

рения, когда площадь соприкосновения газов и стенок цилиндра велика. Эффективность этого тепла в связи с понизившимся давлением газов весьма мала. Таким образом, примерно только $\frac{1}{6}$ тепла, отданного охлаждающей среде, могла бы быть более или менее эффективно (допустим с к. п. д. в 40%) превращена в работу. Следовательно, производимая двигателем работа возросла бы примерно только на $\frac{1}{15}$ тепла, отданного охлаждающей среде, т. е. эффективный к. п. д. двигателя при полном устранении теплотдачи к охлаждающей среде возрос бы не более чем на 2—4%. Тот же итог получится, если, доведя жидкость, охлаждающую двигатель, до кипения, использовать ее во вспомогательной паровой машине.

Сказанным объясняется, почему главное внимание при усовершенствовании двигателей внутреннего сгорания было обращено на: 1) устранение потерь в начальной стадии рабочего расширения, когда давление, а поэтому и работоспособность газов велики; 2) обеспечение условий возможно более полного сгорания топлива (что для малолетучих моторных топлив и привело к дизельному циклу в варианте бескомпрессорного дизеля); 3) использование давления выхлопа присоединением к двигателю газовой турбины; 4) уменьшение размеров и веса двигателей (вес авиационных двигателей удалось довести примерно до $\frac{1}{2}$ кг на 1 л. с. их мощности).

Чтобы правильно оценить значение двигателей внутреннего сгорания, достаточно вспомнить, что эти двигатели привели к повсеместному использованию автомашин, обеспечили развитие авиации, позволили механизировать сельское хозяйство; к 1957 г. на полях Советского Союза работало свыше полумиллиона тракторов; дизели получили широкое применение на электростанциях, на судах (теплоходах), на локомотивах (тепловозах), в танках, в землечерпательных машинах и т. д.

§ 136. Процессы в паровых машинах и паровых турбинах

Поршневые паровые машины являются, как известно, старейшими тепловыми двигателями, вошедшими в широкое употребление на фабриках в конце XVIII в., а на железных дорогах и во флоте — в первые десятилетия XIX в.; первая годная для эксплуатации паровая турбина была сконструирована французским инженером Лавалем в 1885 г. Несмотря на низкий (в сравнении с двигателями внутреннего сгорания) к. п. д., паросиловые установки по-прежнему занимают видное место в промышленности и на транспорте, так как они позволяют использовать теплоту сгорания дешевых видов топлива: каменного угля, торфа, мазута, древесины.

Резервы и выработка этих видов топлива огромны. В СССР годовая добыча угля составляет около полумиллиарда тонн. Одни запасы торфа в СССР по теплотворной способности равносильны 150 млрд. т нефти, что превосходит все мировые запасы нефти. Этим и определяется практическое значение паросиловых установок. Множество больших электростанций и крупные военно-морские суда оснащены паровыми турбинами мощностью в десятки (и более ста) тысяч л. с.; на железных дорогах, на небольших электростанциях, в промышленных предприятиях и на небольших судах применяются поршневые паровые машины самой разнообразной мощности (преимущественно порядка сотен и тысяч л. с.).

К. п. д. *поршневых паровых машин* часто составляет всего 10—12%. Низкий к. п. д. паровых машин объясняется не какими-либо их конструктивными недостатками, но, во-первых, *малой разностью температур, между которыми заключен цикл паровой машины*, и, во-вторых, *неизбежными потерями тепла в топке*.

Максимальный коэффициент полезного действия, который может иметь какая-либо тепловая машина, не может превысить того к. п. д., который при заданных пределах температур присущ циклу Карно:

$$\eta = \frac{T - T_0}{T}$$

Для паровой машины T есть температура пара в котле. При давлении в котле $p = 12 \text{ ат}$ $T = 460^\circ$. T_0 — температура конденсации отработавшего пара; в случае выпуска отработавшего пара в атмосферу $T_0 \approx 373^\circ$; при выпуске отработавшего пара в конденсатор, в котором поддерживается давление в $1/10 \text{ ат}$, $T_0 = 318^\circ$. Для указанных условий (при давлении в котле в 12 ат и при выпуске пара в конденсатор) $\eta \cdot 100 = 31\%$. Это означает, что не более 31% тепла, сообщенного воде, может быть превращено в работу. Но примерно только 70% теплоты сгорания топлива идет на нагревание воды, остальное количество уносится дымовыми газами; до 10% составляют потери на трение, следовательно, эффективный к. п. д. паровой машины в указанных условиях не может превышать 20% ¹⁾. Если давление пара в котле равно 9 ат , то к. п. д. паровой машины будет не более 16%.

