

Поверхность его нагрева была равна 78,7 м². Экранный пучок состоял из двух рядов труб: первый сплошной воспринимал тепло излучения факела и являлся подъемным, второй — разряженный — не обогревался, выполняя роль опускного. В конвективном пучке первые по ходу газов трубы служили подъемными, последующие — опускными. Кожух был выполнен двойным, межкожуховое пространство использовалось для подвода в топку воздуха. КПД котла, равный 74 %, значительно уступал аналогичному показателю современных конструкций.

В начале 1960-х гг. на судах стали устанавливать водотрубные вертикальные аппараты с естественной циркуляцией типов КВВ и КВВА. Несколько позже, в 1971 г., появились агрегаты типа КАВ. Все они являлись двухколлекторными, рис. 2.30а, и в отличие от рассмотренных выше трехколлекторных, имели более высокую экономичность. Их КПД составлял 78—81 %. Его увеличение было достигнуто за счет повышения степени экранирования топки и развития конвективного пучка. Некоторые модификации оборудовались дополнительными поверхностями нагрева, чаще всего — змеевиковыми гладкотрубными экономайзерами. Эта мера позволяла поднять их КПД до 84—85 %.

Котлы указанных типов производились в виде мощных рядов, внутри которых модели одного типа различались размерами поверхности нагрева (длиной топки и высотой котла). Котлы типов КВВА и КАВ хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации, но к концу 1980-х гг. они морально устарели.

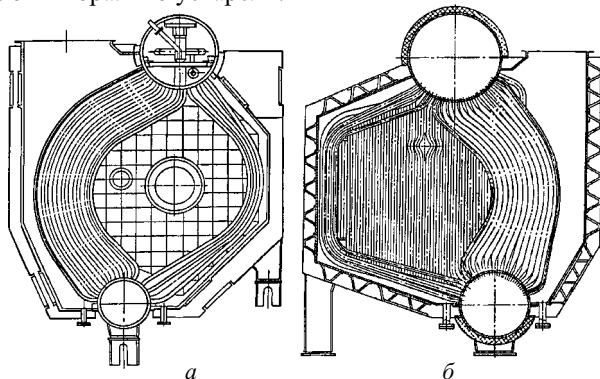


Рис. 2.30. Котлы типов КАВ и КСВ

Для замены устаревших типов были разработаны котлы нового поколения типа КСВ, рис. 2.30б. В качестве прототипа при их создании использовались агрегаты семейства КАВ. При создании новых

моделей широко использовался принцип унификации основных узлов, позволивший упростить и удешевить производство. Новые конструкции отличаются от предыдущих высокой степенью экранирования топки.

Степень экранирования, равная отношению площади топочных экранов к полной площади стен, ограничивающих топку, характеризует ее конструктивное совершенство. У котла типа КВС-30/1 степень экранирования равна 0,55, у моделей семейства КВВА ее значение достигает 0,7, а в котлах типа КСВ — приближается к единице.

Высокая степень экранирования топки достигнута за счет применения газоплотных мембранных экранов, установленных на ее переднем и заднем фронтах. Экранирование позволило снизить массу обмуровки и сделать ее работу более надежной. Сравнительные характеристики котлов типов КАВ и КСВ с одинаковой паропроизводительностью (4 т/ч) и рабочим давлением (0,7 МПа) приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Тип котла	Т-ра уходящих газов, °С	Поверхность нагрева, м ²	Степень экранирования	КПД, %
КАВ 4/7	372	98,1	0,67	80,7
КСВ 4/0,7	259	101,6	0,99	87,0

Примером современной конструкции вспомогательного водотрубного котла высокой мощности с вертикальной цилиндрической компоновкой является агрегат типа АQ-9, производимый датской фирмой «Ольборг». Мощный ряд котлов семейства АQ-9, рис. 2.31, образован моделями с паропроизводительностью от 8 до 45 т/ч при рабочем давлении пара 0,9, 1,2 или 1,8 МПа.

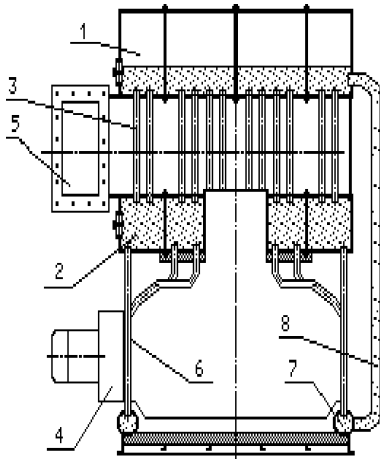


Рис. 2.31. Котел АQ-9

Котел состоит из пароводяного барабана 1, водяного коллектора кольцевой формы 2, пучка испарительных труб 3, экранных труб 6 и кольцевого коллектора 7. Под топки не экранированы. Топочное устройство 4 оборудовано форсункой с вращающимся распылителем. Агрегат может работать на различных сортах топлива, включая водотопливную эмульсию и отработавшие масла. Надежность естествен-

ной циркуляции обеспечивается при помощи необогреваемых опускающих труб 8 большого диаметра, вынесенных за пределы корпуса. Продукты сгорания уходят в атмосферу через газоход 5. Благодаря малой величине коэффициента избытка воздуха при сгорании, отработавшие газы содержат незначительное количество кислорода. Поэтому котел может быть использован как генератор инертного газа. Хотя он не имеет дополнительных поверхностей нагрева, его КПД достаточно высок и достигает 87 %.

2.5. КОМБИНИРОВАННЫЕ И УТИЛИЗАЦИОННЫЕ КОТЛЫ

Комбинированными называют котлы с поверхностью нагрева, образованной элементами, одни из которых работают по водотрубному, а другие — по газотрубному принципу. Кроме этого, термин «комбинированные» используется в отношении устройств, имеющих смешанное отопление — топливом и отработавшими газами ДВС. Создание комбинированных котлов диктовалось желанием конструкторов получить установки, в которых сочетались бы достоинства их огне- и водотрубных прототипов: большая аккумулирующая способность первых, высокие производительность и надежность циркуляции воды вторых.

Первыми комбинированными фактически являлись ранние образцы водотрубных котлов, появившиеся в 1860-х гг. Их специальные конструкции стали разрабатываться позднее — в конце XIX и начале XX вв. Основой для них стали широко распространенные в то время оборотные котлы. К указанному периоду относится время создания отечественного «огневодотрубного» котла системы Ладыженского, рис. 2.32, в котором водотрубная часть располагалась в районе огневой камеры. Его огнетрубная часть заключалась в цилиндрический корпус. Жаровой трубы он не имел, точечные газы обогревали нижнюю часть его корпуса [82].

В дальнейшем развитие комбинированных котлов пошло по пути

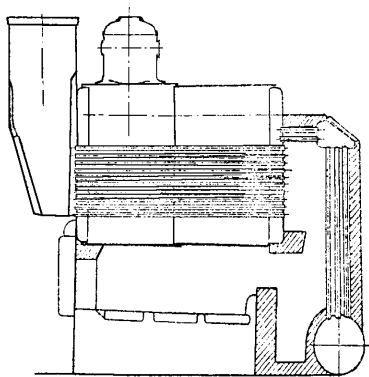


Рис. 2.32. Котел Ладыженского

создания коллекторных и безколлекторных конструкций. Наиболее простое устройство имели безколлекторные агрегаты системы «Гоуден-Джонсон», показанные на рис. 2.33а.

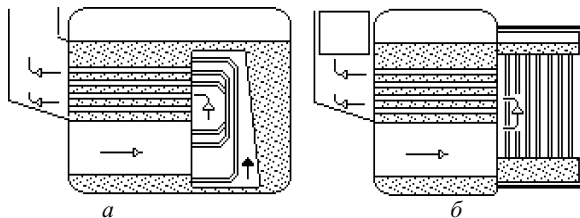


Рис. 2.33. Комбинированные котлы систем «Гоуден-Джонсон» и «Прудон-Капюс»

Кипятильные трубы, ввальцованные в заднее днище бочки, располагались в огневой камере, выполненной из огнеупорных материалов. Широкое распространение получили коллекторные котлы системы «Прудон-Капюс», показанные на рис. 2.33б и 2.34б.

