитывает, видимо, какого-то процесса, имеющего весьма важное значение.

Встав на такую точку зрения, необходимо было прежде всего ответить на вопрос: какой же именно процесс был незамечен ван дер Ваальсом?

Ответить на этот вопрос следует так: ван дер Ваальс в своем уравнении состояния не учитывал явления ассоциации молекул газа; именно поэтому его уравнение является очень неточным.

Очевидно, необходимо прежде всего пояснить читателю, что представляет собой явление ассоциации молекул газа. Долгое время в физике существовала точка зрения, согласно которой молекулы какого-либо вещества, например воды, неизменны по своим качествам (размерам, массе и т. д.). Подтверждением этой точки зрения служила невозможность разделения молекул данного вещества (например, водяного пара) на два сорта: более тяжелых и более легких.

И все же эта точка зрения оказалась ошибочной. Оказалось, что в случаях, когда силы взаимного притяжения между молекулами делаются достаточно большими, одиночные молекулы могут объединяться под влиянием этих сил в группы из двух, трех и большего числа молекул. Именно этот процесс и называется ассоциацией (соединением) молекул. Необходимо иметь в виду, что ассоциация молекул под влиянием сил притяжения, о которой здесь идет речь, имеет мало общего с процессом химического соединения веществ, например с образованием водяного пара из кислорода и водорода. Образовавшиеся в результате ассоциации группы молекул, или, как их называют, комплексы, являются значительно менее прочными и разрушаются гораздо скорее, чем, например, молекулы водяного пара. Эти комплексы молекул хотя и приобретают значение

самостоятельных частиц газа, но объединяют отдельные молекулы, повидимому, только благодаря механическим силам. Поэтому им свойственны только некоторые качества молекул. Можно предполагать также, что входящие в состав комплекса одиночные молекулы остаются неизменными; в этом заключается, между прочим, одно из существенных различий между процессом ассоциации и процессом химического соединения.

Таким образом, газ не является однородным по своему составу, а скорее напоминает смесь нескольких газов, составленную из простых одиночных молекул, двойных комплексов, тройных комплексов и т. д.

Чем же объяснить неудачу всех попыток разделения такого газа на его составные части, возможно ли в принципе такое разделение?

Ответ на этот вопрос будет отрицательным, такое разделение произвести невозможно. Объясняется это тем, что в газе непрерывно происходит процесс объединения молекул в комплексы (ассоциация) и процесс распада образовавшихся комплексов (диссоциация). Поэтому если бы даже и удалось произвести разделение газа, то оно было бы очень кратковременным: часть, например, двойных комплексов распалась бы на одиночные молекулы, а часть одиночных молекул образовала бы двойные комплексы. Разделение тем самым снова нарушилось бы.

Итак, согласно изложенному уравнение ван дер Ваальса недостаточно главным образом потому, что оно не учитывает процесса ассоциации и диссоциации молекул газа, процесса, который в реальных газах всегда происходит. Но как же учесть эти процессы, как определить количественно степень ассоциации молекул газа?

Наиболее удачное решение этой задачи с точки зрения проведения практических расчетов принадлежит советским ученым М. П. Вукаловичу и И. И. Новикову, которые воспользовались некоторой аналогией между процессом химического соединения веществ и процессом ассоциации молекул газа. Теория и опыт показывают, что химическая реакция протекает тем быстрее, чем больше имеется молекул исходных продуктов (например, молекул кислорода и водорода при образовании водяного пара) и меньше молекул продуктов реакции (молекул водяного пара). Сказанное составляет существо закона, именуемого законом действующих масс. Этот закон, как и большинство других, может быть выражен математически; иными словами, имеется

уравнение закона действующих масс. Вот это уравнение и было использовано для определения числа молекул, объединившихся в комплексы (определения степени ассоциации). Задача была непростой, но ее все же удалось решить. Было получено новое уравнение состояния, учитывающее явление ассоциации молекул газа и оказавшееся приемлемым для перегретого водяного пара.

Правда, уравнение получилось довольно громоздким, а для определения ряда постоянных коэффициентов этого уравнения оказался необходимым большой экспериментальный материал, но, несмотря на это, научная и практическая ценность нового уравнения не подлежит какому-либо сомнению.

13. Экспериментальные исследования и таблицы тепловых свойств воды и водяного пара

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в области теоретических исследований тепловых свойств водяного пара, не представляется все же возможным отказаться от опытного, экспериментального исследования этих свойств. Более того, данные, полученные в результате экспериментальных исследований, являются наиболее надежной основой как для составления таблиц тепловых свойств воды и водяного пара, так и для подтверждения теоретических выводов. Без точных и проверенных экспериментальных данных невозможно было бы в настоящее время составление точных таблиц тепловых свойств воды и водяного пара.