Обычно стремятся приблизить цикл паровой машины к так называемому циклу Ренкина, изображенному на рис. 279. На рис. 279 точка 1 отвечает термодинамическому состоянию воды, поступающей в паровой котел. Линия 1—2 изображает процесс нагревания воды в котле до температуры кипения T при давлении p (точка 2). Изотерма-изобара 2—3 изображает процесс парообразования; образующийся пар наполняет рабочий цилиндр, перемещая поршень. Производимая при этом поршнем работа изображается площадью, заключенной между изохорами, проходящими через точки 2 и 3, и ограниченной сверху линией 2—3. Эту работу называют *работой наполнения*. Когда часть цилиндра окажется наполненной

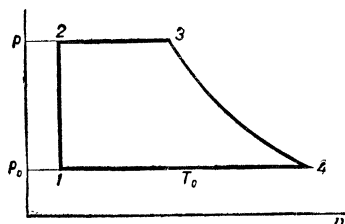


Рис. 279. Цикл Ренкина.

паром, прекращают доступ пара в цилиндр. Это называют *отсечкой* пара (точка 3). Последующее расширение пара происходит примерно адиабатно, пока давление пара не упадет до того давления p_0 , которое поддерживается в конденсаторе. Точка 4 изображает термодинамическое состояние пара в конденсаторе (давление p_0 и температура T_0).

Первой мерой к повышению к. п. д. паровых машин является *расширение температурных пределов* цикла. С этой целью стремятся повысить температуру кипения воды в котле. Часто поддерживают давление в котле в 10 — 16 ат , что соответствует температуре кипения в 180 — 200°С . Все шире входят в употребление (в особенности для паровых турбин) котлы высокого давления в 60 — 170 ат , что соответствует температуре кипения в 275 — 350°С . Для понижения температуры конденсации отработавшего пара его выпускают не в атмосферу, а в конденсатор, где поддерживается давление примерно в $0,1 \text{ ат}$ (или даже $0,03 \text{ ат}$) и где поэтому пар сгущается в воду при 45°С (или 24°), а не при 100°С , как это имело бы место при выпуске отработавшего пара в атмосферу.

Второй по своему значению мерой к повышению к. п. д. паровых машин является *борьба с преждевременной конденсацией пара*. В поршневой машине к концу цикла при выпуске пара в конденсатор стенки цилиндра и поршень охлаждаются, поэтому при впуске в цилиндр новой порции пара из котла часть пара сгущается в воду и в виде капель оседает на стенках цилиндра и на внутренней поверхности поршня. После отсечки пара во время последующего расширения благодаря связанному с расширением падению температуры еще некоторая часть пара сгущается в воду. Так как работа производится паровой машиной вследствие давления пара на поршень, а сконденсировавшийся пар уже не оказывает этого давления, то понятно, что вся преждевременно сконденсировавшаяся часть пара представляет собой совершенно такую же непригодную трату пара, как и прямая утечка пара, происходящая из-за недостаточного плотного прилегания поршня к стенкам цилиндра.

¹⁾ $0,31 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \approx 0,2$.

Наиболее действительной мерой против преждевременной конденсации пара является *перегрев пара*. На пути из котла в цилиндр пар заставляют проходить через обогреваемые топочными газами трубы пароперегревателя (рис. 280). Пар из насыщенного превращается в перегретый; обычно создают перегрев на 150—200°, так что при впуске пара в цилиндр хотя и происходит некоторое падение температуры пара, но пар все еще остается перегретым, и стенки цилиндра даже во время расширения почти не увлажняются¹⁾.