Они отличались от оборотных тем, что вместо нескольких охлаждаемых водой огневых камер имели одну общую 1, выполненную из огнеупорных материалов. В ней располагались четыре пучка изогнутых кипящих труб 2, развальцованных в шести коллекторах. Два нижних коллектора 3 являлись водяными, четыре верхних 4 играли роль пароводяных. Коллекторы в ранних конструкциях приклепывались, а в более поздних — приваривались к заднему днищу бочки. Применение изогнутых труб должно было придать котлам большую гибкость. При необходимости они могли быть оборудованы конвективными или радиационными пароперегревателями.

Существовали и другие типы комбинированных коллекторных котлов. На рис. 2.34а показан разрез агрегат отечественного производства конструкции профессора Волского.

Его водотрубная часть имела два коллектора, расположенные перпендикулярно оси жаровой трубы. Пароводяной и водяной коллекторы 2 соединялись системой испарительных труб 1 и при помощи патрубков 8 были связаны с соответствующими пространствами корпуса. Водотрубная часть котла располагалась в камере 3. Здесь же находился радиационный горизонтальный пароперегреватель 4. Топка с угольным отоплением была образована жаровой трубой 6 с кольцами жесткости 7. В дымовой коробке размещался гладкотрубный воздухоподогреватель 5. Наличие обогреваемого пучка труб позволило упо-

рядочить и улучшить циркуляцию воды в аппаратах этого типа по сравнению с оборотными прототипами: роль подъемных труб играли кипятильные, опускных — огнетрубная часть.

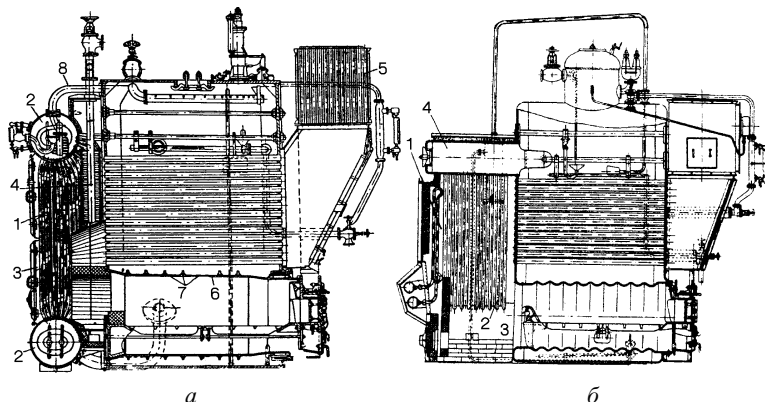


Рис. 2.34. Комбинированные котлы профессора Волского и системы «Прудон-Капюс»

Рассмотренные котлы применялись в качестве главных на некоторых морских и речных судах в период 1920—1950-х гг. В процессе их эксплуатации выяснилось, что больших преимуществ перед оборотными они не имеют: производительность возросла всего на 5—10 %, а стоимость постройки заметно не уменьшилась. При подъеме давления пара, из-за неравномерного нагрева, в водотрубной части в местах вальцовки труб могли возникать течи. Они требовали применения питательной воды более высокого качества, чем оборотные. В противном случае трубы быстро засорялись и перегорали. Их чистка основным в то время механическим способом была затруднена.

Таким образом, компромиссное техническое решение о создании комбинированного котла на базе оборотного себя не оправдало. Подобные конструкции вышли из широкого употребления практически одновременно со своими прототипами — оборотными котлами — в начале 60-х гг. XX в.

До середины 1950-х гг. на малотоннажных промысловых судах находили применение вспомогательные комбинированные котлы конструкции инженера В. Г. Шухова, рис. 2.35а. Котел Шухова был образован двумя цилиндрами 1 и 2, пространство между которыми заполнялось водой. В отверстиях внутреннего цилиндра развальцовывались водогрейные трубы, имевшие небольшой уклон. Напротив каждого

пучка труб в наружном цилиндре для осмотра, чистки и ремонта предусматривалась горловина 3. Доступ в топку обеспечивал лаз 4. Газы удалялись в атмосферу через паровое пространство по дымовой трубе 5. Позже котлы Шухова были усовершенствованы путем увеличения объема топки и более рациональной компоновки трубного пучка. Модернизированный котел постройки 1940-х гг. показан на рис. 2.35б. Производительность шуховских котлов, устанавливаемых на небольших судах, обычно не превышала 0,5 т/ч при давлении 0,5—0,7 МПа.

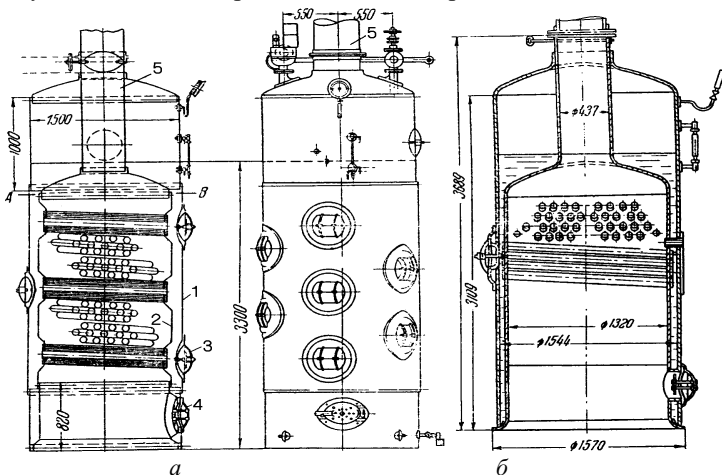


Рис. 2.35. Котлы В. Г. Шухова

С середины 1940-х гг. на судах стали применять комбинированные котлы других конструкций. Ведущее место среди них заняли вертикальные, подобные показанным на рис. 2.36. Они использовались исключительно в качестве вспомогательных. На рис. 2.36а приведен котел AQ-3 датской фирмы «Ольборг», производство которого началось в 1947 г. [54]. Его конструкция впоследствии была повторена многими производителями. Так, в период 1960—1990-х гг. котлы польской постройки типа VX, имеющие аналогичную схему, широко использовались на отечественных промышленных и транспортных судах.

Газотрубная часть котла выполнялась в виде конической топки с полусферическим верхом. Под топки не охлаждался. Водотрубную часть образовывали верхний цилиндрический пароводяной барабан, нижний водяной барабан, внутри которого находилась топка, и набор вертикальных кипячительных труб. Дополнительные поверхности этой

аппарат не имел. Паропроизводительность его отдельных моделей достигала 15 т/ч при давлении пара до 2 МПа.

Оригинальную конструкцию имели агрегаты типа «Санрод», производившиеся шведской фирмой «Машинверкен», рис. 2.36б. Их газотрубная часть выполнялась в виде полностью охлаждаемой топки и нескольких вертикальных дымогарных труб большого диаметра. Водотрубную часть образовывали оригинальные парогенерирующие элементы «Санрод», размещенные внутри дымогарных труб. Они представляли собой цилиндры, соединенные верхней и нижней частями с паровым и водяным пространствами корпуса. Поверхность элементов ошпиковывались. Это позволяло увеличить площадь нагрева и улучшить теплообмен за счет турбулизации потока газов. Производительность этих агрегатов достигала 35 т/ч при давлении пара 0,8—1,8 МПа.

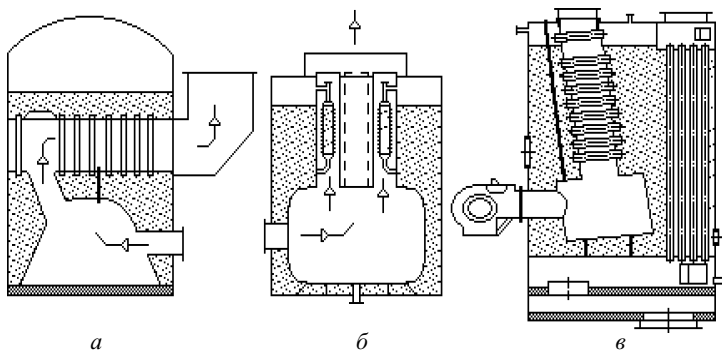


Рис. 2.36. Схемы современных комбинированных котлов

Примером современного котла с комбинированным отоплением является модель AQ-16 фирмы «Ольборг», показанная на рис. 2.36в. При ее создании были использованы хорошо отработанные конструкции: водотрубная часть выполнена на базе агрегата AQ-12 со слабо-наклоненными кипяtilьными трубами и полностью охлаждаемой цилиндрической топкой. Газотрубная утилизационная часть представляет собой котел AQ-7 с вертикальными дымогарными трубами, работающий на тепле выхлопных газов ДВС. Котел AQ-16 полностью автоматизирован, его топливная часть автоматически поддерживает требуемую паропроизводительность при снижении мощности ДВС. Выхлопные газы поступают в нижнюю приемную камеру, играющую роль глушителя. Топливная часть имеет производительность 6,3 т/ч, утилизационная — 3 т/ч.

