

ный насос 15 имел свой турбопривод со сбросом отработавшего пара в деаэратор, а излишков пара — в главный конденсатор 9. Турбины генератора, резервного питательного насоса и эжектора 16 работали на паре, поступававшем из пароохладителя 3 по паропроводу 17.

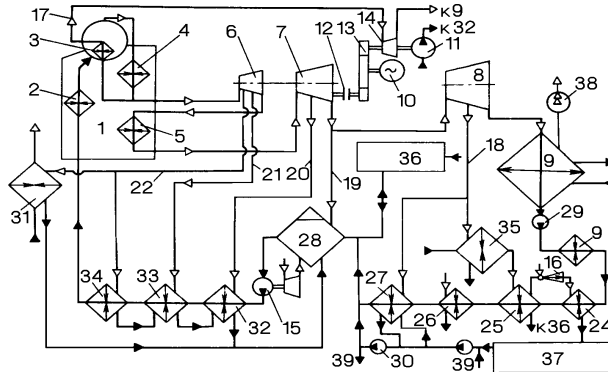


Рис. 4.21. Схема ПТУ танкера «Крым»

Тепловая схема ПТУ типа ТС-3 предусматривала многоступенчатый регенеративный подогрев питательной воды паром пяти отборов от турбин 18, 19, 20, 21, 22. Первая ступень подогрева включала маслоохладитель 23, конденсатор эжектора испарителя 24, конденсатор испарителя 25, испаритель системы отсоса пара от уплотнений турбин 26 и ППВ низкого давления 27. В качестве второй ступени использовался деаэратор 28, в который насосами 29 и 30 подавался конденсат из ППВ первой и третьей ступеней подогрева, а также конденсат греющего пара из парогенератора низкого давления 31.

Парогенератор 31 производил пар для удовлетворения общесудовых потребностей. Третью, четвертую и пятую ступени подогрева составляли ППВ 32, 33, 34, греющей средой для которых служил пар третьего 20, четвертого 21 и пятого 22 отборов. Пар высокого давления (отбор 22) также направлялся в парогенератор низкого давления, а пар низкого давления (отбор 18) — в испаритель 35, производивший дистиллят. Добавочная вода из испарителя 35 подавалась в цистерну дистиллята 36, конденсат из испарителя 35, конденсатора эжектора испарителя 24 и испарителя системы отсоса 26 шел в цистерну горячих конденсатов 37. Вакуум в конденсаторе 9 поддерживал электровакуумный насос 38. Связь конденсатно-питательной системы с вспомогательным котлом осуществлялась трубопроводами 39.

Удельный расход топлива в этой ПТУ, равный 0,257 кг/(кВт·ч), существенно превышал аналогичный показатель дизельных установок, лежавший в начале 1980-х гг. в пределах 0,19—0,21 кг/(кВт·ч).

К концу 1970-х гг. эра ПТУ закончилась. В 1980 г. их установили только на двадцати двух крупнотоннажных судах из всего числа, построенных в мире. Суммарная мощность этих установок составляла всего 7 % общей мощности СЭУ, сданных в эксплуатацию. В 1981 г. тенденция к замене ПТУ дизелями углублялась: их мощность составила уже 4,02 % от общей.

Тем не менее, работы по созданию перспективных ПТУ продолжались в конце 1970-х и в 1980-х гг. Так, шведская фирма «Сталь Лаваль» еще в 1975 г. начала разработку проекта VAP (Very Advanced Propulsion). Он предусматривал создание трехкорпусной ПТУ мощностью 20 000 кВт с промежуточным перегревом пара и котлами, сжигающими пылевидное топливо в «кипящем» слое. В этой установке должен был использоваться пар с давлением 12,6 МПа и температурой перегрева 600 °С. Ожидалось, что применение новых технических решений и пара повышенных параметров позволят создать ПТУ с высоким КПД, которая сможет конкурировать с дизельными установками.

#### 4.5. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ТУРБОМЕХАНИЗМЫ

Паровые турбины стали использовать для привода судовых вспомогательных механизмов с конца 80-х гг. XIX в. Впервые в России паровую турбину мощностью 18 кВт применили в качестве вспомогательного двигателя на волжском пароходе «Луч». Здесь в 1887 г. она вращала электрогенератор [2].

В 1910—1960-х гг. вспомогательные турбины широко использовались как двигатели насосов, котельных вентиляторов и ротационных форсунок, электрогенераторов. В настоящее время они играют роль утилизационных турбогенераторов на судах с дизельными ЭУ, а также работают как приводы грузовых насосов танкеров.

На рис. 4.22 показан продольный разрез турбонасоса для подачи питательной воды к вспомогательному котлу паротурбинного судна постройки 1960-х гг.

Рабочее колесо центробежного насоса 1 и колесо турбины 2 насажены на общий вал. Паровая турбина выполнена в виде двухвенечного колеса Кертиса. Подача свежего и отвод отработавшего пара осу-

ществляются при помощи патрубков 3 и 4. Уплотнение вала турбины производится при помощи разрезных угольных колец.

На рис. 4.23 представлен разрез пропеллерного котельного турбовентилятора большой производительности периода 1930—1940-х гг. Его крылатка 2 устанавливалась на валу 1, на котором шпонкой закреплено колесо турбины 5. Воздух поступал на крылатку через патрубок 3, а через диффузор 4 он нагнетался в топку котла. Турбину образовывали три венца лопаток 6. Пар к ее соплам 8 подводился через паровой фильтр и патрубок 7. Отрабатанный пар удалялся через патрубок 9, его тепло использовалось для подогрева питательной воды. Крепление вентилятора осуществлялось при помощи лап и тяг 10 и 11 [82].

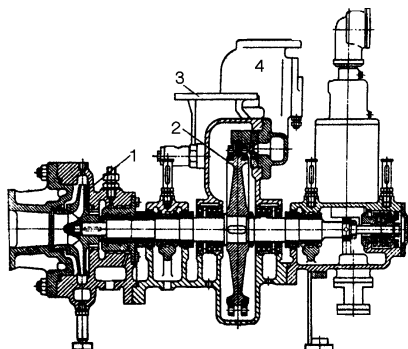


Рис. 4.22. Питательный турбонасос

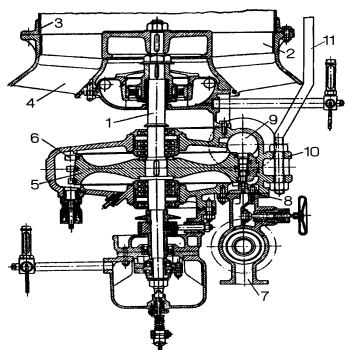


Рис. 4.23. Турбовентилятор

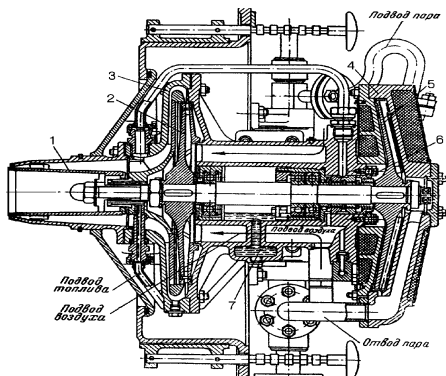


Рис. 4.24. Ротационная форсунка

В 1940—1950-х гг. в качестве топочных устройств на некоторых судовых паровых котлах использовались ротационные форсунки с турбоприводом. Ряд подобных механизмов разработали отечественные проектные организации. Их распыливающий стакан вращала простейшая радиальная или осевая одноступенчатая турбина, работавшая на насыщенном или слабоперегретом паре с давлением 1,0—1,2 МПа. Расход пара составлял 50—70 кг/ч. Турбинка, наряду со стаканом, приводила вентилятор, подававший воздух для формирования факела.

Использование таких форсунок вместе с паровыми вентиляторами практиковалось на судах с маломощными электростанциями.

На рис. 4.24 приведен поперечный разрез ротационной форсунки с паровым приводом конструкции ЦНИИМФ [68]. Ее номинальная производительность составляла 170 кг/ч. Распыливающий стакан 1 приводился радиальной паровой турбинкой 4. Она состояла из стального рабочего колеса 5, вращавшегося на шарикоподшипниковой опоре с лабиринтовым уплотнением 6. Смазка ее вала производилась турбинным маслом, заполнявшим масляную ванну 7. Первичный воздух подавался вентилятором 3, имевшим дюралюминиевое колесо 2.

На отечественных паротурбинных судах в 1950—1960-х гг. применялись вспомогательные турбогенераторы ТД-600 мощностью 600 кВт, рис. 4.25. Они работали на перегретом паре с давлением 4 МПа и температурой 470 °С. Турбина развивала 8 500 об/мин, передаточное отношение редуктора составляло 8,5. Удельный расход пара на номинальной нагрузке достигал 60 кг/(кВт·ч). Турбина, редуктор, генератор, возбуждатель и приборный щит размещались на общей фундаментной раме. Цельнокованный ротор выполнялся сплошным. Он имел лабиринтные уплотнения. Диски равного сечения снабжались отверстиями для выравнивания давления пара. Турбина состояла из двухвенечной регулировочной ступени и шести одновенечных активных ступеней давления.

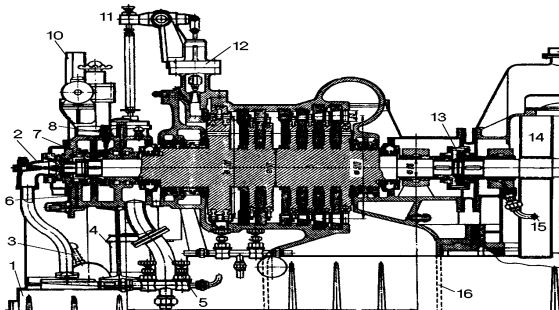


Рис. 4.25. Турбогенератор ТД-600:

1 — фундаментная рама; 2 — подвод пара к уплотнениям; 3, 4 — насосы; 5 — трубопровод слива масла; 6, 15 — подвод масла; 7 — колесо масляного насоса; 8 — приборы контроля просадки ротора; 9 — термометр; 10 — приборный щит; 11 — привод сопловых клапанов; 12 — сопловая коробка; 13 — муфта; 14 — редуктор; 16 — отвод пара

Турбины современных утилизационных генераторов, входящих в состав дизельных СЭУ с глубокой утилизацией тепла, имеют конструкцию, сходную с рассмотренной выше. Для их работы используется

насыщенный или слабоперегретый пар с давлением 0,5—1,2 МПа и температурой 180—210 °С. Мощность, развиваемая утилизационными турбогенераторами, равна 250—1 000 кВт, частота вращения их роторов составляет 6 000—10 000 об/мин.

В настоящее время паротурбинные приводы вспомогательных механизмов, подобные рассмотренным выше, на вновь построенных судах не используются.