В машинах, работающих насыщенным паром, для уменьшения преждевременной конденсации внешние стенки цилиндра обогревают горячим паром посредством устройства, которое носит название паровой рубашки.

Чем шире температурные пределы цикла, тем более резкое охлаждение испытывает каждая новая порция пара, впускаемого в цилиндр из котла. Поэтому

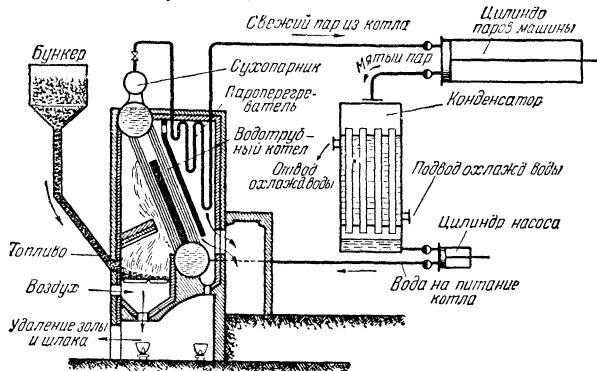


Рис. 280. Схема паровой установки.

применение высокого давления (высокого нагрева пара в котле), с одной стороны, повышает к. п. д. цикла, но, с другой стороны, увеличивает потери, связанные с преждевременной конденсацией пара. Это побуждает строить машины с несколькими (чаще — двумя) рабочими цилиндрами, через которые последовательно проходит пар, испытывая в каждом цилиндре расширение при постепенно падающей температуре. Этим достигается в каждом цилиндре меньшая разность температуры между свежим паром, поступающим в цилиндр, и отработавшим. Поэтому стенки каждого цилиндра, имея после выхлопа отработавшего пара температуру не слишком низкую в сравнении с температурой свежего пара, не так сильно охлаждают свежий пар.

На рис. 280 представлена схема паросиловой установки, понятная по сделанным на схеме надписям. На этой схеме показан обычный водотрубный котел с двумя барабанами.

Большое преимущество имеют *прямоточные* котлы системы Л. К. Рамзина. Схема такого котла представлена на рис. 281. В котле Рамзина нет громоздких барабанов, которые обычно служат для обеспечения естественной циркуляции

¹⁾ На первый взгляд может показаться, что перегрев пара должен увеличивать к. п. д. паровой машины не только потому, что этим путем устраняются потери, связанные с преждевременной конденсацией пара, но также и потому, что перегрев значительно расширяет температурные пределы цикла. Оказывается, однако (теодинамика позволяет предвидеть это), что форма цикла изменяется при этом в невыгодную сторону и поэтому расширение температурных пределов цикла путем перегрева почти не было бы эффективным (в смысле повышения к. п. д.), если бы не сказывалась другая, более важная роль перегрева, заключающаяся в устранении преждевременной конденсации.

воды и собирания пара. В обычных котлах вода и пароводяная смесь поднимаются по одной системе трубок, а по другим трубкам вода опускается. Вода совершает многократную циркуляцию по этим трубкам, раньше чем она успевает превратиться в пар. Вместо обычной естественной циркуляции воды в котле Рамзина введена принудительная циркуляция воды. Вода подается насосом под значительным давлением в длинный змеевик. В первой части змеевика вода нагревается отходящими газами до температуры кипения; во второй части змеевика, охваченной пламенем, вода кипит, превращаясь в пар высокого давления (более 120 ат); в третьей части змеевика происходит перегрев пара.

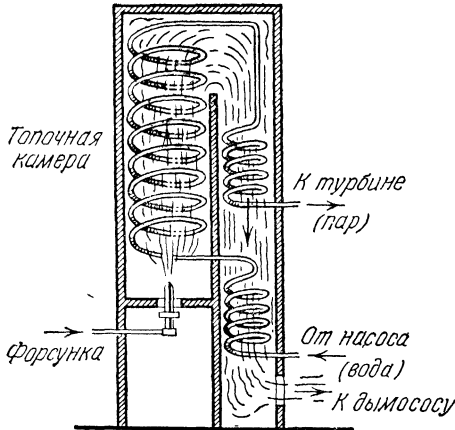


Рис. 281. Прямоточный котел.