Источником тепла для *утилизационных* котлов служат отработавшие газы, охлаждающая вода, смазочное масло и наддувочный воздух судовых дизелей. Использование части этого сбросного тепла позволяет увеличить КПД дизельной СЭУ, в среднем, на 5—10 %. Максимальное возможное использование установленных на судне утилизационных котлов является существенным фактором экономии топлива.

Существующие в настоящее время утилизационные котлы классифицируются по принципу действия, способу циркуляции и конструкции поверхности нагрева. В соответствии с этими признаками различают следующие их типы:

- газо- и водотрубные;
- с естественной и принудительной циркуляцией;
- с горизонтальным и вертикальным расположением труб, образующих поверхность нагрева.

Идея использования тепла отработавших газов впервые была высказана выдающимся ученым С. Карно. Первый утилизационный котел для ДВС был построен по проекту инженера И. А. Строганова в 1909 г. в России. В 1910 г. его демонстрировали на всемирном съезде дизелестроителей, проходившем в Санкт-Петербурге. Первоначально утилизационные котлы находили применение только в береговых условиях, в частности, на металлургических предприятиях, где они работали на тепле доменных газов. Их установка на теплоходы началась после первой мировой войны.

В 1920—1930-е гг. преимущественно применялись аппараты с естественной циркуляцией. Их конструкции, характерные для этого периода, приведены на рис. 2.37. Газотрубный котел Коломенского завода, выпускавшийся в 1931—1932 гг. для рейдовых судов с дизелями суммарной мощностью 560 кВт, показан на рис. 2.37а. Он имел гладкие вертикальные трубы с внутренним диаметром 57,5 и длиной 1 722 мм. Приемная и выпускная камеры были отлиты из чугуна. Выпускная камера предусматривала перегородку, служившую для разделения потоков газов, поступающих от двух дизелей. При температуре газов 370 °С и их расходе 10 кг/с паропроизводительность котла достигала 100 кг/ч, рабочее давление пара составляло 0,3 МПа.

На рис. 2.37б показан котел, по конструкции подобный рассмотренному выше, но имеющий большую производительность. Он был установлен в 1929 г. на германском теплоходе с мощностью дизелей 1 435 кВт и имел поверхность нагрева 55 м². Его высота составляла 3,8 м, масса с водой насчитывала около 4 т. Котел вырабатывал

400 кг/ч при давлении пара 0,8 МПа. Позже устройства этого типа стали снабжать приемной газовой камерой с направляющим аппаратом, придававшим продуктам сгорания вращательное движение.

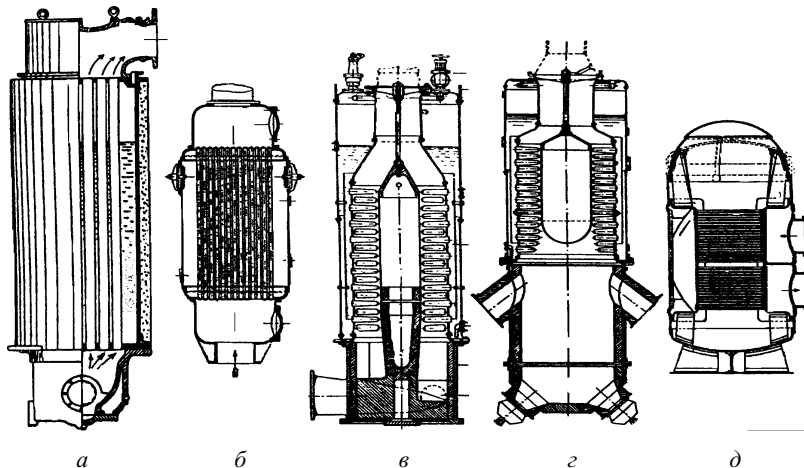


Рис. 2.37. Утилизационные котлы с естественной циркуляцией

На рис. 2.37в, г изображены водотрубные котлы английской фирмы «Кларксон» с поверхностью, образованной оригинальными наперсткообразными трубами, предложенными Томасом Кларксоном. В них происходило бурное прерывистое вскипание воды. В первых котлах Кларксона напротив труб устанавливался отбойный цилиндр, улучшавший циркуляцию, однако впоследствии от его использования отказались. Отработавшие газы ДВС двигались по кольцевому пространству, окружавшему водную полость, также имевшую кольцевое сечение. Оба котла оборудовались смешанным отоплением. Под ними располагались приставные топки. В первом случае выхлопные газы ДВС и топочный факел направлялись по касательной и закручивались, во втором — поток газов двигался вверх под углом около 45°. Топочная камера при этом выполнялась удлиненной.

На рис. 2.37д представлен утилизационный огнетрубный котел типа «Кохран» постройки 1930 г. Его поверхность была образована двумя пучками горизонтально расположенных труб.

Один из наиболее эффективных утилизационных котлов начала 1930-х гг. показан на рис. 2.38. При мощности главных двигателей 3 020 кВт и температуре газа на входе 400 °С он имел паропроизводительность 2 000 кг/ч. Вырабатываемый пар с давлением 0,7 МПа поступал

в турбину генератора мощностью 74 кВт. Поверхность нагрева площадью 50 м² была выполнена в виде двух горизонтальных пучков труб, при прохождении которых газы делали поворот на 180°. Цилиндрический корпус котла по конструкции был во многом схож с корпусом обратного.

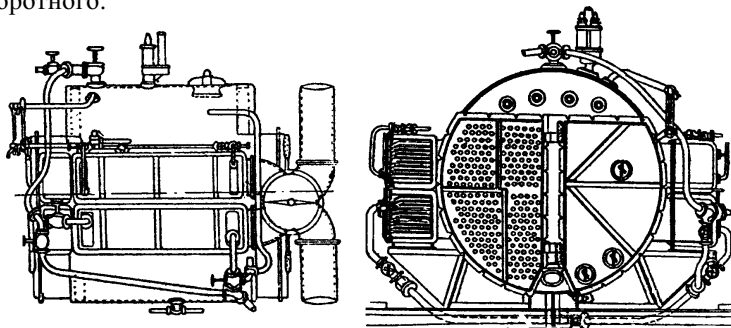


Рис. 2.38. Утилизационный котел фирмы «Дойч Верфт»

Применение на судах утилизационных котлов с принудительной циркуляцией началось в конце 1920-х гг. В них вода и пароводяная смесь двигались при помощи особого циркуляционного насоса. Так как эти аппараты пара непосредственно не производили, а вырабатывали пароводяную смесь, то за рубежом их называли «утилизационные экономайзеры». Отделение пара от пароводяной смеси в таких установках происходило в специальном аппарате — сепараторе, по устройству схожем с пароводяным коллектором водотрубного котла.

На рис. 2.39а показана одна из первых конструкций водотрубного утилизационного котла с принудительной циркуляцией фирмы «Фостер Уиллер», построенная в начале 1930-х гг. Ее характерной особенностью является наличие на стальных трубах чугунного оребрения, увеличивающего поверхность нагрева и делающего котел более компактным. Агрегат имел поверхность нагрева 127 м² и при мощности главного двигателя 2 940 кВт обеспечивал 1,5 т/ч насыщенного пара в час. Сепаратор пара монтировался вместе с ним в виде единого блока. На рис. 2.39б представлена современная конструкция утилизационного котла этой же фирмы.