#### 4.6. РАЗВИТИЕ СХЕМ КОНДЕНСАТНО-ПИТАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПАРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В ранних паровых двигателях, созданных в начале XVIII в., разделение рабочего цилиндра и конденсатора не предусматривалось. Первым, кто догадался разобщить их, был Джеймс Уатт. В 1776 г. он пытался применить в одной из своих машин поверхностный конденсатор, в котором отработавший пар охлаждался водой, протекавшей по трубам. Однако уровень развития техники в то время не позволял изготавливать надежные трубчатые теплообменники.

Первыми на судах в начале XIX в. появились конденсационные установки *смесительного типа*, рис. 4.26а. Действовали они следующим образом. Отработавший в машине пар поступал в конденсатор 1, в котором охлаждался и конденсировался, смешиваясь с забортной водой. Образовавшаяся смесь откачивалась мокровоздушным насосом 3, при этом ее часть питательным насосом 4 направлялась в котлы, а остальная — удалялась за борт.

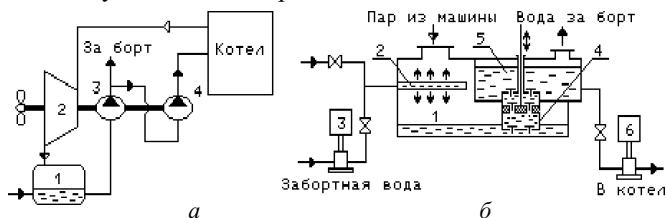


Рис. 4.26. Смесительная конденсационная установка

Один из вариантов конструкции смесительного конденсатора показан на рис. 4.26б. Пар шел в конденсационную камеру 1, где смешивался с охлаждающей забортной водой, подаваемой насосом 3 или самотеком через трубу 2. Образующаяся смесь конденсата и забортной воды вместе с паром и воздухом откачивалась мокровоздушным насосом 4 в цистерну 5. Питал котел насос 6.

Забортная вода, смешиваясь с конденсатом, подсаживала его и являлась причиной интенсивного загрязнения котлов. Отложения в них накипи вызывали ухудшение теплообмена, приводили к снижению паропроизводительности и влекли за собой увеличение расхода топлива. Нарушение теплообмена между поверхностью металла и котловой водой сопровождалось перегревом элементов поверхности нагрева и снижением надежности котла.

Накипь удаляли ручной чисткой внутренних полостей и труб. Чистку котлов требовалось производить через каждые трое-четыре суток. Она сопровождалась большими трудозатратами и снижением скорости движения судна, так как часть котлов приходилось выводить из действия и вскрывать.

Засоление котловой воды способствовало ее вскипанию и попаданию влаги в паросборное устройство. Последнее могло вызвать гидравлические удары в паропроводах и цилиндрах машин и являлось одной из причин выхода их из строя. Высокая соленость котловой воды, кроме того, способствовала интенсивной коррозии металла ЭУ. Контролировали солесодержание котловой воды путем измерения ее плотности при помощи ареометра со шкалой от 1,0 до 1,03 г/см<sup>3</sup>. Величина солесодержания, соответствующая измеренной плотности, определялась при помощи специальной таблицы. Его регулировали путем продувания, в ходе которого часть кипящей воды из котла удалялась за борт. При этом безвозвратно терялось значительное (доходящее до 10 %) количество тепла, выделявшегося при горении топлива, вызывая снижение экономичности ЭУ.

Конденсационные установки смесительного типа перестали использоваться на морских судах после 60-х гг. XIX в. Более успешно они применялись на речных судах, где в отдельных случаях сохранялись вплоть до 50-х гг. XX в.

Появление на судах *поверхностных* конденсаторов, в которых пар и забортная вода не соприкасались, относится к началу 1830-х гг. Первое такое устройство запатентовал Самюэль Холл в 1831 г. Подобным конденсатором был оборудован пароход «Сириус», впервые в 1838 г. пересекший Атлантический океан с непрерывно работающей паровой машиной. Первые поверхностные теплообменники работали ненадежно, поэтому от них вскоре отказались. Широкое изготовление и использование трубчатых конденсаторов началось с 1860-х гг. В этот период было освоено производство цельнотянутых труб, пригодных для сборки их поверхности.

В ранних поверхностных конденсаторах охлаждающая забортная вода омывала трубки снаружи, а отработавший пар двигался внутри них. К концу 70-х гг. XIX в. забортная вода и пар поменялись местами, после чего конденсаторы приобрели вид, аналогичный современным.

Конденсационная установка с поверхностным трубчатым однопроточным конденсатором показана на рис. 4.27. Отработавший пар из машины или турбины поступал в теплообменник 1, где он охлаждался в межтрубном пространстве и конденсировался. Внутри труб двигалась забортная вода, подаваемая от кингстона насосом 2. Образовавшийся конденсат стекал в сборник, располагавшийся в нижней части устройства. При помощи конденсатного насоса 4 он откачивался в цистерну 5, из которой питательным насосом направлялся в котел. Воздух удалялся при помощи воздушного насоса 3. Так как удельный объем конденсата был во много раз меньше объема пара, из которого он образовывался, то в ходе конденсации при непрерывном удалении воздуха в конденсаторе создавался вакуум.

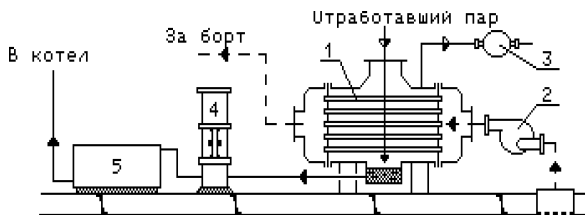


Рис. 4.27. Поверхностная конденсационная установка

*Однопроточные* конденсаторы перестали широко использоваться на судах после 1930-х гг. С этого времени они стали выполняться *двухпроточными*. Водяная камера такого аппарата разделялась перегородкой. Забортная вода из нижнего патрубка направлялась по нижнему пучку труб во вторую водяную камеру, а затем — по верхнему пучку труб она шла обратным потоком за борт. Реже конденсаторы строились трех- и четырехпроточными. Они имели меньшую длину.

В большинстве двухпроточных конденсаторов трубки располагались в виде двух симметричных групп, поэтому они получили название *сдвоенных*. В некоторых конструкциях сдвоенных конденсаторов каждая группа трубок оборудовалась индивидуальным подводом и отводом забортной воды и удалением воздуха. Эти теплообменники могли действовать непрерывно, так как во время их работы можно было производить вскрытие, ремонт или очистку любой группы труб.

При традиционном коридорном или шахматном расположении труб в аппарате, конденсат, стекавший с верхних труб, обволакивал лежащие ниже ряды труб и существенно ухудшал теплопередачу. Уменьшение смачивания трубок достигли их расположением по системе Жинаба, отличающимся от обычного тем, что трубки каждого ряда находились не в горизонтальной плоскости, а были наклонены к ней на 10—15°. При таком расположении трубок только около 25 % их поверхности обволакивалось конденсатом, остальная поверхность оставалась свободной. Наряду с расположением Жинаба, широко стало применяться веерное расположение труб, при котором пар протекал между ними по радиусам, сходящимся в общем центре. Сечение для прохода пара постепенно уменьшалось, что способствовало сохранению требуемой скорости его движения. Веерное расположение было менее эффективным: оно обеспечивало обволакивание конденсатом 35—50 % поверхности [18, 43].

На судах с поршневыми машинами широко применялись цилиндрические конденсаторы. Эта форма корпуса оказалась удобной для изготовления, но неудачной с точки зрения организации процесса теплообмена: в них нерационально использовались нижние ряды труб и наблюдалось значительное переохлаждение конденсата. Последнее приводило к снижению КПД ЭУ и усилению коррозионной активности конденсата из-за увеличения содержания в нем воздуха.

Для предотвращения переохлаждения конденсата в 20-х гг. XX в. были предложены регенеративные конденсаторы, в которых часть отработавшего пара соприкасалась с конденсатом, стекавшим с нижних трубок, чем обеспечивала его подогрев.

Корпуса конденсаторов в конце XIX — начале XX вв. выполнялись клепаными, изнутри их поверхность лудилась или оцинковывалась. Позже их начали изготавливать из сваренных между собой листов мягкой углеродистой стали. Для защиты от коррозии на внутренние поверхности корпусов стали наносить специальные покрытия. Конструкция клепаного конденсатора паротурбинного судна со снятыми водяными камерами показана на рис. 4.28.

Крышки и водяные камеры конденсаторов отливались из чугуна. В старых конструкциях их часто выполняли литьем из бронзы или стали, а также склепывали из медных листов. Для предотвращения коррозии поверхности крышек и камер вначале покрывали специальной краской, позднее стали применять вулканизацию камер. Внутри камер располагали цинковые защитные протекторы. Трубные доски



изготавливали из морской латуни или минц-металла. Их толщина составляла 20—30 мм. Уплотнялись места соединения трубной доски и фланца корпуса парусиной с суриком, паронитом или асбошнуром.

Трубки конденсаторов выполнялись цельнотянутыми. В старых моделях их изготавливали из латуни, поверхность трубок для защиты от коррозии лудилась. Впоследствии в качестве материалов для трубок стали использовать медно-никелевые сплавы, мельхиор, алюминиевую латунь или монель-металл.

Крепление трубок в трубных досках должно обеспечивать полную водонепроницаемость соединения. До начала 1930-х гг. его основным способом являлось подвижное соединение с сальником из хлопчатобумажной набивки. Набивка выполнялась в виде шнура, пропитанного маслом, салом или парафином. Для обеспечения

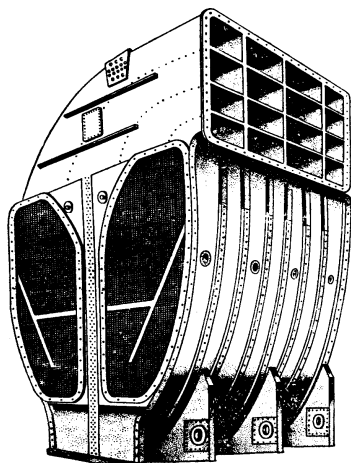


Рис. 4.28. Клепанный конденсатор

надежности соединения под нее устанавливали свинцовые кольца. Уплотнение набивки производилось при помощи нарезной сальниковой втулки, вворачиваемой в отверстие, выполненное в трубной доске.

Недостатком хлопчатобумажной набивки являлось то, что при ее перегреве пропитка плавилась и вытекала, приводя к разгерметизации конденсатора. Поэтому при высокой температуре пара вместо хлопчатобумажного шнура стали устанавливать фибровые кольца. Недостатком нарезных сальниковых втулок была возможность их самопроизвольного выкручивания при сотрясениях, возможность повреждения резьбы, склонность к эрозионному разрушению концов трубки.