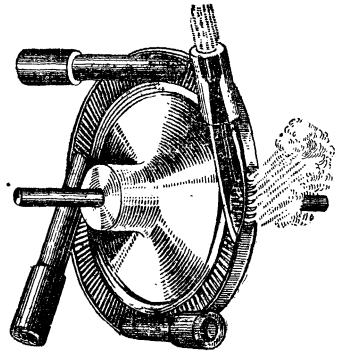


Рис. 282. Сопла турбины.

В паровых турбинах в механическую работу преобразовывается кинетическая энергия пара. Из котла пар под большим давлением поступает в направляющие аппараты (сопла) турбины (рис. 282) и в них за счет падения давления приобретает при выходе большую скорость, примерно 1000 м/сек. Чтобы в сопле происходило возможно более полное превращение внутренней энергии пара в кинетическую энергию, соплу придают форму расширяющегося к выходу канала (§ 133). Покинув направляющие аппараты, пар поступает на лопатки турбинного колеса, производит на них давление и приводит рабочее колесо турбины во вращение.

Различают два принципа действия пара на лопатки турбин: активное и реактивное. Для пояснения этих принципов приведены схемы на рис. 283 и 284¹⁾.

На рис. 283 изображена схема активного действия пара на лопатки турбины. Лопатки турбины закреплены на рабочем диске, насаженном на вал турбины. Рабочий диск вращается в плоскости, перпендикулярной к чертежу; u означает окружную скорость диска. Пар из котла поступает при давлении p_1 к соплу и в нем, приобретая ускорение, испытывает падение статического давления до значения p_2 . По выходе из сопла пар со скоростью c_1 поступает на лопатку; ω_1 означает ту относительную скорость, с которой пар протекает вдоль лопатки. Изогнутая лопатка отклоняет струю пара; благодаря этому пар давит на лопатку турбины с силой, которая представляет собой развиваемую им центробежную силу.

Вследствие трения пара о поверхность лопатки относительная скорость пара несколько снижается. Относительная скорость отработавшего пара ω_2 , сложенная с окружной скоростью u , дает абсолютную скорость выхода пара c_2 . Если не учитывать потери на трение пара, то работа, воспринятая лопатками от каждого килограмма пара, протекающего через рабочее колесо турбины, измеряется

¹⁾ На этих рисунках лопатки направляющего аппарата заменены соплами.

убылью кинетической энергии пара: $\left(\frac{c_1^2}{2g} - \frac{c_2^2}{2g}\right)$ кгм, где c выражено в м/сек, а g — в м/сек².

В разбираемом случае характерны следующие явления:

1) Преобразование внутренней энергии пара в кинетическую происходит исключительно в направляющих, неподвижных аппаратах (в соплах). 2) Давление пара при выходе из сопла (при выходе на лопатки) понижено до величины противодействия среды, так что при течении пара вдоль лопатки давление остается неизменным. 3) Поскольку на лопатках давление пара остается неизменным, входные и выходные сечения каналов, образуемых соседними на диске лопатками, устраивают одинаковыми.

Турбины, в которых применен активный принцип действия пара, часто называют турбинами равного давления.

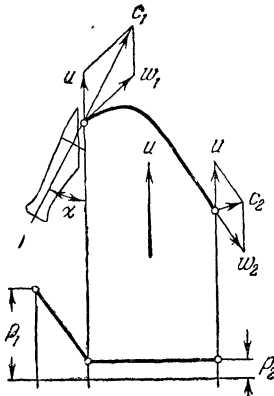


Рис. 283. Активное действие пара на лопатку турбины.

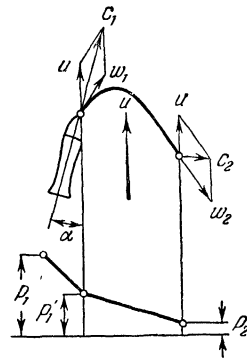


Рис. 284. Реактивное действие пара на лопатку турбины.