На судах отечественного рыболовецкого флота применение утилизационных котлов с принудительной циркуляцией началось во второй половине 1950-х гг. В этот период были созданы водотрубные аппараты типов КУП-15, КУП-19 и им подобные с гладкотрубными змеевиками (КУП — котел утилизационный паровой, далее площадь

нагрева в м²). Змеевики выполнялись в виде плоских горизонтальных спиралей, прикрепленных к двум вертикальным цилиндрическим коллекторам. Эти модели утилизаторов производили насыщенный пар с давлением 0,5–0,7 МПа.

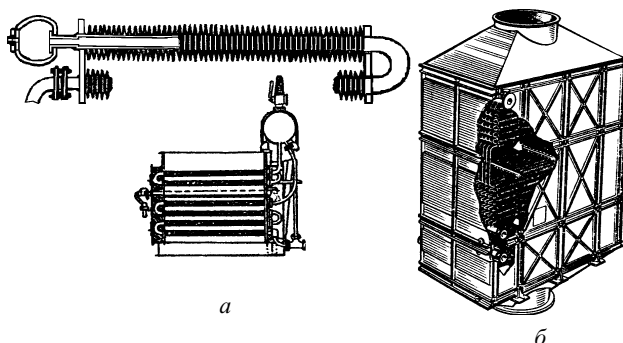


Рис. 2.39. Утилизационные котлы фирмы «Фостер Уиллер»

В 1970-х гг. отечественные утилизационные котлы были стандартизованы и выпускались трех типов: цилиндрические КУП-20С, КУП-40С, КУП-80С; прямоугольные с боковым подводом газов КУП-90С, КУП-150С; прямоугольные с нижним подводом газов КУП-160С, КУП-250С. Производительность самого крупного котла (КУП-250С) достигала 6 т/ч. Для транспортных судов различного назначения в 1960—1980-е гг. выпускались утилизаторы больших мощностей типов КУП-660, КУП-700, КУП-1100, производившие перегретый пар с давлением 1,0 МПа в количестве до 9,2 т/ч.

Наиболее мощный отечественный котел КУП-3100 был разработан для установки на газотурбоходы типа «Капитан Смирнов». Первое судно серии было введено в эксплуатацию в 1979 г. Производительность котла, рис. 2.40, достигала 26,5 т/ч при давлении пара 1,14 МПа и температуре перегрева 310 °С. Поверхность нагрева состояла из оребренных труб с наружным диаметром 22 мм. Диаметр ребер составлял 38 мм. Экономайзер 2 образывали 104 одноходовых змеевика, испаритель 3 состоял из

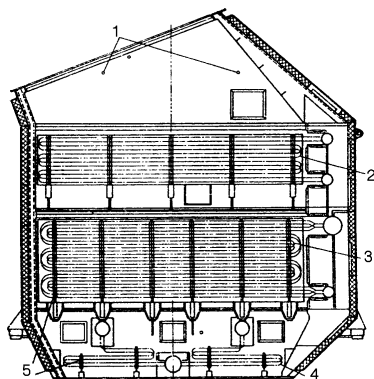


Рис. 2.40. Котел КУП-3100

такого же количества двойных змеевиков. Пароперегреватель 4 также состоял из 184 змеевиков. Полное омывание газами поверхности труб достигалось при помощи перегородок 5. Очистка поверхности нагрева путем ее обмыва производилась через устройства 1. Глубина утилизации тепла обработавших газов в этом котле достигала 54 % [41].

В развитии *тепловых схем* утилизационных котельных установок можно выделить несколько основных этапов. Установка с газотрубным котлом с естественной циркуляцией показана на рис. 2.41а. Она использовалась в первых системах с малой глубиной утилизации теплоты. Ее схема является наиболее простой. Производимый влажный насыщенный пар использовался в системе отопления, на хозяйственные нужды судна и потребности его ЭУ.

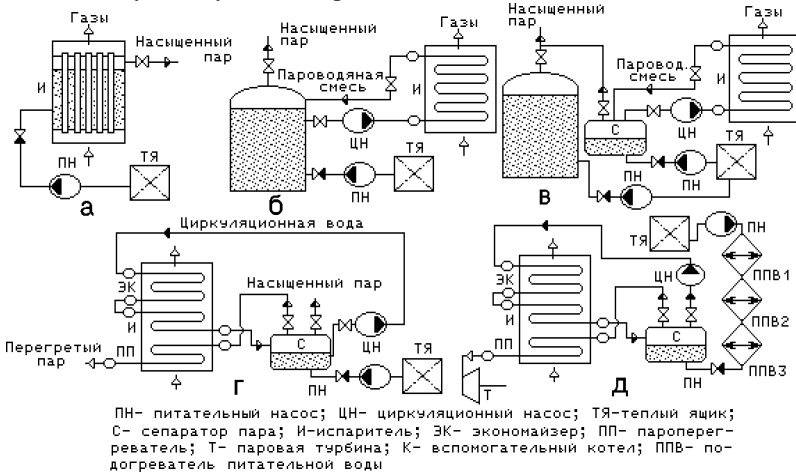


Рис. 2.41. Схемы систем утилизации

Стремление к более глубокому использованию тепла привело к созданию утилизационных котлов с принудительной циркуляцией, в которых движение воды и пароводяной смеси осуществлялось при помощи циркуляционного насоса. Использование принудительной циркуляции позволило сделать их компактными и удобными для размещения на судах. Однако это потребовало существенного усложнения схемы установки за счет введения в нее циркуляционного насоса и сепаратора пара. В некоторых системах этого типа в качестве сепаратора пара используется пароводяное пространство вспомогательного котла. В последние годы они получают все более широкое применение на судах зарубежной постройки.

Простейшие схемы утилизации тепла с котлами, имеющими принудительную циркуляцию, показаны на рис. 2.41б и 2.41в. Такие установки производят влажный пар с давлением 0,5—0,8 МПа.

В 1950-х гг., в связи с ростом мощности главных судовых дизелей, количество пара, производимого утилизационными установками на ходу судна, стало превышать обычную потребность в нем. В этот период появились первые системы утилизации, производившие перегретый пар с давлением 1,0—1,5 МПа и температурой 220—260 °С, рис. 2.41г. Пар использовался для привода турбогенератора, мощность которого на крупных судах могла превышать 600 кВт.

С начала 1970-х гг. получили распространение системы с глубокой утилизацией теплоты (СГУТ). Принципиальная схема одной из них показана на рис. 2.41д. В ней используется не только энергия уходящих газов, но и тепло охлаждающей воды, смазочного масла и наддувочного воздуха ДВС. Это тепло используется для подогрева питательной воды, проходящей через поверхностные подогреватели *ППВ 1, ППВ 2, ППВ 3*. Энергии пара, производимого подобными системами, достаточно не только для обеспечения нужд судна и работы утилизационного турбогенератора, но и для привода пропульсивной паровой турбины, работающей через передачу на гребной винт параллельно главному двигателю. Системы с глубокой утилизацией теплоты в настоящее время активно применяются в составе СЭУ транспортных судов большого водоизмещения.

На судах рыбопромыслового флота системы утилизации до недавнего времени не находили широкого применения. Это, в первую очередь, было связано с тем, что дизели этих судов значительную долю эксплуатационного времени работают с малыми нагрузками или на маневрах, что затрудняет использование тепла выпускных газов.

В 1960-х гг. часть больших морозильных рыболовных траулерах зарубежной постройки и отечественных производственных рефрижераторов была оборудована утилизаторами с принудительной циркуляцией. В 1970-х гг. утилизационные котлы устанавливались на транспортные рефрижераторы и большие морозильные траулера. Так, в состав СЭУ большого автономного морозильного траулера (БАТМ) типа «Пулковский меридиан» входят два котла с принудительной циркуляцией типа КУП-40СИ, обеспечивающих суммарную производительность до 1 400 кг/ч. Этого количества пара достаточно для покрытия потребностей судна на переходе в район промысла.

Промысловые суда малого и среднего водоизмещения утилизационных котлов, как правило, не имели. Однако начавшие поступать на рыбацкий флот в 1990-х гг. современные малые филейные траулеры (МФТ) и ярусоловные сейнеры (ЯМС), построенные в Германии и Норвегии, оборудованы современными автоматизированными утилизационными паровыми и водогрейными котлами.