На судах более поздней постройки (30—40-х гг. XX в.) были распространены металлические уплотнения трубок. В качестве материалов для изготовления их колец использовались морская латунь и пресованная свинцовая фольга. Кроме них дополнительно устанавливались кольца из фибры, которая разбухала в воде, придавая соединению дополнительную плотность. Главным недостатком подобных уплотнений являлись дороговизна их изготовления и сложность технического обслуживания в процессе эксплуатации конденсатора.

В 1950—1960-х гг. наибольшее распространение получило крепление трубок при помощи вальцовки. Оно выполнялось как в одной, так и в обеих трубных досках. Развальцовка одного конца обычно производилась со стороны входа забортной воды, второй конец трубки уплотнялся при помощи металлических колец. В случае вальцовки обоих концов трубки, возможность ее теплового удлинения обеспечивалась подвижностью одной из трубных досок относительно корпуса или изгибом трубки. Современные судовые конденсаторы выполняются с двухсторонней вальцовкой трубок без изгиба и при неподвижных трубных досках. Практика показала, что нарушения плотности трубок при нагревании не происходит, так как вальцовочное соединение может выдерживать значительные нагрузки. Иногда для увеличения его плотности в отверстиях трубной доски протачивается несколько кольцевых канавок. В процессе развальцовки канавки заполняются материалом трубки, что повышает надежность соединения.

На протяжении XIX в. и в первой трети XX в. в ЭУ с поршневыми машинами использовалось *одновременное* удаление из конденсатора образующегося конденсата и воздуха. Для этой цели применялся специальный насос, получивший название *мокроевоздушного*. Обычно он приводился в действие от главной паровой машины через балансир.

Мокроевоздушный насос, использовавшийся в 1920—1940-х гг., показан на рис. 4.29. Он устанавливался ниже конденсатора. В его чугунном корпусе 1 шпильками 7 крепились вставная бронзовая втулка 2 и клапанная доска 4 с пластинчатыми клапанами 5. Внизу втулки располагались приемные окна 3. Через них вода поступала внутрь втулки. Поршень-вытеснитель 6 соединялся со штоком 8 при помощи болта 9 и пальца 10. Конденсат через патрубок 12 самотеком заполнял полость над поршнем при его нахождении в нижнем положении.

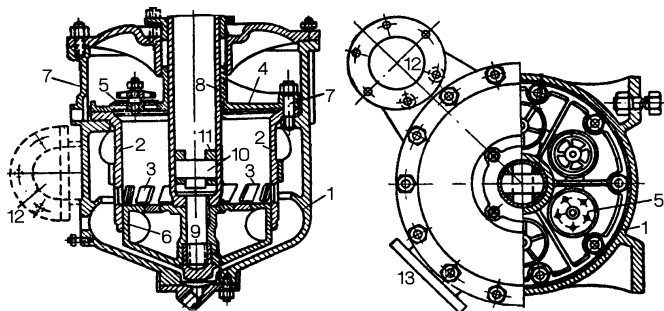


Рис. 4.29. Мокроевоздушный насос

При движении поршня вниз в верхней полости насоса создавалось разрежение. После открытия приемных окон в нее вначале поступал воздух, а затем конденсат. При движении поршня вверх окна 3 закрывались, находящиеся в полости втулки конденсат и воздух поступали через клапаны 5 в нагнетательную камеру. Из нее воздух выходил в атмосферу, а конденсат через патрубок 13 удалялся в теплый ящик.

Использование мокровоздушного насоса не позволяло получить глубокий вакуум (более 83—85 %). Это обстоятельство стало препятствием для дальнейшего увеличения экономичности пароэнергетических установок. Выход был найден в виде применения *раздельного* удаления воздуха и конденсата при помощи различных устройств: эжектора и конденсатного насоса.

Эжектор служил для удаления воздуха, поршневой или центробежный конденсатный насос использовался для откачки конденсата. На рис. 4.30 показана схема работы эжектора. Рабочий пар подводился к расширяющемуся соплу 1 и через него поступал во всасывающую камеру 3. При прохождении сопла скорость пара значительно увеличивалась, при этом в камере 3 создавалось разрежение, благодаря

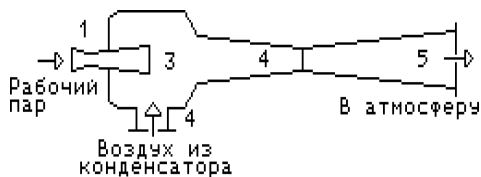


Рис. 4.30. Эжектор

которому воздух из полости конденсатора через патрубок 4 поступал в камеру 3, откуда он вместе с паром направлялся в диффузор 2. В диффузоре за счет торможения смеси давление увеличивалось выше атмосферного и воздух удалялся в атмосферу через патрубок 5.

При помощи одноступенчатого эжектора не удавалось достичь вакуума в конденсаторе выше 86 %. Глубокий вакуум получали при последовательном соединении двух или трех эжекторов. Такие эжекторы, получившие название двух- или трехступенчатых, стали использоваться с конца XIX в.

Переход на использование в СЭУ пара высоких параметров потребовал значительного усложнения их тепловых схем. Кислород, попавший в питательную воду котлов из атмосферы, при давлении пара в котлах выше 2 МПа вызывал интенсивную коррозию котельного металла. Это явилось причиной перехода от *открытых* систем питания, связанных с атмосферой, к *закрытым*, в которых питательная вода не соприкасалась с атмосферным воздухом.

Различные схемы систем питания судовых котлов показаны на рис. 4.31. Наиболее простое устройство имеет открытая система, пришедшая в 60-х гг. XIX в. на смену смесительным конденсаторам. Системы этого типа, рис. 4.31а, используются в большинстве котельных установок низкого давления транспортных и рыбопромысловых судов и в настоящее время. Основой такой системы питания служит так называемый «теплый ящик» — цистерна, являющаяся сборником конденсата, устройством для его очистки и подогрева, удаления растворенных газов, пополнения утечек конденсата. Теплый ящик (ТЯ) связан с атмосферой. Температура воды в нем не должна опускаться ниже 50 °С. Это позволяет уменьшить количество растворенного в воде кислорода и замедлить интенсивность коррозии котельного металла.

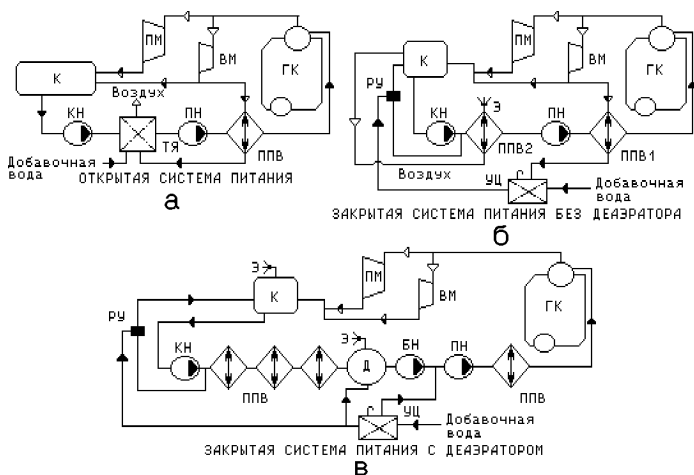


Рис. 4.31. Типы систем питания

Закрытая система питания имеет более сложную конструкцию. В ней питательная вода не соприкасается с атмосферой и поэтому не насыщается кислородом воздуха. Попадание воздуха возможно только через неплотности системы и с добавочной водой. Конструктивно различаются системы закрытого питания *без деаэратора*, показанная на рис. 4.31б, и *с деаэратором*, рис. 4.31в. Последний используется в установках с рабочим давлением пара, превышающем 4 МПа.

В системе без деаэратора конденсатный насос *КН* подает воду непосредственно к питательному насосу *ПН*, обеспечивающему поддержание требуемого уровня воды в главном котле *ГК*. Если количество образующегося конденсата превышает потребность, его излишек,

контролируемый регулятором уровня *PV*, направляется обратно в конденсатор *K*. Вакуум поддерживается при помощи двух- или трехступенчатого парового эжектора *Э*. При превышении уровня излишек конденсата удаляется в уравнительную цистерну *УЦ*. Подогреватель питательной воды *ППВ* обеспечивает необходимую температуру питательной воды перед подачей ее в главный котел *ГК*. Недостатком подобных систем является неполное удаление воздуха из воды.

Глубокое обескислороживание питательной воды достигается в системах с деаэратором. В деаэраторе сочетаются функции отделителя воздуха и подогревателя воды. Их применение в судовых условиях началось в 1930-х гг. Конденсатный насос *КН* подает воду в деаэратор *Д*. Удаление выделяющегося воздуха производится эжектором *Э*. В судовых условиях использовались два типа термических деаэраторов, действие которых основано на том, что кипящая вода не содержит растворенных газов: вакуумные и избыточного давления.

В *вакуумном* удалении воздуха осуществлялось при давлении ниже атмосферного, в аппаратах избыточного давления — выше атмосферного (0,12—0,2 МПа). На рис. 4.32 показана схема работы деаэратора избыточного давления. Конденсат 4 поступает к распределительному устройству 2. Струи воды нагреваются за счет тепла пара 1, подаваемого к распыливающему диску 5. Пар разбрызгивает воду, нагревая ее до кипения. Выделяющийся воздух удаляется из верхней части аппарата 3, конденсат стекает в сборник 6, откуда забирается бустерным насосом *БН* и поступает на всасывание питательного насоса *ПН*. Бустерный насос предназначен для поддержания постоянного подпора на всасывании питательного. Этим предотвращается вскипание воды.

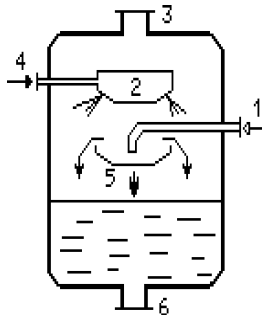


Рис. 4.32. Деаэратор

В 1960-х гг. наблюдалась тенденция к отказу от применения деаэраторов даже в установках высокого давления. При этом функции деаэратора передавались конденсатору пара.

*Подогреватели питательной воды* используют тепло отработавшего пара вспомогательных механизмов или пара, отбираемого от главной турбины. Его давление составляет 0,15—0,3 МПа, температура равна 111—127 °С. За счет утилизации этого тепла питательная вода может быть подогрета до температуры 100—120 °С. Различают два типа подогревателей: смесительные и поверхностные.

Смесительные подогреватели использовались на судах с 70-х гг. XIX в. до 50-х гг. XX в. Схема такого устройства показана на рис. 4.33. Нагрев воды в нем происходил за счет ее смешивания с отработавшим паром. Подогреватель устанавливался перед питательным насосом. При недостаточной высоте расположения этого аппарата над насосом, в последнем могли происходить гидравлические удары, вызванные образованием пара в цилиндре при всасывающем ходе поршня. Питательная вода от конденсатного или мокровоздушного насоса поступала в корпус аппарата через распыливающий клапан 1 и перегородку с отверстиями 2. Проходя через отверстия в перегородке, вода смешивалась с паром и нагревалась. Смесь воды с конденсатом стекала вниз и через патрубок 4 поступала на всасывание питательного насоса. При изменении уровня воды в сборнике поплавков 5 через рычаг 6 изменял открытие клапана 7, регулировавшего количество пара, поступающего к питательному насосу с паровым приводом.