На рис. 284 изображена схема реактивного действия пара на лопатку турбины. В этом случае пар, проходя через сопло, испытывает не полное расширение, а лишь частичное. Покидая сопло, он имеет давление p_1' большее, чем противодействие среды p_2 . Поэтому абсолютная скорость c_1 входа пара на лопатку в этом случае соответствует не полному перепаду давлений, а лишь разности их $p_1 - p_1'$. Лопатки изогнуты и расположены на ободе так, что межлопаточные пространства представляют собой каналы с возрастающим сечением. Пар, протекая меж лопатками, продолжает расширяться, и по выходе из лопаток давление его падает до противодействия среды p_2 . Следовательно, в этом случае преобразование внутренней энергии пара в кинетическую происходит в соплах лишь частично и заканчивается уже на турбинном колесе в расширяющихся каналах межлопаточных пространств.

Относительная скорость течения пара вдоль лопатки получается так же, как и в случае схемы рис. 283, разложением абсолютной скорости по направлению окружной скорости и по направлению касательной к поверхности лопатки. Вследствие расширения пара в межлопаточных каналах относительная скорость возрастает от w_1 до w_2 . Пар получает ускорение и поэтому оказывает на лопатку турбины, кроме давления отклонения струи, еще давление реакции струи.

Реактивные турбины часто называют турбинами избыточного давления.

Для обеспечения наибольшего к. п. д. надо, чтобы окружная скорость и лопаток турбины составляла в случае активной турбины примерно половину скорости выхода пара из сопла, а в случае реактивной турбины окружная скорость

должна быть почти равна скорости выхода пара. Более точно: для активной турбины надо, чтобы $u = \frac{1}{2} c_1 \cos \alpha$, а для реактивной $u = c_1 \cos \alpha$; угол выхода α выбирается возможно более малым, и поэтому значения $\cos \alpha$ не сильно разнятся от единицы.

Даже при использовании средних перепадов давлений абсолютные скорости истечения пара из сопла получаются порядка 1200 м/сек (это много более, чем скорость пули). Окружная скорость диска активной турбины должна была бы, следовательно, составлять примерно 600 м/сек. Такой окружной скорости при диаметре рабочего колеса в 1 м соответствуют 11,5 тыс. оборотов вала в 1 мин. В целях понижения числа оборотов турбины без ущерба для к. п. д. расчленяют работу пара на несколько ступеней.

В однодисковой турбине весь процесс преобразования внутренней энергии в кинетическую осуществляется при помощи одного ряда направляющих аппаратов, расположенных перед рабочим диском. Введением ступеней давления разбивают превращение внутренней энергии в кинетическую на несколько этапов. Достигается это тем, что за первым рядом направляющих аппаратов и первым рабочим диском устанавливают второй ряд аппаратов и второй рабочий диск и т. д. (рис. 285). В такой многоступенчатой турбине в каждом ее рабочем колесе используется лишь часть всего располагаемого перепада давлений, следующая часть его используется во второй ступени и т. д. Ступени давления, введенные Парсонсом,

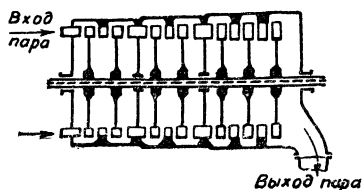


Рис. 285. Схема многоступенчатой турбины.

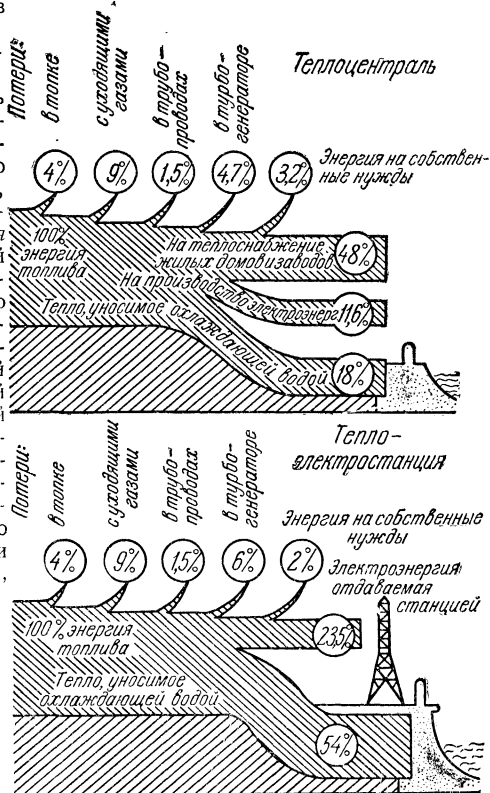


Рис. 286. Тепловые балансы ТЭС и теплоцентрали.