А между тем такие таблицы необходимы при проведении любых теплотехнических расчетов, связанных с водяным паром. Это объясняется тем, что вследствие своеобразных свойств воды и водяного пара, сильно отличающихся от хорошо изученных свойств большинства газов (кислорода, азота, воздуха и др.), уравнение для определения удельного объема при различных температурах и давлениях получается по необходимости очень сложным и неудобным для использования в расчетах. То же самое нужно сказать и об уравнении для определения теплоемкости. В то же время при проведении теплотехнических расчетов необходимы значения удельных объемов, теплоемкостей и ряда других величин при различных давлениях и температурах. Вот здесь-то и оказываются совершенно незаменимыми таблицы тепловых свойств воды и водяного пара, в которых приводятся точные численные значения удельных объемов, тепло-

емкостей и многих других величин для различных температур и давлений.

Именно поэтому, начиная с середины прошлого столетия, в лабораториях различных стран мира непрестанно проводятся измерения удельных объемов и теплоемкостей. Давление и температура, при которых определяются удельные объемы и теплоемкости, непрерывно возрастают.

За годы советской власти в нашей стране были созданы крупнейшие научно-исследовательские институты и высшие учебные заведения, ведущие работу в области энергетики и теплотехники. Наши советские ученые с большой энергией взялись за экспериментальное исследование тепловых свойств воды и водяного пара при высоких давлениях и температурах. Результат не заставил себя долго ждать. Если энергетика и энергомашиностроительная промышленность Советского Союза являются в настоящее время передовыми по сравнению с энергетикой и энергомашиностроительной промышленностью других, в том числе и наиболее развитых в промышленном отношении стран, то наша советская наука в области экспериментального и теоретического исследования свойств водяного пара намного обогнала науку зарубежных государств.

Интересные исследования тепловых свойств воды и водяного пара были проведены во Всесоюзном теплотехническом институте им. Ф. Э. Дзержинского (ВТИ) и Московском энергетическом институте им. В. М. Молотова (МЭИ).

В физико-технической лаборатории ВТИ под руководством Д. Л. Тимрота и Н. Б. Варгафтика измерялись, в частности, удельные объемы и теплоемкости воды и водяного пара. Удельные объемы определялись главным образом в так называемой критической области [1], т. е. при таких температурах и давлениях, при которых они ранее никем не измерялись. Теплоемкости при постоянном давлении определялись при высоких температурах, вплоть до 600° С, и высоких давлениях. Эти работы явились крупным вкладом в изучение тепловых свойств водяного пара.

В лаборатории теоретических основ теплотехники МЭИ проведены серьезные экспериментальные работы по исследованию воды и водяного пара. В этой лаборатории были созданы оригинальные экспериментальные установки и определены с высокой степенью точности значения удельных

[1] Критической областью называются те состояния, температура и давление которых близки к таковым для критической точки, т. е. для водяного пара к 225,65 атмосферы и 374,15° С.

объемов и теплоемкостей воды и водяного пара при ранее никем не исследованных давлениях и температурах, свыше 500 атмосфер и 650° С.

На страницах этой книжки нет ни возможности, ни необходимости приводить описание этих установок и рассказывать о том, как они работают. Это является уже слишком специальным вопросом и освещение его уместно в технических журналах и книгах. Заметим здесь только, что современные измерения физических свойств веществ отличаются очень высокой степенью точности. Сказанное в полной мере относится и к опытному определению тепловых свойств воды и водяного пара. Так, например, в современных опытных исследованиях ошибка в измерении температуры может составлять не свыше 0,04° С. Если при этом измеряется температура порядка 600° С, то такая ошибка практически совершенно неощутима. В точном измерении давления — деле еще более трудном, чем точное измерение температуры, — за последнее время также достигнуты большие успехи. С помощью так называемых поршневых манометров конструкции М. К. Жоховского можно производить очень точное измерение давления. Так, например, при измерении давлений порядка 500 атмосфер и даже выше поршневым манометром ошибка измерения не превышает 0,2 атмосферы. Иными словами, ошибка измерения в 2 500 раз меньше величины измеряемого давления. Конечно, такая неточность не имеет практического значения.

Разумеется, высокая точность измерения тепловых свойств воды и водяного пара достигается ценой большой сложности опытной установки.

Значительные успехи, достигнутые за последние годы в теоретических и экспериментальных исследованиях тепловых свойств воды и водяного пара, позволили создать точные и надежные таблицы этих свойств. Надо сказать, что работа по составлению таких таблиц имеет свою историю.

Начало систематических исследований свойств водяного пара относится к сороковым годам прошлого столетия.

Известный французский физик Реньо провел ряд опытов по определению теплоты парообразования, теплоемкости и других свойств водяного пара. Первые таблицы тепловых свойств воды и водяного пара были изданы в шестидесятых годах прошлого столетия. Они были составлены по опытным данным Реньо. Наибольшее давление, для которого приводились тепловые свойства воды и водяного пара в этих таблицах, составляло всего лишь 20 атмосфер. Эти первые па-

ровые таблицы, применявшиеся вплоть до начала двадцатого столетия, вполне удовлетворяли теплотехнику того времени, так как давление пара в котлах и паровых машинах не превышало тогда 12—15 атмосфер.