Снижение давления воды при ее одновременном подогреве способствовало выделению растворенного воздуха, который собирался в полости 8 и отводился в атмосферу.

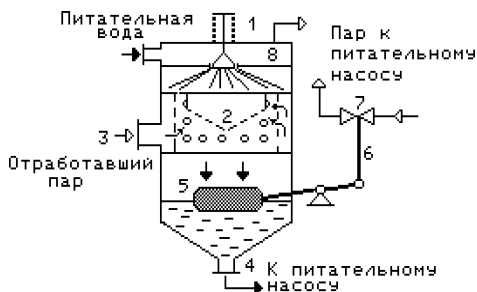


Рис. 4.33. Принцип действия смесительного деаэраатора

Как видно, смесительный подогреватель питательной воды одновременно играл роль деаэраатора. В настоящее время на судах преимущественно используются поверхностные подогреватели питательной воды. Они представляют собой кожухотрубные теплообменники со змеевиковыми, прямыми или U-образными трубами, выполненными из латуни. Нагреваемая вода движется внутри труб, пар омывает их снаружи. Старые подогреватели имели клепаный стальной или медный корпус, современные аппараты выполняются сварными из стали.

## ГЛАВА 5. ПЕРВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

*Причины появления двигателей внутреннего сгорания (ДВС). «Пороховые» двигатели Готфрейля, Гюйгенса, Папена. Поиски топлива, пригодного для работы ДВС. Газовые двигатели. Осуществление предварительного сжатия рабочей смеси. Появление четырехтактного цикла. Первые двигатели на жидком топливе. Карбюраторы и испарители керосина. Особенности устройства первых маломощных судовых ДВС. Калоризаторные двигатели и их разновидности. Опыты Р. Дизеля по созданию ДВС с воспламенением от сжатия. Начало постройки дизелей. Создание первого отечественного дизеля.*

### 5.1. ПОЯВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

К середине XIX в. развитие паровых поршневых машин создало предпосылки к формированию конструктивных черт второго типа теплового двигателя — *внутреннего сгорания (ДВС)*.

Появление ДВС стало ответом на стремление владельцев небольших промышленных и кустарных предприятий получить в свое распоряжение легкую и экономичную ЭУ, не требующую применения громоздкого и взрывоопасного парового котла. Такие предприятия, как правило, не имели непрерывного производственного цикла, почему устанавливать на них мощные крупногабаритные паровые машины, обладающие большим временем запуска, было экономически неэффективно. Поэтому первые по-настоящему работоспособные ДВС, появившиеся в 1850-х гг., были разработаны как установки стационарного назначения. В печати тех лет их называли «спасителями ремесла».

Использование в тепловых машинах *газообразного* рабочего тела взамен водяного пара впервые нашло теоретическое обоснование в знаменитой работе С. Карно «Размышление о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу». В ней Карно утверждал, что «воздух представляется более предпочтительным, чем пар, для использования движущей силы падения теплоты при высоких градусах...». Тем самым он обратил внимание на то, что срабатываемый в цилиндре перепад температур газа значительно больше, чем водяного пара, а значит — экономичность «газового» двигателя должна быть более высокой, чем парового.

Прообразами ДВС считаются «атмосферные двигатели» Жана Готфейля и Христиана Гюйгенса, созданные в начале 80-х гг. XVII в. В их конструкциях, так же как и в паровых машинах, использовалось сочетание «поршень-цилиндр». В качестве рабочей среды применялись газы, получаемые в результате сгорания *твердого порошкообразного топлива* — пороха. Газы поднимали поршень, который, опускаясь под действием атмосферного давления, производил полезную работу. Для опускания поршня под ним следовало создать разрежение. В двигателе Гюйгенса оно обеспечивалось за счет охлаждения газов, то есть он работал так же, как и пароатмосферная машина.

Немного иначе действовал двигатель Готфейля. В нем разрежение в цилиндре использовалось для всасывания в него воды, которая затем вытеснялась опускавшимся поршнем. В 1688 г. подобную установку построил физик Д. Папен.

Совершенство конструкции этих машин хорошо иллюстрируется тем фактом, что Гюйгенс, пытаясь уменьшить зазор между поршнем и цилиндром для предотвращения прорыва пороховых газов, покрывал стенки последнего слоем гипса. Существенные недостатки подобных «двигателей», среди которых главными были низкая надежность и быстроедействие, не позволяли рассматривать их в качестве конкурентов даже несовершенных пароатмосферных машин.

Более чем через сто лет после опытов Готфейля, Гюйгенса и Папена несколько попыток применить в тепловых двигателях порошкообразное топливо предприняли жившие во Франции братья Ньепсы. Они последовательно использовали в своих разработках легковоспламеняющиеся семена плауна, мелкоразмолотый уголь в смеси со смолой и измельченный природный асфальт.

Ньепсы одними из первых предлагали использовать ДВС в качестве судового двигателя и даже попытались построить с ними несколько небольших судов. Не получив удовлетворительных результатов, они отказались от применения твердого топлива, и в 1816 г. обратились к идее использовать для этой цели сырую нефть. К концу 1816 г. братья создали опытное судно, снабженное нефтяным двигателем [55].

Проблемы, связанные с организацией сжигания в цилиндрах двигателей порошкообразного топлива, а также отсутствие недорогого, доступного и удобного сырья для его получения, подтолкнули изобретателей к использованию газообразного и жидкого горючего. Главные задачи, которые следовало решить для создания машин, способных работать на них, заключались в разработке методов:



- подачи топлива в рабочий цилиндр;
- образования топливоздушнoй смеси;
- воспламенения готовой рабочей смеси.

Первыми реально работавшими стали *газовые* ДВС, то есть использовавшие *газообразное топливо*. В качестве рабочего тела в них применялась смесь воздуха и светильного газа. Светильный газ являлся продуктом сухой перегонки твердого органического топлива (угля или дров), нагревавшихся в закрытом сосуде без доступа воздуха.

Впервые светильный газ получил француз Филипп Лебон. В 1799 г. он запатентовал способ его производства. В 1801 г. Лебону выдали патент на двигатель, в котором должно было вначале осуществляться раздельное сжатие газа и воздуха, затем их смешивание, наполнение цилиндра газозоудшной смесью и сгорание. Эта установка не была построена [55].

Действующий атмосферный двигатель, работавший на светильном газе, в 1823 г. в Англии создал Сэмюэль Браун. Поршень в цилиндре его машины поднимался за счет давления сгоравшей газозоудшной смеси, а опускался под действием атмосферного давления. Разрежение под поршнем создавалось за счет охлаждения оставшихся после выпуска из цилиндра продуктов сгорания. Воспламенение газозоудшной смеси производилось при помощи открытого пламени. В двигателе Брауна впервые предусматривалось водяное охлаждение [55].

Первые газовые ДВС работали без предварительного сжатия рабочей смеси. Теоретически необходимость такого сжатия была обоснована еще в 1824 г. в упомянутой ранее работе С. Карно. На практике впервые предварительное сжатие газа и воздуха вне рабочего цилиндра и дополнительное повышение давления горячей смеси уже в его полости в 1838 г. пытался осуществить англичанин В. Барнет. Непосредственное сжатие горячей смеси в рабочем цилиндре спустя два десятилетия, в 1858 г., впервые реализовал француз Дегеран.

В 1842 г. был построен газовый двигатель англичанина Дрейка. Всасывание смеси в его цилиндр протекало на протяжении первой половины хода поршня. Она воспламенялась от раскаленной чугуной запальной трубки, сообщавшейся с полостью цилиндра в середине хода поршня. Двигатель Дрейка мог работать как на газообразном, так и на жидком топливе (керосине). Во время испытаний, проведенных в 1847 г., он развивал мощность до 14,7 кВт при частоте вращения выходного вала 60 об/мин.

Воспламенение рабочей смеси из светильного газа и воздуха при помощи электрической искры впервые в 1854 г. осуществили Барзан-ти и Матеукки. Впускные и выпускные клапаны их машины приводились в действие от распределительного вала. Она так же являлась атмосферной: давление продуктов сгорания использовалось в ней для поднятия поршня. Последний, опускаясь под действием атмосферного давления, через рейку, соединенную со штоком, приводил во вращение вал с маховиком. Этот двигатель был построен, но практического применения не нашел [55].

В 1860 г. патент на двигатель, работающий на светильном газе, получил французский изобретатель Этьен Лемуар. Двигатель Лемуара был двойного действия и по устройству напоминал паровую машину, рис. 5.1. Его цилиндр имел два плоских золотника. Верхний служил для выпуска отработавших продуктов сгорания, нижний — обеспечивал раздельное поступление в цилиндр воздуха и газа, смешивавшихся непосредственно в камере сгорания.

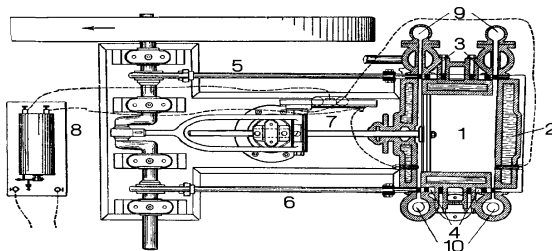


Рис. 5.1. Газовый двигатель Лемуара:

1 — рабочий цилиндр; 2 — полость охлаждения; 3, 4 — золотники газораспределения; 5, 6 — золотниковые тяги; 7 — шток поршня; 8 — катушка зажигания; 9, 10 — каналы для подвода светильного газа и отвода сгорания

Смесь поступала в цилиндр в течение половины хода поршня, после чего впускной золотник перекрывал впускное окно. Затем смесь воспламенялась электрической искрой. Машина охлаждалась водой.

В ходе ее испытаний обнаружили недостатки в работе устройств, охлаждавших и смазывавших цилиндр. Работоспособной оказалась только третья модель, развивавшая мощность 0,4 кВт при частоте вращения вала 140 об/мин. Диаметр ее цилиндра составлял 120 мм, ход поршня — 100 мм [55]. Средняя скорость последнего была равна всего 0,47 м/с, а величина среднего эффективного давления не превышала 0,076 МПа.

Сведения о появлении нового двигателя вызвали массу откликов в печати, которая стала пророчить паровой машине скорую кончину.

Двигатели Ленуара начали производить серийно, однако вскоре выяснилось, что возлагаемых на них ожиданий они не оправдали, так как при низкой надежности оказались крайне неэкономичными (их КПД составлял всего 3,3 %, заметно уступая паровым машинам того времени, у которых его величина была равна 8—10 %).