допускают работу пара на лопатках и по активному и по реактивному принципам.

В активных турбинах применяют еще другой способ понижения числа оборотов турбины, введенный Кертиссом, — ступени скорости. При применении ступеней скорости отдача кинетической энергии производится паром не в одном рабочем диске, а в нескольких. Пар по выходе из лопаток первого диска поступает на неподвижные промежуточные направляющие лопатки. Назначение последних — изменить направление движения пара для возможности его входа на лопатки второго вращающегося диска с целью дальнейшей отдачи там части кинетической энергии. За вторым рабочим диском следуют опять направляющие лопатки и т. д.

Высокое начальное давление пара и относительно высокий вакуум в конденсаторе обеспечивают паровым турбинам сравнительно высокий к. п. д., достигающий (по отношению к энергии топлива, расходуемого в котле) 25—28%. Удельный расход пара, составляющий в поршневых машинах 8 и более кг пара в час на 1 л. с., в паровых турбинах равен 4—4½ кг/л. с. в час.

Мощные паровые турбины строят с большим числом ступеней (16—40); общее число лопаток в колесах турбины исчисляется несколькими тысячами; вес турбины составляет 2—4 кг на 1 л. с. мощности. Роторы турбин на 100 тыс. квт, делающие 3000 об/мин, весят около 30 т.

На тепловых электростанциях (ТЭС) вода, охлаждающая конденсатор, нагревается на 15—30° и уносит более половины тепла. Чтобы использовать часть этого тепла для теплоснабжения жилых домов, фабрик и заводов, часто вместо ТЭС строят *теплоцентрали*, где в турбинах не весь пар срабатывается до предельно низкого давления, а часть его отбирается с давлением 1,5—2,5 ат для подогрева воды в целях теплофикации. На рис. 286 сопоставлены тепловые балансы ТЭС и теплоцентрали.

§ 137. Реактивные двигатели

Ускоренное движение газового потока в трубопроводе переменного сечения и при вытекании газа из сопла вызывается уменьшением давления в газовой струе. Приобретая ускорение, газовый поток оказывает противодействие, порождающее *реактивную силу*, приложенную к трубопроводу и соплу, направленную в сторону, противоположную ускорению газового потока и *равную ежесекундному приросту количества движения вытекающего газа*; когда давление в вытекающей струе на выходе из сопла превышает противодействие среды, реакция газовой струи дополняется импульсом этих неуравновешенных сил давления.

Обозначим ежесекундный весовой расход газа через G , скорость газа перед истечением через ω_1 и скорость струи через ω_2 ; тогда ежесекундный прирост количества движения будет равен $G \frac{\omega_2 - \omega_1}{g}$.

Если среднее давление в выходном сечении равно p_2 , а противодействие (при выбросе газа в атмосферу — атмосферное давление) равно p_0 , то неуравновешенная сила давления, действующая на выходное сечение сопла S_2 , будет равна $S_2(p_2 - p_0)$. В сумме реакция газовой струи

$$R = G \frac{\omega_2 - \omega_1}{g} + S_2(p_2 - p_0). \quad (20)$$

Чтобы реализовать вытекание газа со сверхзвуковой скоростью, применяют расширяющиеся сопла; при работе сопла в расчетных условиях давление на выходе в струе равно противодействию среды, $p_2 = p_0$.

Реакция газовой струи используется в реактивных двигателях. Реактивные двигатели подразделяются на две группы: на воздушно-реактивные двигатели (ВРД) и на ракеты. На борту летательного аппарата с воздушно-реактивным двигателем содержится только энергоноситель, а окислителем и рабочим веществом, истечение которого создает тягу, служит атмосферный воздух. Ракетный