В перспективе следует ожидать совершенствования схем утилизации теплоты, которыми будут оборудоваться энергетические установки с дизелями, и расширения областей их использования. Этот путь рассматривается как один из наиболее эффективных способов снижения расхода топлива и уменьшения эксплуатационных затрат в СЭУ.

2.6. КОТЛЫ НЕТРАДИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Стремление создателей котлов избавиться от их различных недостатков привело к попыткам использования в судовых условиях аппаратов нетрадиционных конструкций. Примером такого подхода является применение аппаратов с принудительной циркуляцией, конструкции которых впервые разработал инженер Ла-Монт. Их создание явилось попыткой преодоления дефектов естественной циркуляции, имевших место в мощных котлах. Проектирование последних из-за отсутствия надежных данных для расчета циркуляции велось на эмпирической базе вплоть до середины 1920-х гг.

Ла-Монт предложил равномерно распределять воду по параллельно включенным трубам, образующим поверхность нагрева, при помощи насоса. Котел его системы, рис. 2.42а, образован пароводяным коллектором 1, змеевиками поверхности нагрева 2 и циркуляционным насосом 3.

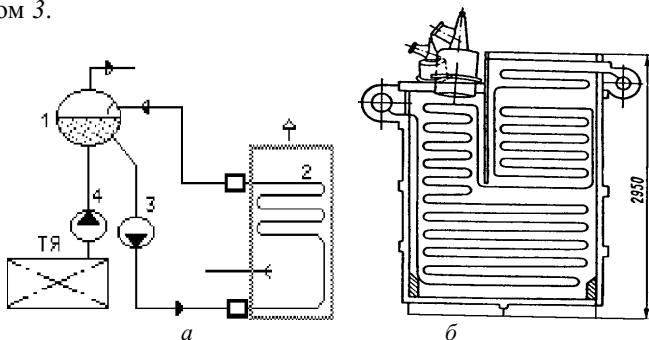


Рис. 2.42. Схема котла Ла-Монта

Он имеет такую же схему, как и утилизационная установка с принудительной циркуляцией. Котел питается водой, подаваемой в коллектор 1 от насоса 4. Равномерное распределение воды по отдельным змеевикам достигается установкой на входе в них специальных дроссельных шайб, выравнивающих гидравлическое сопротивление.

На рис. 2.42б показана схема вспомогательного котла системы Ла-Монта, установленного в конце 1950-х гг. на пароходах типа «Сергей Боткин». Он имел верхнее расположение топочных устройств, пароводяной коллектор (сепаратор пара) размещался отдельно. Поверхность нагрева котла составляла 59,2 м², его производительность была равна 1,8 т/ч насыщенного пара с давлением 0,4 МПа [27].

К достоинствам котлов с принудительной циркуляцией относилась возможность изготовления их поверхности нагрева из труб малого диаметра, легко компоновавшихся в плотные пакеты произвольной формы. Это позволяло создавать котлы, хорошо вписывавшиеся в ограниченные объемы судовых помещений. Их размещение на судне также облегчала небольшая высота. Высокая скорость движения воды в трубах способствовала меньшему загрязнению их накипью. Такие устройства оказались менее чувствительны к качеству питательной воды, чем котлы с естественной циркуляцией. Их главным недостатком являлось наличие циркуляционного насоса, работавшего в тяжелых условиях, выход которого из строя мог повлечь за собой аварию.

На рис. 2.43 показан мощный главный котел системы Ла-Монта, построенный в начале 1930-х гг. Он вырабатывал 70 т/ч перегретого до температуры 425 °С пара с давлением 3,5 МПа. Площадь поверхности нагрева была равна 918 м².

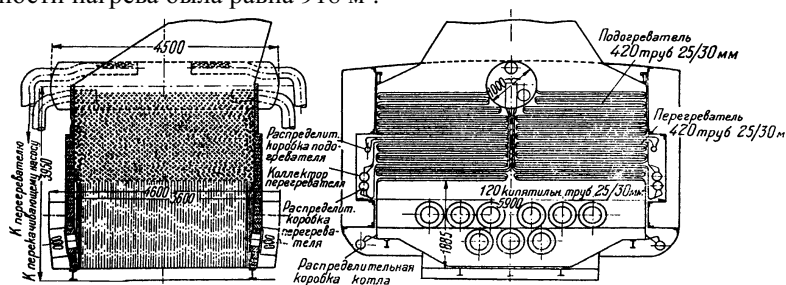


Рис. 2.43. Главный котел системы Ла-Монта

Отопление котла производилось с обоих фронтов при помощи 18 топочных устройств, работавших на мазуте. Кратность циркуляции воды (то есть, количество ее проходов по трубам до полного

испарения) составляла около 8,5 против 30—40 у котлов с естественной циркуляцией. Затраты мощности на привод циркуляционного насоса достигали 80 кВт [90].

Стационарные котлы Ла-Монта отечественной конструкции, разработанные Центральным котлотурбинным институтом (ЦКТИ), производились в 1930-е гг.

В середине 1930-х гг. предпринимались попытки совсем отказаться от применения в котлах с принудительной циркуляцией коллекторов. Роль сепаратора пара в них должен был выполнять специальный насос-сепаратор, в котором отделение пара от воды производилось за счет действия на пароводяную смесь центробежной силы, создаваемой вращающимся ротором [90]. Однако до использования их в судовых условиях дело не дошло.

Дальнейшее развитие котлов с принудительной циркуляцией протекало в направлении снижения ее кратности и перехода к однократной циркуляции. Агрегаты, в которых кратность циркуляции равна единице, получили название *прямоточных*. Впервые их идею в начале XIX в. предложил механик Степан Литвинов, работавший на Нерчинских заводах. Созданное им устройство, производившее пар для заводских нужд, получило название «водокалитель». Оно представляло собой шар, расположенный в топке. Внутрь шара, нагретого топочными газами, впрыскивалась вода. Образовавшийся пар отводился по трубе к потребителям.

В 1893 г. на Волге был построен паровой баркас, на котором установили прямоточный котел системы Д. И. Артемьева, работавший на мазуте. В 1898 г. инженеры П. Д. Кузьминский и Н. Ф. Пашинин разработали еще один тип прямоточного котла, состоявшего из двух параллельно включенных витков труб, являвшихся конвективной поверхностью нагрева. Трубы, свернутые в виде спиралей, образовывали несколько концентрических каналов, через которые проходили дымовые газы. Пароводяная смесь разделялась в центробежном сепараторе.

Несколько позже еще один вариант прямоточного котла предложил инженер В. В. Табулевич. Его конструкция представляла собой развитие описанной выше. Агрегат был образован *U*-образными трубами небольшого диаметра, расположенными в шахматном порядке. Трубы соединялись друг с другом при помощи колен и накидных гаек. Питательная вода поступала в нижние ряды труб, нагревалась в них до кипения, и в виде пароводяной смеси направлялась в верхние ряды, служившие пароперегревателем. Из них пар шел к потребителям.

Котел В. В. Табулевича с рабочим давлением 0,8 МПа установили на небольшом пароходе «Невка».

Несмотря на ряд преимуществ, производство судовых прямоточных котлов вскоре прекратилось. Основными причинами этого стали трудности их регулирования и обеспечения качественной подготовки питательной воды [2, 61].

За рубежом также велись работы по созданию прямоточных котлов. Достаточно успешными были опыты, выполненные в начале XX в. англичанином Бенсоном. Испарение в его котле происходило при давлении выше критического, при котором терялось различие между водой и паром. Если нагревать воду в этих условиях, то она без кипения переходит в пар. Полученный в змеевиках котла перегретый пар с давлением 25 МПа редуцировался, после чего перегревался вторично. Схема котла Бенсона показана на рис. 2.44. Он производил пар с давлением 7 МПа с температурой 425 °С и по массогабаритным показателям превосходил существующие водотрубные конструкции с естественной циркуляцией равной тепловой мощности [90].

Наиболее простую конструкцию имел прямоточный котел фирмы «Зульцер», производство которого началось в конце 1920-х гг. Он представлял собой, по сути, одну трубу, свернутую в змеевики и помещенную в газоход. В один конец этой трубы подавалась питательная вода, из другого — выходил перегретый пар. Главным недостатком этой системы являлось высокое гидравлическое сопротивление, требовавшее значительных затрат энергии на привод питательного насоса.