Наиболее слабым узлом этой машины оказался выпускной золотник, коробившийся и заклинивавший при перегреве, вызывавший ее остановку. Над усовершенствованием своего детища изобретатель не работал и, хотя двигатель получил первое место на Всемирной Парижской выставке 1864 г., он вскоре был вытеснен с рынка конкурирующими конструкциями. В общей сложности, на рынок было выпущено более пяти тысяч двигателей Ленуара, нашедших применение в мелких мастерских [39].

В 1867 г. немецкие предприниматель Николаус Август Отто и инженер Эйген Ланген продемонстрировали новый газовый двигатель. Он имел вертикальный цилиндр 1 с размещенным внутри него массивным поршнем 2, соединенным с зубчатой рейкой 3, приводившей во вращение вал отбора мощности 4, рис. 5.2. При работе поршень поднимался рейкой на 1/7—1/10 хода. В результате этого в цилиндре возникало разрежение и он заполнялся рабочей смесью. Она воспламенялась открытым пламенем через запальную трубку. В ходе горения давление в цилиндре увеличивалось, поршень быстро поднимался, затем при помощи специального механизма, состоявшего из обгонной муфты 5 и зубчатого колеса 6, отсоединялся от вала и продолжал двигаться вверх по инерции до тех пор, пока под ним не возникало разрежение. Рабочий ход поршня вниз совершался под действием атмосферного давления. После того, как давление в цилиндре возрастало до атмосферного, открывался выпускной клапан 7 и газы уходили в атмосферу под действием выталкивающего хода опускающегося поршня.

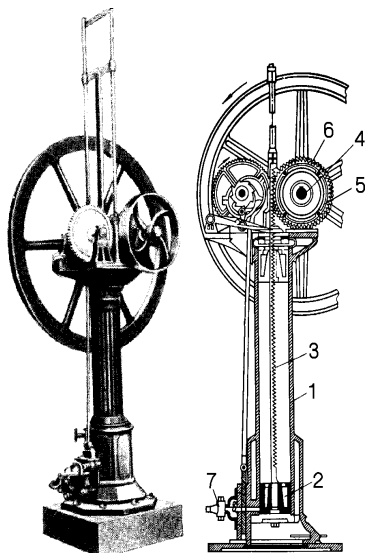


Рис. 5.2. Двигатель Отто и Лангена

Как видно, двигатель Отто и Лангена представлял собой все тот же атмосферный двигатель, который предлагался еще в конце XVII в. Однако вместо охлаждения отработавших газов, в нем происходило их расширение за счет восходящего движения поршня. Степень расширения рабочего тела была значительно больше, чем в машине Лемуара, вследствие чего КПД этой установки был гораздо выше и достигал 15 %. Удельный расход газа в ней составлял  $1,08 \text{ м}^3/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ . Двигатели этой модели пользовались хорошим спросом, всего их было построено более девяти тысяч штук [39]. Их главными недостатками были большая высота и сильный шум при работе.

Последующие работы Отто и Лангена над усовершенствованием их машины были направлены на осуществление предварительного сжатия рабочей смеси, поступившей в цилиндр, а также на совершенствование конструкции ее отдельных элементов. В результате многолетних опытов к 1878 г. они создали новый двигатель, в котором впервые реализовали так называемый *четырёхтактный цикл*, впоследствии получивший название «цикла Отто».

Новая машина, рис. 5.3, существенно отличалась от предыдущей. Она имела кривошипно-шатунный механизм и два клапана, размещенные в крышке цилиндра. Впускной клапан был автоматическим, выпускной, выполненный в виде вращающегося золотника, имел привод. Регулирование мощности осуществлялось пропусками вспышек в цилиндре. Предварительное сжатие рабочей смеси позволило получить эффективный КПД установки 22 % [39].

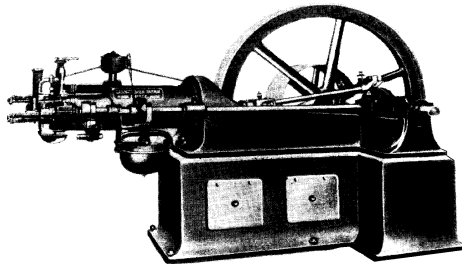


Рис. 5.3. Четырёхтактный двигатель Отто и Лангена

Идея четырехтактного цикла не принадлежала Отто. Впервые ее высказал французский инженер Бо де Роша, который еще в 1862 г. издал брошюру под названием «Новейшие исследования относительно практических условий применения теплоты». Однако патента Бо де Роша не получил и свой двигатель строить не стал.

Двигатели Отто стали выпускать многие фирмы. В 1889 г. их цилиндровая мощность доходила до 70—75 кВт. Некоторые модели в конце XIX в. развивали в четырехцилиндровом исполнении 700 кВт. В 1900 г. в Париже демонстрировался уникальный одноцилиндровый агрегат мощностью 515 кВт при частоте вращения 80 об/мин [55]. Диаметр его цилиндра составлял 1 300, ход поршня был равен 1 400 мм, среднее эффективное давление достигало величины 0,416 МПа. Такие крупные машины использовались для привода доменных воздуходувок. Они работали на отходящем доменном газе.

В 1885 г. русский конструктор Б. Г. Луцкой сконструировал и изготовил вертикальный газовый одноцилиндровый двигатель, работавший, как и двигатель Отто, по четырехтактному циклу. Позже, стремясь к повышению мощности, Луцкой приступил к созданию многоцилиндровых машин. В 1900—1901 гг. он построил шестицилиндровый агрегат мощностью 220,8 кВт [61].

Главным недостатком двигателей Отто были неудобства, связанные с использованием газообразного топлива. Для их применения нужно было иметь поблизости газовый завод или транспортировать большое количество взрывоопасного горючего газа. Поэтому одним из направлений повышения экономичности ДВС и совершенствования их конструкции стало отыскание способов сжигания *жидкого топлива*, более удобного в обращении и имевшего более высокую теплоту сгорания, чем газ.

Первым двигателем, работавшим на жидком топливе, стала машина англичанина Роберта Стрита, патент на которую он получил в 1794 г. В качестве топлива в ней использовался спирт. Образование спиртовоздушной рабочей смеси происходило непосредственно в рабочем цилиндре. Спирт поступал на его горячее днище, испарялся и смешивался с воздухом, затем получившаяся горячая смесь воспламенялась. Продукты сгорания, расширяясь, поднимали поршень и производили работу.

Еще одна ранняя попытка применения в ДВС жидкого топлива (сырой нефти) зафиксирована патентом, полученным в 1807 г. братьями Ньепсами. Как указывалось, в 1816 г. они предприняли попытку построить судно, оснащенное нефтяным двигателем.

Двигатели, работающие на жидком топливе, смогли составить реальную конкуренцию газовым машинам только к 1870-м гг., когда в широких масштабах началось производство хорошо испаряющихся и сгорающих легких продуктов перегонки сырой нефти: бензина

и керосина. Первый отечественный керосин в 1823 г. получили на своем заводе в Моздоке русские предприниматели братья Дубинины. Это топливо, получившее название «фотоген», использовалось для освещения [39]. После появления ДВС, работающих на жидком топливе, производство для них вначале керосина, а позже бензина, — стало приносить владельцам нефтеперегонных заводов хорошие прибыли.

Двигатель, работающий на парах керосина, в 1873 г. построил американец Брайтон. Сгоравшая в его цилиндре смесь керосина с воздухом приготавливалась в специальном устройстве — карбюраторе. В 1884 г. в Германии Юлиус Готлиб Даймлер и Вильгельм Майбах сконструировали бензиновый двигатель, в котором рабочая смесь воспламенялась от полой открытой трубочки. Он развивал мощность 0,35 кВт при частоте вращения 900 об/мин. Этот двигатель с объемом цилиндра 0,25 дм<sup>3</sup> стал прототипом легких транспортных ЭУ.

## 5.2. КАРБЮРАТОРНЫЕ И КАЛОРИЗАТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

В первых бензиновых и керосиновых двигателях топливовоздушная смесь приготавливалась в *испарительных* карбюраторах. Для получения смеси в них использовались фитили, взбалтывание, испарение топлива теплом отработавших газов и охлаждающей воды, отходящих от двигателя. Схема работы такого карбюратора (называемого также испарителем керосина) показана на рис. 5.4а, а его конструкция приведена на рис. 5.4б.

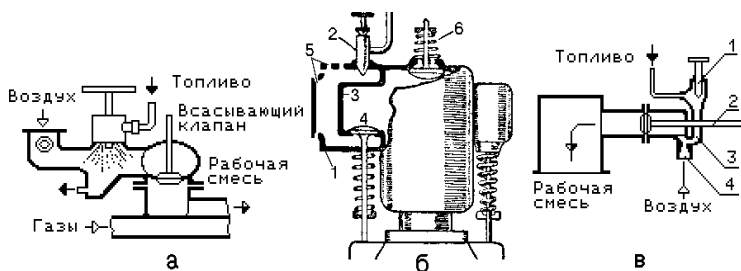


Рис. 5.4. Испарительный и пульверизационный карбюраторы

Карбюратор образовывала камера 1, отлитая совместно с клапанной коробкой рабочего цилиндра двигателя. Керосин поступал в нее через игольчатый клапан 2 и, попадая на нагретую неохлаждаемую стенку 3 коробки впускного клапана 4, испарялся. Образовавшиеся

пары смешивались с воздухом, проходившим через отверстия 5, а затем направлялись в цилиндр через всасывающий клапан 4.

Для того, чтобы не вызывать чрезмерного охлаждения испарительной камеры, отверстия 5 выполнялись небольшого диаметра, поэтому керосиновоздушная смесь получалась переобогащенной. Она разбавлялась воздухом во время каждого всасывающего хода рабочего поршня при помощи автоматического клапана 6, располагавшегося в цилиндрической крышке.

Кроме рассмотренной конструкции испарителя, установленного непосредственно на двигателе, в период 1900—1920 гг. находили применение подобные устройства, выполненные отдельно. Они предназначались для достаточно мощных судовых ЭУ (до 200 кВт и выше).

В 1890-х гг. появились *пульверизационные* (распыливающие) карбюраторы, в которых топливо испарялось в процессе разбрызгивания при истечении через малое отверстие в разреженное пространство. Создателями первых пульверизационных карбюраторов являются венгерский инженер Д. Банки и В. Майбах.

На рис. 5.4в показана схема подобного карбюратора, предложенного в 1894 г. Г. Потворским [61]. Автор назвал его «прибором для подачи керосина всасыванием движущегося в суженном канале воздуха». При поступлении воздуха в рабочий цилиндр, в карбюраторе над уровнем керосина образовывалось разрежение. Благодаря этому он переливался по каналу 3 в канал 4, здесь захватывался струей движущегося воздуха, действовавшей как пульверизатор. Образовавшаяся топливовоздушная смесь шла через впускной клапан 2 в цилиндр двигателя. Регулировали подачу керосина клапаном 1. В 1896 г. конструкция подобных карбюраторов была дополнена дроссельной заслонкой, предложенной Э. Липгартом.