Начало двадцатого столетия замечательно стремительным развитием теплотехники, широким применением паровых турбин, пришедшим на смену паровым машинам, повышением начального давления и температуры пара. Для практики стали необходимы новые паровые таблицы: более точные, охватывающие значительно большие давления и температуры. В 1906 г. были изданы таблицы, составленные Молье. Наибольшее давление, приведенное в этих таблицах, достигало 225 атмосфер, а наибольшая температура 500° С. Вслед за таблицами Молье было выпущено большое количество паровых таблиц других авторов. В том числе в 1916 г. вышли в свет таблицы Попова.

Следует отметить, что между цифровыми данными, приведенными в паровых таблицах различных авторов, существовали значительные расхождения. Это создавало большие неудобства при их использовании. Кроме того, начальное давление и температура пара, применяемого в паросиловых установках, все время повышались, а паровые таблицы того времени при высоких температурах и давлениях не отличались большой точностью. Поэтому с целью уточнения паровых таблиц и выбора наиболее надежных цифровых данных в период с 1929 по 1934 г. состоялись три международных конференции по паровым таблицам. На этих конференциях за основу принимались последние по тому времени и наиболее точные опытные данные. В результате работы последней, третьей, международной конференции, состоявшейся в США в 1934 г., были составлены так называемые *скелетные таблицы* важнейших тепловых свойств воды и водяного пара. Наибольшее давление, приведенное в этих таблицах, 400 атмосфер, наибольшая температура 550° С.

Скелетные таблицы, принятые третьей международной конференцией, в свое время бесспорно были наиболее точными и легли в основу многочисленных паровых таблиц, выпускавшихся в дальнейшем различными авторами. Однако и эти по тому времени наиболее точные таблицы имели очень большие недостатки. Их составители полагали, что создание теории тепловых свойств водяного пара является настолько сложным делом, что заниматься им вообще не имеет смысла. Как уже было сказано, работа международ-

ных конференций по паровым таблицам основывалась поэтому исключительно на экспериментальных исследованиях. Но вся беда заключалась в том, что эти исследования были далеко не полными. Тепловые свойства воды и водяного пара в то время вообще еще не были изучены опытным путем при температурах выше 460° С. Это не могло не отразиться на точности скелетных таблиц: при температуре свыше 460° С, как показали дальнейшие исследования, данные этих таблиц содержали существенные ошибки.

Для энергетики Советского Союза, развивающейся на основе новейшей техники, широко использующей паровые котлы и турбины высокого давления, точные паровые таблицы, охватывающие область высоких давлений и температур, оказались совершенно необходимыми. Так как работы зарубежных исследователей были недостаточны для составления таких таблиц, то советским ученым пришлось выполнить всю эту работы самим. О теоретических и экспериментальных работах, проведенных советскими исследователями по определению тепловых свойств воды и водяного пара, мы уже кратко рассказали.

Эти работы советских ученых позволили создать точные и надежные таблицы тепловых свойств воды и водяного пара, включающие область высоких и сверхвысоких давлений и температур. Советские паровые таблицы — результат многолетней теоретической и экспериментальной работы наших ученых — способствуют дальнейшему еще более широкому применению пара высокого давления, росту и совершенствованию отечественной энергетики.

Заключение

Авторы будут считать свою задачу выполненной, если терпеливый читатель, дочитав эту книжку до конца, получит известное представление об исключительно большом значении теплотехники в энергетике, о принципе работы и устройстве тепловой электростанции, о том, какую большую роль играет в производстве электрической энергии водяной пар.

Работа по дальнейшему усовершенствованию мощных тепловых машин и установок, по дальнейшему исследованию свойств водяного пара, столь успешно проводимая в Советском Союзе, не только является важной и нужной, но и очень интересной и увлекательной. Те молодые читатели, которые, может быть, захотят посвятить себя этой работе, никогда в том не раскаются. В этом авторы настоящей книжки уверены вполне.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Введение 3

1. Превращения энергии и назначение тепловой электрической станции 11
2. Почему при сгорании топлива выделяется теплота 19
3. На долго ли хватит топлива электрическим станциям и каковы перспективы использования других видов энергии 28
4. Не выгоднее ли строить гидростанции 36
5. Устройство тепловой электрической станции 39
6. Паровой котел 42
7. Паровая турбина 50
8. В чем заключается преимущество применения водяного пара на тепловых электрических станциях 60
9. Почему выгодно повышать начальное давление и температуру пара 70
10. Найдут ли применение в паросиловых установках другие вещества 74
11. О некоторых особенностях свойств воды и водяного пара . . 78
12. Теоретические исследования свойств водяного пара 85
13. Экспериментальные исследования и таблицы тепловых свойств воды и водяного пара 91

Заключение 95