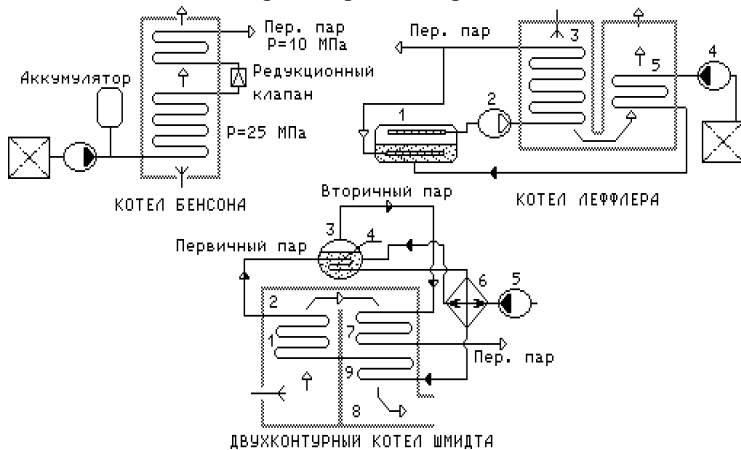


Рис. 2.44. Котлы систем Бенсона, Леффлера, Шмидта

В 1932—1934 гг. профессор В. Л. Рамзин предложил отечественную конструкцию прямоточного котла. Она, в отличие от системы «Зульцер», состояла из нескольких змеевиков, расход воды через которые регулировался при помощи дроссельных шайб. Котлы Рамзина широко использовались в стационарной энергетике.

Впервые в судовых условиях прямоточный котел был использован в начале 1930-х гг. на германском пароходе «Уккермарк» [87]. На судне, в порядке эксперимента, установили котел Бенсона, до этого находивший применение только на берегу. Хотя позднее подобные установки применили еще на нескольких судах, широкого распространения они не получили. Для обеспечения их надежной работы требовалась питательная вода очень высокого качества. Ее получение в судовых условиях оказалось сложной задачей.

Прямоточные котлы различных систем объединяет одна особенность — очень низкое водосодержание. Процесс производства пара в них должен быть организован таким образом, чтобы в любой момент времени соблюдалось равенство количеств тепла, выделяющегося при горении топлива, и уносимого из котла с паром. Одновременно должны быть равны количества поступающей в котел питательной воды и покидающего его пара. В противном случае агрегат может быть поврежден или перестанет производить пар требуемых параметров. Нарушения теплового и материального балансов могут наблюдаться при резких изменениях нагрузки, характерных для судовых ЭУ. Их предупреждение могло быть обеспечено только при наличии сложной системы автоматического регулирования, применение которой на судах не всегда оказывалось возможным.

Испарение воды в трубах прямоточного котла сопровождалось накоплением накипи. Накипь резко ухудшала теплообмен между газами и водой, она являлась причиной снижения паропроизводительности, экономичности и надежности. Стремление снизить накипеобразование привело к установке на прямоточных котлах сепараторов, из которых производилось продувание части воды с растворенными в ней солями. Такие аппараты получили название *прямоточных с сепараторами пара*. Аналогичное устройство использовал в одной из своих конструкций В. Л. Рамзин [87].

Проблема снижения накипеобразования в агрегатах других конструкций решалась иначе. Так, в котле Леффлера, рис. 2.44, образование отложений предотвращалось тем, что все его поверхности нагрева, обогреваемые газами с высокой температурой, омывались паром,

а не водой. Работала система Леффлера следующим образом: пар из коллектора 1, расположенного вне котла, паровым насосом 2 нагнетался в пароперегреватель 3 и затем поступал к потребителям, а часть его возвращалась обратно. Перегретый пар, постулавший в коллектор, испарял воду за счет своего тепла. Вновь образованный насыщенный пар шел в пароперегреватель. Питательная вода подавалась насосом 4 в экономайзер 5, расположенный в низкотемпературной зоне.

В 1920-х гг. конструкцию, способную работать на воде пониженного качества без опасности пережога труб, предложил профессор Шмидт. Котел Шмидта, рис. 2.44, действовал по принципу двухступенчатого испарения. Первичный пар с давлением 2—3 МПа производился в поверхности нагрева 1, располагавшейся в первом газоходе 2. Первичный пар поступал в пароводяной коллектор 3 и через поверхность теплообменника 4 отдавал свое тепло питательной воде, подававшейся насосом 5. Питательная вода проходила через подогреватель 6, где нагревалась за счет тепла конденсата первичного пара. Образовавшийся в результате испарения питательной воды вторичный пар шел в пароперегреватель 7, размещавшийся во втором газоходе 8. Для подогрева конденсата первого контура использовался экономайзер 9.

Котлы Шмидта в качестве главных судовых применения не нашли, так как вскоре после их создания были разработаны надежные методы водообработки, предотвращавшие загрязнение поверхности нагрева накипью. Идеи Шмидта позже были использованы в конструкциях так называемых *двухконтурных котлов*.

Двухконтурные котлы отечественной постройки периода 1940—1950-х гг., созданные на базе вертикальных водотрубных конструкций с паропроизводительностью 2—3 т/ч, устанавливались в качестве главных на нескольких сериях речных судов. В настоящее время подобные устройства применяются в качестве вспомогательных на тех судах, где существует опасность загрязнения конденсата нефтепродуктами.

Современный двухконтурный котел типа АТ-8 фирмы «Ольборг» производит до 80 т/ч перегретого вторичного пара с давлением 2,35 МПа. Пар используется для подогрева и мойки танков, а также привода мощных турбонасосов, используемых на танкерах для выгрузки нефтепродуктов.

Стремление к уменьшению габаритов, росту паропроизводительности и повышению маневренных качеств вызвало появление *котлов с наддувом*. В них воздух в топку нагнетался не традиционным

вентилятором, а компрессором, приводимым в действие газовой турбиной. Турбина вращалась газами, образующимися в топке котла.

Принцип газотурбинного наддува котла, выполненный подобно тому, как это сделано в ДВС, впервые нашел применение в агрегатах типа «Велокс» фирмы «Броун Бовери». В 1932 г. фирма создала судовую котел, схема которого представлена на рис. 2.45. Он состоял из топки, испарителя, пароперегревателя, внутреннего и внешнего экономайзеров. Воздух в топку подавался турбонаддувочным агрегатом (ТНА), в состав которого входили газовая турбина, воздушный компрессор, добавочный двигатель и устройство для регулирования мощности турбины и компрессора. Движение воды, пароводяной смеси и пара в аппарате происходило следующим образом. Вода вначале проходила через внешний и внутренний экономайзеры. Ее температура на выходе из последнего элемента поддерживалась ниже температуры насыщения на 30—40 °С.

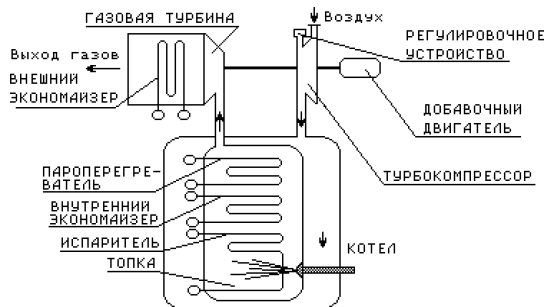


Рис. 2.45. Схема работы котла с наддувом

Если котел имел естественную циркуляцию, то вода поступала в водяной коллектор, затем по опускным трубам она направлялась в водяной коллектор и испарительные трубы. В котле же с принудительной циркуляцией вода после экономайзера шла в испаритель. Образовавшийся насыщенный пар двигался в пароперегреватель [33].

В 1935 г. французская компания «Электромеханик» установила котел «Велокс» на пароходе «Атос II». Ранее судно имело семь цилиндрических котлов производительностью по 8 т/ч каждый с рабочим давлением пара 1,4 МПа и температурой перегрева 290 °С. Мощность машин парохода до модернизации составляла 7 600 кВт. Вместо одного цилиндрического котла на судно поставили котел «Велокс», вырабатывавший 35 т/ч пара с рабочим давлением 5,8 МПа и температурой 480 °С. Мощность ЭУ после модернизации достигла 11 000 кВт [33].