В начале XX в. в мало мощных судовых двигателях успешно применялся карбюратор Шеблера, рис. 5.5. Он работал следующим образом. Из поплавковой камеры 1 топливо поступало в жиклер 2, а воздух всасывался через патрубок 3. Готовая топливовоздушная смесь уходила в патрубок 4 через дроссельную заслонку 5. Топливо в поплавковую

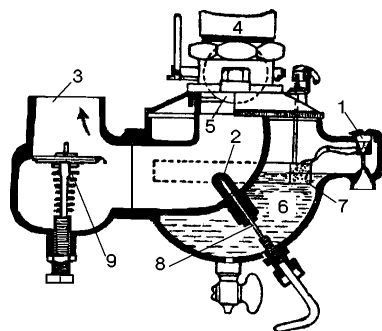


Рис. 5.5. Карбюратор Шеблера

камеру попадало через игольчатый клапан 6 с поплавком 7. Количество подаваемого топлива изменялось при помощи игольчатого клапана 8. При росте нагрузки производимая карбюратором смесь чрезмерно обогащалась, но из-за увеличивающегося в нем разрежения атмосферное давление открывало клапан добавочного воздуха 9. Через него в смесительную камеру всасывалось дополнительное количество воздуха, понижавшее содержание топлива в смеси до нормального и обеспечивавшее ее качественное горение.

Первый в России бензиновый двигатель в 1884 г. построил инженер О. С. Костович. Он был четырехтактным и имел восемь горизонтально расположенных цилиндров с противоположно-движущимися поршнями. Мощность машины составляла 59 кВт, а ее удельный вес был равен всего 5,44 кг/кВт. Небольшие размеры делали ее пригодной для транспортных средств. Костович предполагал применить двигатель для своего воздухоплавательного аппарата — «аэроскафа», — однако изобретателю не удалось получить поддержки промышленников, поэтому он не был использован по назначению [82].

Промышленное применение в России первыми получили двигатели, работавшие на керосине, сконструированные Е. А. Яковлевым и Я. Казаковым. Одноцилиндровый вертикальный двигатель Е. А. Яковлева, построенный в 1889 г., работал по четырехтактному циклу, рис. 5.6а. Он имел все основные элементы современного.

Цилиндр закрывался съемной крышкой. Пространство камеры сжатия имело Г-образную форму, степень сжатия равнялась трем. Составной поршень имел съемное днище, компрессионные кольца и соединялся с шатуном при помощи болта с гайкой. Коленчатый вал опирался на два подшипника скольжения. Газораспределение осуществляли два клапана: автоматический впускной и приводной выпускной.

Двигатель имел систему водяного охлаждения. Частота вращения его коленчатого вала

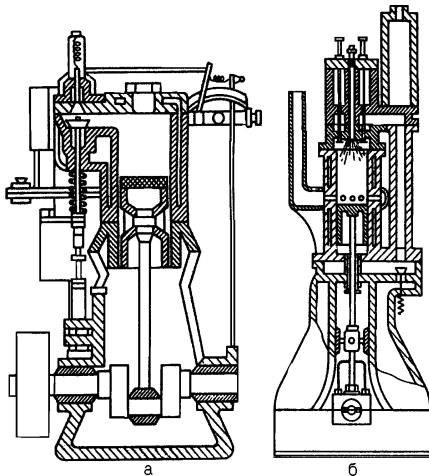


Рис. 5.6. Двигатели Яковлева и Казакова



поддерживалась посредством центробежного регулятора. Керосин самотеком подавался в карбюратор испарительного типа, где смешивался с воздухом. Состав смеси регулировался особым клапаном. Зажигалась она от электрической свечи, получавшей ток от индукционной катушки. Все подвижные детали смазывались под давлением.

Двигатель демонстрировался на заседании Русского технического общества в 1891 г. Его преимуществами перед иностранными образцами являлись вертикальное расположение рабочего цилиндра, обеспечивавшее его меньший износ, и смазка деталей движения под давлением, повышающая надежность их работы. Двигатель Яковлева по сравнению с подобным двигателем Отто был проще, при одинаковой мощности имел в 2,5 раза меньший вес и стоил на 30 % дешевле [61].

На рис. 5.66 показан поперечный разрез двухтактного двигателя с камерной продувкой конструкции Я. Казакова, созданного в 1886 г. Его цилиндр разделялся на две полости: верхнюю, в которой протекал рабочий процесс, и нижнюю (подпоршневую), игравшую роль продувочного насоса. При движении поршня к нижней мертвой точке (НМТ) в верхней полости происходили расширение и выпуск отработавших газов, в нижней — сжатие продувочного воздуха. Выпускные газы уходили через выпускные окна в нижней части цилиндра, перекрываемые поршнем. Продувался цилиндр через клапаны, расположенные в крышке. Клапаны автоматически открывались после снижения давления в верхней полости ниже давления продувочного воздуха.

При движении поршня к верхней мертвой точке (ВМТ) в верхней полости последовательно осуществлялись сжатие воздуха, подача топлива, воспламенение смеси при помощи трубки накаливания. Подпоршневое пространство в это время наполнялось воздухом, поступающим через автоматический клапан. Компоновка этого двигателя имеет сходство с конструкцией современных мощных двухтактных крейцкопфных малооборотных дизелей.

Еще один двухцилиндровый *V*-образный двигатель Я. Казакова был оборудован кривошипно-камерной продувкой. Он имел общую для обоих цилиндров камеру сгорания. Воздух в цилиндр поступал через продувочные окна, перекрываемые расположенным в нем поршнем. Отработавшие газы уходили через выпускные окна, открытием которых управлял поршень другого цилиндра. Выпускные окна открывались с опережением по сравнению с продувочными. КШМ имел главный и прицепной шатуны, суммировавшие усилия, передававшиеся обоими поршнями, на одной кривошипной шейке коленчатого вала.

Двигатели конструкции Я. Казакова производились серийно в конце 1880 — начале 1890-х гг. [61]. Некоторые их конструктивные решения находят применение и в наше время.

В 1890-х гг. в России проводились технические выставки, на которых среди прочих механизмов и устройств демонстрировались ДВС. Так, в 1892 г. на Электрической выставке в Москве были представлены керосиновые двигатели производства трех отечественных и двух иностранных заводов. В 1895 г. на выставке Московского общества сельского хозяйства выставлялись двадцать шесть двигателей, выпущенные пятью заводами Москвы, Риги, Петербурга и девятью иностранными фирмами [61]. Двигатели отечественного производства в конце XIX в. имели широкое распространение на российском рынке и по качеству не уступали иностранным образцам.

Конструкция бензиновых и керосиновых двигателей в конце XIX в. быстро совершенствовалась. Вместо одно- двухцилиндровых моделей к концу 1890-х гг. стали производиться трех- и четырехцилиндровые. Частота вращения коленчатого вала к 1914 г. выросла до 2 000 об/мин. В 1910 г. американский промышленник Г. Форд впервые применил литой коленчатый вал взамен кованого. Вскоре коленчатые валы малогабаритных двигателей стали изготавливать штамповкой. Перед первой мировой войной цилиндрические крышки стали выполнять съемными. Между ними и блоками цилиндров устанавливались уплотнительные медноасбестовые прокладки.

Применение карбюраторных бензо-керосиновых двигателей на малотоннажных судах в 1885 г. запатентовали Даймлер и Майбах. Их практическое использование началось спустя примерно десятилетие, с появлением первых достаточно надежных конструкций.

На рис. 5.7 приведен поперечный разрез американского катерного двигателя типа «Скриппс». Он был установлен на моторной шлюпке, совершившей в 1912 г. переход через Атлантический океан по маршруту Нью-Йорк —

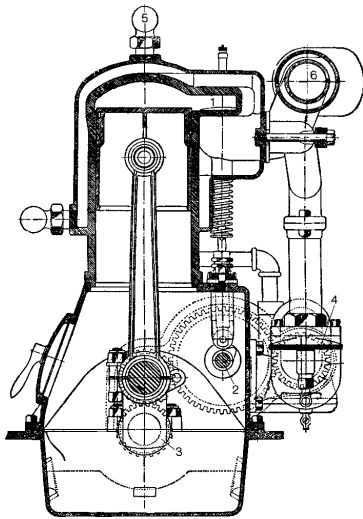


Рис. 5.7. Двигатель «Скриппс»

Санкт-Петербург. Его отдельные цилиндры отливались совместно с цилиндрическими крышками и рубашками охлаждения. Они крепились к картеру на болтах при помощи фланцев. Клапаны 1 приводились в действие от распределительного вала 2 при помощи толкателей и штоков. Распределительный вал вращался от коленчатого посредством трех цилиндрических шестерен 3. С ними была связана шестерня привода насоса охлаждения 4, подававшего забортную воду в зарубашечное пространство. Горячая вода отводилась через штуцер 5. Отработавшие газы удалялись в атмосферу через охлаждаемый коллектор 6. Двигатель снабжался карбюратором Шеблера. Между ним и всасывающими клапанами устанавливался керосиновый испаритель, работающий на тепле отработавших газов.

В период, предшествующий первой мировой войне 1914—1918 гг., в России получили распространение катерные карбюраторные двигатели английской фирмы «Кельвин». Поперечный разрез ее четырехцилиндровой модели мощностью 22 кВт показан на рис. 5.8.

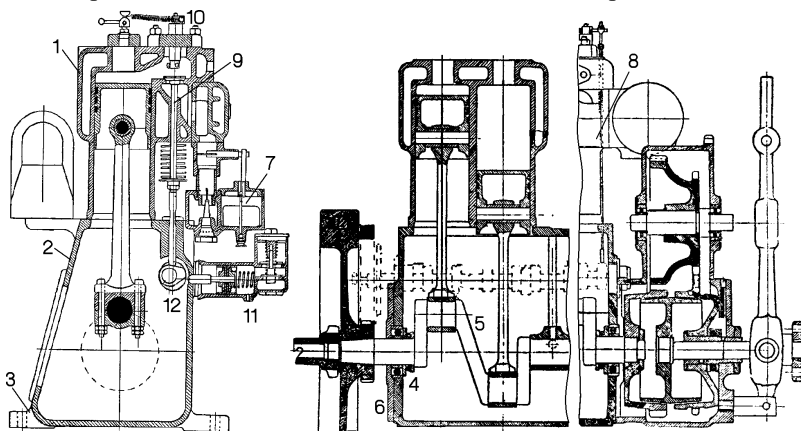


Рис. 5.8. Двигатель «Кельвин»

Ее конструктивными особенностями являлись:

- цилиндры 1, отлитые попарно совместно с рубашками охлаждения и крышками;
- неразъемный картер 2, снабженный в нижней части приливами 3 для крепления к судовому фундаменту;
- всего три шарикоподшипника: два рамовых 4 и один упорный;
- находящиеся на весу две пары кривошипов коленчатого вала 5, имевшие общую наклонную щеку. Выемка коленчатого вала

производилась в продольном направлении, для чего на переднем торце картера предусматривалась круглая горловина 6;

— оригинальная реверсивная муфта с цилиндрическими колесами.

Двигатель имел карбюраторы 7, каждый из которых обслуживал два цилиндра. При работе на керосине смесь из них направлялась в испаритель 8 с двойными стенками, между которыми проходили горячие отработавшие газы. Готовая смесь поступала к всасывающим клапанам 9, над которыми размещались воспламенители 10. Охлаждался двигатель при помощи поршневого насоса 11, приводимого в действие от распределительного вала 12.

С конца 1890-х гг. на маломерном флоте широкое применение нашли *калоризаторные* двигатели, работавшие на нефти, мазуте или керосине. Эти машины (так называемые «нефтянки», в зарубежной практике — полудизели) имели калоризаторы — особые камеры сгорания, выполненные в виде сферы. Они нагревались при помощи внешнего источника тепла (обычно лампой, напоминающей паяльную). Образование рабочей смеси и ее воспламенение происходило за счет тепла, отдаваемого стенками калоризатора.

Одним из первых двигатель с калоризатором построил в 1888 г. англичанин Дж. Харгревс. Первое немецкое судно с нефтяным двигателем системы Капитэна создала фирма «Эльбаверфт». Им стала небольшая речная лодка, рис. 5.9, прошедшая испытания 30 мая 1889 г.



Рис. 5.9. Моторная лодка фирмы «Эльбаверфт»

В 1902 г. эта фирма спустила на воду буксирное судно с оригинальной ЭУ, состоявшей из ДВС и генератора, вырабатывавшего для двигателя горячий газ из каменного угля.

С 1892 г. в Англии стали производиться калоризаторные двигатели системы Хорнсби. В 1895 г. одну такую машину мощностью 7 кВт установили на небольшое судно.

Отечественные заводы на протяжении длительного периода (с конца XIX в. до конца 40-х гг. XX в.) активно строили калоризаторные дви-

гатели различных конструкций. Они широко использовались в качестве главных на небольших рыбопромысловых, служебных и парусно-моторных судах. В 1890-х гг. «нефтянки» производились в Москве на заводе бр. Бромлей и в Риге на заводе Р. Поле.

Конструкция вертикальных одноцилиндровых двигателей завода братьев Бромлей была результатом многочисленных опытов и оказалась весьма удачной. Рижский завод изготовлял машины системы Каблица. Их отличало использование продувочного насоса, расположенного под прямым углом к рабочему цилиндру. Такая конструкция позволяла уменьшить неуравновешенную массу КШМ. В 1903 г. появилась оригинальный двигатель конструкции Я. В. и И. В. Маминых [61]. Одноцилиндровые двухтактные двигатели высокого сжатия системы Мамина (марки «Возрождение») производились на отечественных заводах еще в 1920—1930-е гг. Их мощность была равна 9 кВт при массе 850 кг, давление в конце процесса сжатия достигало 3 МПа [46].

Наиболее распространенными калоризаторными двигателями являлись двухтактные машины простого действия. В них воздух предварительно сжимался до давления 0,85—1,1 МПа. Затем в нагретую камеру сгорания от насоса через форсунку нагнеталось топливо. Оно воспламенялось теплом, отдаваемым стенками камеры сгорания, а также из-за теплом нагретого сжатого воздуха. Продувался цилиндр воздухом, поступающим из картера двигателя (так называемая «кривошипно-камерная продувка»). В кривошипную камеру он всасывался из атмосферы через специальные автоматические пластинчатые клапаны во время хода сжатия, протекавшего в рабочем цилиндре.

Такие машины назывались «двигателями низкого сжатия», они не могли быть пущены в действие из холодного состояния. Для запуска их камеры сгорания необходимо было предварительно нагреть. Время разогрева составляло 5—20 минут в зависимости от размеров цилиндра. Для ускорения и облегчения пуска могли использоваться электрические запальные свечи и специальные пусковые пиропатроны.

Двухтактные калоризаторные двигатели были конструктивно просты и надежны, но отличались малой мощностью (8—40 кВт) и низкой экономичностью. Средний удельный эффективный расход топлива в них достигал 0,340—0,375 кг/(кВт·ч) и соответствовал эффективному КПД 24—26 %. Некоторые типы двигателей, оборудованные отдельными продувочными насосами («Болиндер» и «Фиат»), имели удельный расход топлива на 5—6 г/(кВт·ч), меньше чем обычные,

снабженные кривошипно-камерной продувкой [97]. Они также меньше потребляли смазочного масла.

Значительно реже калоризаторные двигатели выполнялись четырехтактными. К ним относились машины типов «Локе», «Альфа», «Хейн», «Феррих» и некоторые другие. Они строились в начале XX в. и к концу 1920-х гг. практически вышли из употребления.

К одному из наиболее распространенных типов двухтактных калоризаторных двигателей принадлежали шведские машины системы «Болиндер», рис. 5.10а. Их конструктивными особенностями являлись:

- расположение рамовых подшипников вне картера;
- особая конструкция поршня и камеры сгорания;
- наличие устройства для впрыска в цилиндр воды.

Форсунка, через которую подавалось топливо, устанавливалась сбоку цилиндра и была наклонена вверх. Струя топлива попадала в камеру сгорания снизу, образовавшиеся газы по двум широким каналам поступали в полость цилиндра. Верхняя часть поршня имела наклонную форму: справа был предусмотрен щиток, направлявший продувочный воздух в верхнюю часть цилиндра. Аналогичную форму имела и нижняя доска цилиндровой крышки. Выбор такой конфигурации поршня диктовался тем, что продувочные окна первых двигателей не имели наклона к оси цилиндра. Позже, когда окна приобрели наклон к вертикали  $30\text{--}45^\circ$ , необходимость в изготовлении поршней с подобными очертаниями днища отпала.

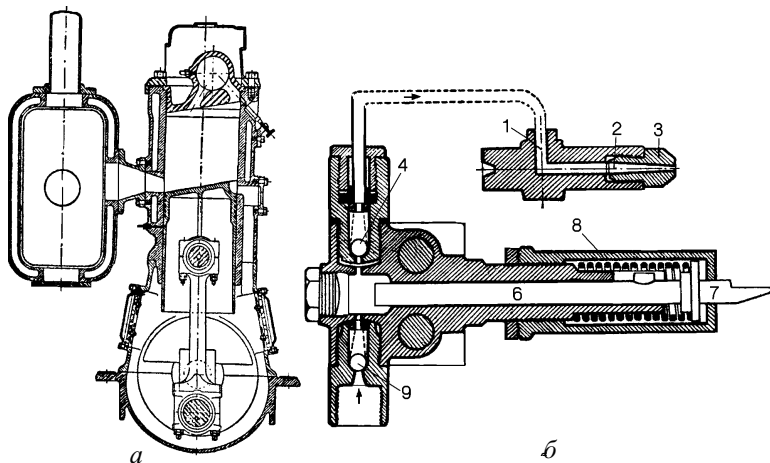


Рис. 5.10. Двигатель типа «Болиндер»

Открытая форсунка, рис. 5.10б, была отлита из бронзы. Она не имела никаких запорных органов: топливо по каналу 1 поступало в суживающийся конический канал 2, выполненный в виде наконечника 3. К форсунке от насоса оно подавалось через нагнетательный шариковый клапан 4. Внутри корпуса насоса 5 перемещался плунжер 6, оканчивавшийся ударником 7. Плунжер приводился в действие от коленчатого вала. Производительность насоса изменялась вращением регуляторного стакана 8. Топливо к насосу поступало через невозвратный клапан 9. Впрыск в цилиндр пресной воды производился в конце сжатия. Так регулировалась температура сжатия, предупреждалась преждевременная вспышка смеси, с поршня и колец удалялся нагар.

Отечественный вариант двигателя «Болиндер» производился на Ижорском заводе. Его основным отличием от оригинала являлось устройство системы реверса.

В 1940 г. Петропавловская судовой верфь приступила к строительству цельносварных буксирных катеров типа «Ж», предназначенных для нужд рыбной промышленности Камчатки. В течение 1940—1941 гг. были построены первые четыре катера. С началом Великой Отечественной войны возникли сложности с приобретением для них двигателей, поэтому литейный и механический цеха верфи освоили производство двухтактных калоризаторных двигателей собственной конструкции марки К-50 («Камчадал», мощность 50 л. с.).

«Камчадал», рис. 5.11, являлся двухцилиндровой тронковой машиной с кривошипно-камерной продувкой и реверс-муфтой. Детали его остова отливались из чугуна. К фундаментной раме шпильками крепился блок-картер, разделенный на две половины, образовавшие верхние части кривошипных камер. Картер имел четыре лючка с автоматическими воздушными клапанами с кожаным уплотнением. Стальной цельнокованый коленчатый вал снабжался чугунными противовесами. К его переднему концу крепился маховик, к заднему — эксцентрик привода топливных и водяных насосов, а также ведущая шестерня реверс-муфты.

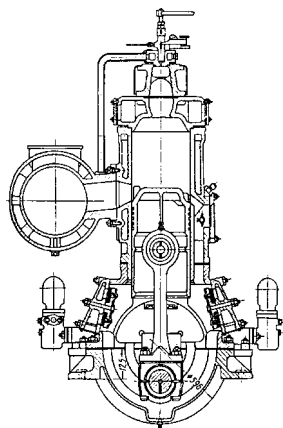


Рис. 5.11. «Камчадал»

Цилиндры отливались заодно со втулкой, имели продувочные и выпускные окна. Они смазывались через три штуцера от лубрикатора,

приводившегося от коленчатого вала. Он же смазывал рамовые подшипники. Цилиндровая крышка делилась на две части: нижняя охлаждалась водой, верхняя выполнялась в виде неохлаждаемого калоризатора. Сверху в калоризатор была вставлена открытая форсунка с одним отверстием, установленная в охлаждаемую водой вставку. Калоризаторы закрывались кожухами, в которых имелись отверстия для их нагрева при пуске. Напротив отверстий устанавливались нагревательные лампы. Температура калоризаторов регулировалась заслонками, стоявшими в продувочных каналах. Работал «Камчадал» на мазуте, охлаждался заборной водой, пускался сжатыми отработавшими газами [92].

Параметры двигателя типа К-50 приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Параметр	Размерность	Величина
Диаметр цилиндра/ход поршня	мм	250/270
Среднее эффективное давление	МПа	0,213
Эффективный удельный расход топлива	кг/(кВт·ч)	0,408
Действительная степень сжатия	—	5,9
Давление сжатия/давление сгорания	МПа	1,4/2,34
Масса	кг	3 280

Калоризаторные двигатели применялись до середины 1950-х гг., после чего их заменили бескомпрессорные дизели.