Еще одним судном, переоборудованным таким способом, стал пассажирский пароход «Бор II», на котором в 1938 г. использовали два агрегата с производительностью по 8 т/ч при давлении пара 1,6 МПа и температуре 230 °С. Аналогичные котлы довоенной постройки успешно эксплуатировались на отечественном пароходе «Петродворец».

Схема ЭУ судна с котлами «Велокс» представлена на рис. 2.46 [90]. Жидкое топливо подается в топку через форсунку 1. В топке поддерживается давление газов, равное 0,5—0,6 МПа. Газы по специальным трубам 3 со скоростью 250—400 м/с проходят в пароперегреватель 4, а затем в газовую турбину 5. Отработавшие газы отводятся в атмосферу через экономайзер 6, установленный внутри дымовой трубы. Газовая турбина вращает компрессор 7, подающий воздух в топку. С компрессором через редуктор 8 соединены насосы: циркуляционный 10 и топливный 11. Характеристики насосов и компрессора согласовываются таким образом, чтобы подача топлива и воздуха, а также кратность циркуляции воды соответствовали нагрузке котла.

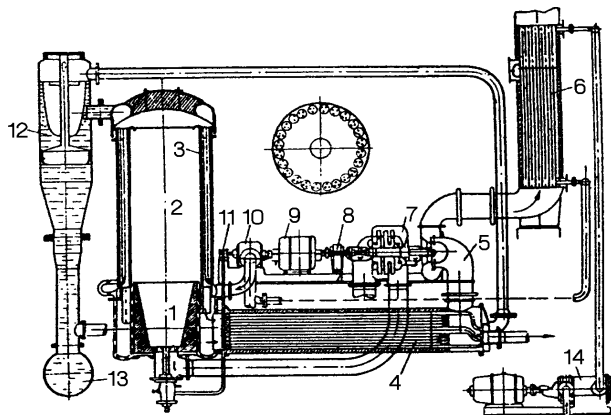


Рис. 2.46. ЭУ с котлами «Велокс»

Электромотор 9 используется для регулировки и изменения режима работы. Его включение изменяет подачу в топку топлива и воздуха, при этом меняется давление газов перед турбиной, в результате чего последняя переходит на новую нагрузку. Питательная вода подается насосом 14 через экономайзер 6 к циркуляционному насосу 10. Пар из котла поступает в центробежный сепаратор 12, а затем в пароперегреватель 4. Отделившаяся от него вода собирается в отстойнике сепаратора 13 и по трубе направляется к циркуляционному насосу.

В 1948 г. компания «Электромеханик» спроектировала для быстроходного пассажирского турбохода «Виль де Тунис» ЭУ с тремя котлами «Велокс» производительностью по 30 т/ч с давлением 5,8 МПа и температурой перегрева 480 °С. Мощность турбин судна составляла 11 000 кВт. В середине 1951 г. были проведены стендовые испытания первого котла, в ходе которых его КПД достиг 90,5 %. Два других агрегата установили на турбоход без испытаний. В феврале 1952 г. он отправился в море на испытания. Расход топлива при средней скорости 21,5 узла составил 157 кг на милю, что оказалось на 15 кг меньше расчетного. Максимальная скорость судна при работе двух котлов достигала 23 узлов [23].

По сравнению с традиционными типами, судовые котлы с наддувом имеют следующие преимущества: меньшие габариты и массу, высокую маневренность, малую продолжительность подъема давления пара, высокий КПД в широком диапазоне нагрузки. Снижение их массогабаритных показателей было достигнуто за счет повышения интенсивности теплообмена путем увеличения давления и скорости движения газов. Объем котла «Велокс» вдвое меньше обычного.

Маневренные качества котлов с наддувом могут быть охарактеризованы на примере одной из конструкций, разработанной американской фирмой «Фостер Уиллер»: она принимала нагрузку с 15 до 90 % от номинальной за 20, а сбрасывала ее — за 9 секунд [23].

Несмотря на успешный опыт эксплуатации котлов с наддувом, на гражданских судах широкого применения они не нашли. Причинами этого стали сложная конструкция, высокая стоимость изготовления и повышенные требования к уровню квалификации обслуживающего персонала. В 1950—1960-х гг. такие агрегаты рассматривались в качестве перспективных для применения в составе главных ЭУ. Так, в 1969 г. в Японии изготовили прямоточный агрегат, принятый в качестве прототипа при создании опытной паротурбинной установки быстроходного контейнеровоза. Однако быстрое совершенствование судовых дизелей привело к постепенному вытеснению с транспортных судов пароэнергетических ЭУ. В настоящее время котлы с наддувом используются в составе ЭУ быстроходных судов специального назначения и кораблей военно-морских флотов.

Первые отечественные корабельные котлы с газотурбинным наддувом и естественной циркуляцией воды типа КВН были созданы в 1960-е гг. Они имели паропроизводительность 95—98 т/ч, рабочее давление пара 6 МПа и температуру перегрева 470 °С. Воздух в их топ-

ки подавался с давлением 0,3 МПа. В 1982 г. взамен котлов КВН был разработан котел типа КВГ-3, рис. 2.47. В 1985 г. началась эксплуатация котлов типа КВГ-2М, а с 1990 г. — моделей типа КВГ-4.

Котел типа КВГ-3 имеет вертикальную двухколлекторную компоновку. Он оборудован пароперегревателем и экономайзером. Его парообразующая часть состоит из одного циркуляционного контура, включающего экран 1 и конвективный пучок труб 9. Опускные трубы 2 не обогреваются. Пароперегреватель 8 расположен за конвективным пучком труб. Первые два ряда пучка замкнуты на пароводяной коллектор, остальные — на верхний и нижний коллекторы. Экономайзер 6 змеевиковый горизонтальный гладкотрубный. Кожух 7 двухслойный, цилиндрический. Газы, поступающие к турбине компрессора ТНА проходят через газодинамическое очистное устройство 5. Топочное устройство 3 двухфронтное, имеет по три форсунки с каждого фронта. Турбонаддувочный агрегат 4 расположен выше котла. Недостаток мощности газовой турбины при его работе на малых нагрузках компенсируется работой специальной приводной паровой турбины. Производительность котла на номинальной нагрузке составляет 100 т/ч, расход топлива при этом равен 8 700 кг/ч. Температура уходящих газов на полной нагрузке равна 520 °С. Его КПД заметно уступает аналогичному показателю главных котлов транспортных судов и составляет всего 82 %. Масса котла КВГ-3 равна лишь

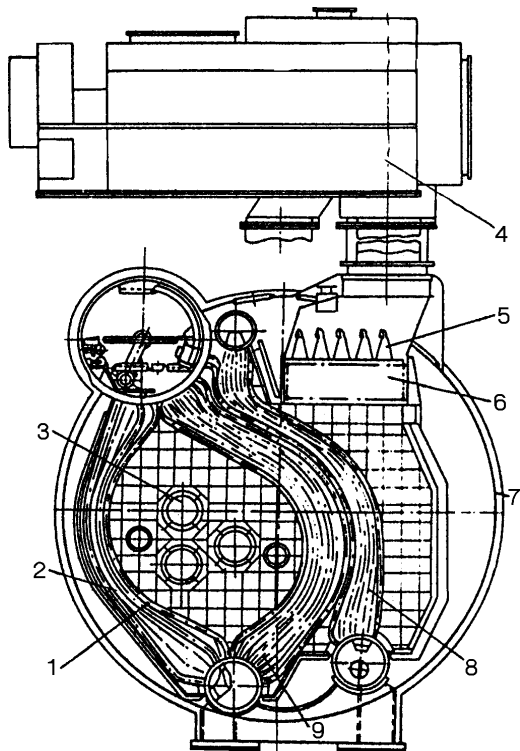


Рис. 2.47. Котел КВГ-3

100 т/ч, расход топлива при этом равен 8 700 кг/ч. Температура уходящих газов на полной нагрузке равна 520 °С. Его КПД заметно уступает аналогичному показателю главных котлов транспортных судов и составляет всего 82 %. Масса котла КВГ-3 равна лишь

37,5 т против 300 т у агрегата сравнимой мощности типа КВГ 80/80. Такой результат достигнут за счет резкого увеличения тепловой напряженности топочного объема (то есть мощности, приходящейся на 1 м³ топочного объема) до 17,5 МВт/м³ против 0,85—1,3 МВт/м³ у главных котлов гражданских судов с вентиляторным дутьем.