### 1.3. СОЗДАНИЕ ДИЗЕЛЯ

Эффективный КПД первых керосиновых и бензиновых двигателей не превышал 10—15 %. Повысить их экономичность можно было как путем совершенствования существующих конструкций, так и созданием нового типа ДВС — с самовоспламенением топлива от сжатия.

Оптимальную последовательность процессов, составляющих цикл такого двигателя, и его описание в 1824 г. дал С. Карно. «Сперва сжать воздух насосом, затем пропустить его через вполне замкнутую топку, вводя туда маленькими порциями топливо при помощи приспособления, легко осуществимого; затем заставить воздух выполнять работу в цилиндре с поршнем или в любом другом расширяющемся сосуде и, наконец, выбросить его в атмосферу...». Эта теоретическая схема, получившая наименование «цикла Карно», стала эталоном экономичности теплового двигателя. Попытку реализовать ее на практике предпринял немецкий инженер Рудольф Дизель.

По первоначальной идее Дизеля, в цилиндре до достижения давления не менее 3,3—3,5 МПа должен был сжиматься чистый воздух.



При таком давлении его температура достигала 550—700 °С. После этого в цилиндр подавалось топливо. Выделяющееся при его горении тепло должно было компенсировать падение давления и температуры продуктов сгорания из-за увеличения объема цилиндра в ходе расширения. При этом температура рабочей смеси должна была оставаться постоянной. При равенстве температур в конце процессов сжатия и сгорания теплота будет подводиться так же, как в теоретическом цикле Карно, то есть по изотерме. Но предлагаемый Дизелем цикл не соответствовал циклу Карно, так как изотермический отвод тепла в нем был заменен выпуском продуктов горения в атмосферу, происходившим при постоянном объеме цилиндра.

Патент на двигатель, работавший по рассмотренному выше принципу, Дизель получил в 1892 г., а в следующем году он издал работу «Теория и конструкция рационального двигателя, призванного заменить паровую машину и другие существующие в настоящее время двигатели» с его описанием. Работа должна была привлечь внимание к его изобретению потенциальных производителей и потребителей.

Опытный образец, рис. 5.12 и 5.13а, был построен в июле 1893 г. при финансовой поддержке фирмы Круппа. Давление в конце сжатия достигало 9 МПа, температура превышала 800 °С. Для приближения процесса сжатия к адиабатному цилиндр не охлаждался. Топливом должен был служить угольный порошок. Идея его использования возникла у Дизеля в связи с тем, что Германия обладала незначительными ресурсами жидкого топлива. В ходе испытаний выяснилась непригодность угольного порошка как топлива для ДВС (реальный результат от использования порошкообразного угольного топлива удалось получить помощнику Дизеля Павликовскому только в

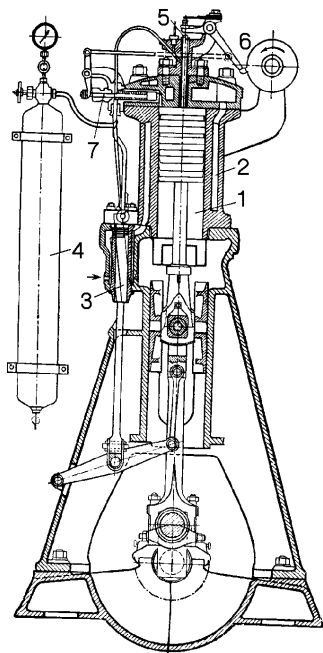


Рис. 5.12. Опытный дизель: 1 — цилиндр; 2 — полость охлаждения; 3 — форсуночный компрессор; 4 — воздушный баллон; 5 — топливоподающий клапан; 6 — распределительный вал; 7 — выпускной клапан

1916 г.). В связи с этим, Дизель решил применить жидкое топливо, в качестве которого был выбран бензин. При попытке его подачи в цилиндр произошел взрыв, едва не погубивший самого изобретателя.

В июне 1894 г. закончилась постройка второго двигателя. В ходе испытаний он устойчиво работал на холостом ходу с частотой вращения коленчатого вала 80 об/мин. Давление сжатия в цилиндре было уменьшено до 4 МПа. Замысел Дизеля обеспечить изотермическое горение не удался: оно происходило хотя и при постоянном давлении, но с изменяющейся температурой.

Работы над третьим образцом завершились к началу 1895 г. В нем Дизель отказался от адиабатного сжатия воздуха: цилиндр машины имел водяное охлаждение. Топливом служил керосин, распыливаемый сжатым воздухом, подаваемым от навешенного компрессора. Впоследствии двигатели, работающие по такому принципу, получили название *компрессорных*. Распределительный вал располагался над цилиндром. 16 июня 1897 г. машину испытали под нагрузкой. Ее эффективный КПД оказался равным 36 %, удельный расход топлива составил 0,253 кг/(кВт·ч) и был почти вдвое ниже, чем у двигателей Отто.

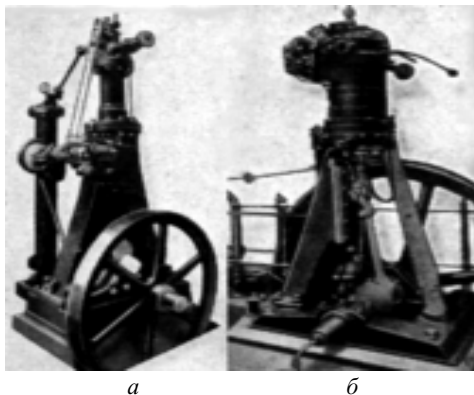


Рис. 5.13. Опытный и промышленный образцы двигателей Р. Дизеля

Как видно, свои первоначальные идеи Дизель в двигателе собственной конструкции осуществить не смог. Вместо адиабатного сжатия в нем было реализовано политропное, подвод тепла к рабочему телу производился не по изотерме, а по изобаре, от цикла Карно осталось только высокое сжатие. По существу, Дизель создал новый тип теплового двигателя, который ныне носит его имя.

Постройка дизелей началась в 1897 г. Первый из них в этом же году был установлен на спичечной фабрике в г. Кемтене, рис. 5.13б. Одним из ведущих предприятий, выпускающих дизели, стал Аугсбургский завод, предшественник знаменитой фирмы «MAN».

В феврале 1898 г. Дизель подписал договор о производстве своих двигателей в России с русскими предпринимателями братьями Нобель, владельцами фирмы «Товарищество нефтяного производства». Первый отечественный дизель был построен в ноябре 1899 г. на Санкт-Петербургском заводе «Людвиг Нобель», рис. 5.14. Он представлял собой модернизированный двигатель Дизеля мощностью 14,7 кВт, имевший один цилиндр диаметром 260 и ходом поршня 410 мм. Частота вращения коленчатого вала, равная 200 об/мин, обеспечивала среднюю скорость вращения поршня в цилиндре 2,73 м/с.

В качестве топлива в нем вместо керосина применили сырую нефть. Ее выбор оказался не случаен: Россия располагала богатыми нефтяными ресурсами, а основные месторождения нефти были связаны с главными промышленными центрами страны удобным водным путем через Каспийское море и р. Волгу.

В процессе постройки первого русского дизеля в первоначальную конструкцию внесли существенные изменения: изготовили новый воздушный компрессор, переделали механизм газораспределения, топливный насос и сопловую часть форсунки, изменили конструкцию рубашки цилиндра, для изготовления цилиндрической втулки применили износоустойчивый чугун.

В этом же году машину испытали совместно с установкой, построенной в Германии. Проводивший испытания известный русский теплотехник профессор Г. Ф. Дешп установил, что дизель завода «Людвиг Нобель» показал эффективный КПД 28 %. Он расходовал топлива на 60 г/(кВт·ч) меньше, чем прототип Аугсбургского завода. Во время

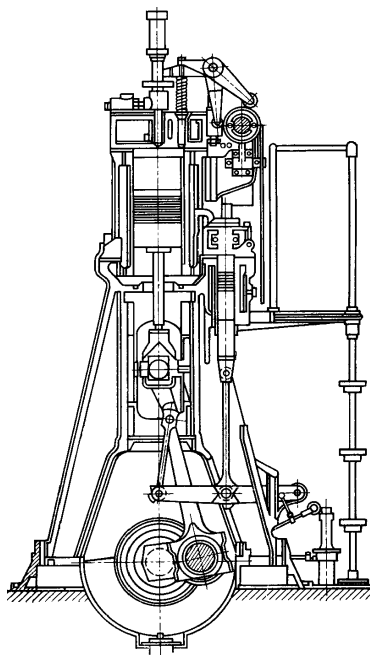


Рис. 5.14. Первый русский дизель

испытаний дизель развил мощность 18,4 кВт, заметно превысив проектную. Среднее эффективное давление, соответствующее этой мощности, составляет 0,5 МПа. В 1900 г., подводя итог работ по созданию отечественного дизеля, в докладе, прочитанном в обществе технологов, Г. Ф. Депп заявил: «Мы обеспечили двигателю Дизеля великое будущее!».

Так появился двигатель, которому было суждено совершить революцию в судостроении и через столетие занять ведущее место на судах различных назначений в качестве главных и вспомогательных энергетических установок.

## ГЛАВА 6. РАЗВИТИЕ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

*Зарождение отечественного судового дизелестроения. Создание реверсивных машин. Конструкции отечественных дизелей различных лет. Первые теплоходы, особенности их энергетических установок. Начало применения дизелей на боевых кораблях. Количественный рост отечественного и зарубежного дизельного флота. Сравнительные характеристики судов с дизельными и пароэнергетическими установками. Направления развития судовых дизелей: разработка бескомпрессорных моделей, внедрение наддува, совершенствование конструкции деталей и узлов.*

*Конструктивные особенности малооборотных дизелей различных периодов, схемы их наддува и продувки. Дизели двойного действия и с противоположно-движущимися поршнями. Пародизели. Тенденции совершенствования судовых дизелей на протяжении 1920—1990-х гг. Составляющие критерия напряженности и пути их увеличения. Перспективы развития МОД и СОД. Топлива и смазочные масла для дизелей.*

### 6.1. ОТЕЧЕСТВЕННОЕ СУДОВОЕ ДИЗЕЛЕСТРОЕНИЕ

Пионером российского дизелестроения стал санкт-петербургский завод «Людвиг Нобель». Производство дизелей на нем началось в 1900 г. В этом году их изготовили 7, в следующем 1901 г. — 14, в 1902 г. — 20, в 1903 г. — 37 и в 1904 г. — 50 шт. Всего предприятие с 1899 по конец 1910 гг. продало 450 машин общей мощностью 36 800 кВт. К началу 1911 г. завод производил модели мощностью от 12 до 740 кВт трех типов: «В» — стационарного, «Д» — быстроходного, «Ф» — судового.