В начале 1990-х гг. в нашей стране велись работы по созданию более совершенного котла с наддувом типа КВГ-6 [24].

2.7. ТОПЛИВО И ТОПОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА СУДОВЫХ КОТЛОВ

До 70-х гг. XIX в. основными видами судовых топлив являлись дрова или каменный уголь. Дрова использовались для отопления котлов первых пароходов. Они, чаще всего, применялись на речных судах. Ввиду низкой теплоты сгорания (11 350—14 600 кДж/кг), небольшой плотности, а также малой экономичности первых пароэнергетических установок, дрова, занимавшие на судне много места, не позволяли достичь большой автономности плавания. Переход на отопление котлов углем с теплотой сгорания 24 000—31 000 кДж/кг и более высокой плотностью позволил заметно уменьшить удельный расход топлива.

Использование в качестве топлива каменного угля сопровождалось рядом неудобств. Среди них основными были сложности, связанные с его погрузкой на судно, организацией ручного обслуживания котельных топок, поддержанием в котлах постоянного давления пара и удалением шлака за борт.

Уголь на борт судна принимали различными способами. Одним из них была погрузка с барж. Уголь, хранившийся в трюмах баржи, засыпался лопатами в большие мешки, окантованные тросом. Наполненные топливом мешки подтаскивались к люкам в палубе баржи, затем несколько их прицепляли к тросу, опущенному с борта судна, и выбирали его лебедкой. Погрузка угля также могла производиться вручную при помощи обычных мешков или корзин, размещаемых в специальных беседках, спускаемых с борта судна. К началу XX в. было предложено несколько механизированных способов погрузки твердого топлива. Один из них заключался в использовании механических транспортеров, подававших его непосредственно на судно.

Принятый на судно уголь через специальные горловины засыпался в хранилища — угольные ямы, называемые также бункерами (от слова «бункер» произошел термин «бункеровка», которым в наше

время называют процесс приемки на судно жидкого топлива). Угольные ямы располагались в районе котельных отделений и делились на бортовые, палубные и поперечные. Они имели вентиляционные трубы. Попадание в угольные ямы воды и легковоспламеняющихся предметов не допускалось, курение внутри них категорически запрещалось.

Уголь при неправильном хранении имел склонность к самовоспламенению, во избежание которого экипаж не реже двух раз в сутки должен был контролировать температуру в угольных ямах. Тушение пожара, возникшего в бункерах, было сопряжено со значительными трудностями. Такое происшествие могло привести к гибели судна.

Конструкция топки оборотного котла с ручным обслуживанием, предназначенной для слоевого сжигания угля, показана на рис. 2.48. Она сложилась, в основном, к 70-м гг. XIX в. и сохранялась практически без изменений до 50-х гг. XX в.



Рис. 2.48. Угольная топка

Основой топки является жаровая труба. Колосниковая решетка 1 опирается на балки 2, прикрепленные к стенке жаровой трубы. Спереди топка закрыта фронтальной топочной рамой 3, закрепленной на переднем днище котла. В раме имеются два отверстия: через топочное 4 забрасывают уголь и чистят топку; через поддувальное 5 подают воздух и удаляют провалившиеся сквозь колосниковую решетку шлак и золу. С обратной стороны топочной дверцы установлен отражательный лист 7. Его назначение — защита топочной дверцы от прогорания. Поддувальная дверца 8 имеет специальный зубчатый стопор, которым она фиксируется в открытом положении. Изнутри фронтальной рамы крепится «мертвая» доска 9, не имеющая отверстий. Горение топлива на ней протекает медленно, чем предотвращается сильный нагрев и прогорание топочной рамы. За колосниковой решеткой установлен чугунный стул 10, на котором выложен кирпичный порог 6. Порог предотвращал попадание угля в огневую камеру и позволял увеличить скорость движения газов с целью интенсификации

теплообмена. Отверстие в стенке стула служило для удаления из огневой камеры шлака. При работе котла оно закрывалось крышкой.

Сжигание угля в такой топке происходило в следующем порядке. Вначале кочегар забрасывал уголь на шлаковую подушку, затем, по мере выгорания топлива и образования шлака, он «шуровал» слой, то есть равномерно распределял его по колосниковой решетке. После сгорания угля и появления шлаковой подушки в нижней части горящего слоя топка очищалась. Периодичность чистки зависела от качества угля и нагрузки котла и колебалась от двух до восьми часов. Обычно в течение вахты чистилась одна топка. На эту процедуру квалифицированный кочегар затрачивал четыре-пять минут, не допуская при этом значительного снижения паропроизводительности и давления, а значит, — падения мощности ЭУ.

Шлак, выгребаемый из топки, вываливался перед фронтом котла, заливался водой и остывал. Остывший шлак удалялся из котельного отделения при помощи лебедок с паровым, ручным или электрическим приводом, а также специальными водяными эжекторами. На рис. 2.49а приведена схема лебедки для удаления шлака с паровым приводом. Двухцилиндровая реверсивная паровая машина мощностью 6—12 кВт с цилиндрами диаметром 100—150 и ходом поршня 120—180 мм приводила в действие грузовой барабан, на который наматывался трос с прикрепленной к нему мусорной кадкой. Шлак отделения поднимался на верхнюю палубу, а оттуда сбрасывался за борт. Грузоподъемность таких лебедок достигала 600 кг.

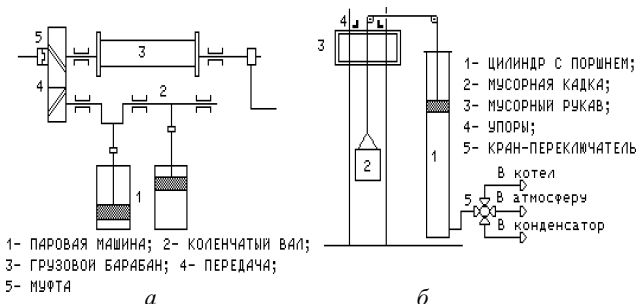


Рис. 2.49. Схемы устройств для удаления шлака

На рис. 2.49б показана схема подъемно-вакуумного устройства, называемого машиной Кромптона. Оно работало следующим образом. Шлак загружался в мусорную кадку, затем при помощи крана-переключателя полость цилиндра сообщалась с конденсатором. Под дей-

ствием атмосферного давления поршень двигался вниз и поднимал мусорную кадку. Движущаяся кадка ударялась об упоры, опрокидывалась и шлак вываливался за борт через мусорный рукав. Для возвращения кадки следовало сообщить нижнюю полость цилиндра с атмосферой, в результате чего она опускалась под действием собственного веса. Однако при этом атмосферный воздух попадал в конденсатор, снижая вакуум и приводя к падению экономичности главной машины.

Общая численность кочегаров крупных судов и кораблей могла достигать нескольких сотен человек. Так, построенный в 1907 г. британский трансатлантический лайнер «Мавритания» водоизмещением 38 000 т с мощностью ЭУ 50 000 кВт, имел штат кочегарной команды 446 человек [72]. В ее состав входили, кроме собственно кочегаров, штивщики — вспомогательные рабочие, обязанностью которых было доставлять уголь из бункеров к топкам и удалять за борт образующийся шлак. Тяжелые условия труда кочегаров и штивщиков в жаре, приближающейся к 50 °С, нередко вызывали тепловые удары и гибель людей. Для защиты интересов моряков к началу XX в. в большинстве стран были приняты законы, регламентировавшие условия труда кочегаров. Так, в Англии им запрещалось перебрасывать за вахту более трех тонн угля.

Первые попытки механизации топочного процесса стали предприниматься в конце XIX в. Впервые механическую подачу угля применили в 1883 г. в береговых оборотных котлах, оборудованных установкой Бенниса. Она имела механическую *V*-образную лопату, уголь на которую насыпался сверху.

Наиболее ранняя судовая механизированная установка для подачи твердого топлива была использована в 1896 г. на испанском каботажном судне «Эсперанца». Ее испытания прошли удовлетворительно, скорость парохода повысилась на один узел, экономия угля составила 30 % [80]. В начале XX в. на судах, оборудованных водотрубными котлами, использовалось устройство Тейлора, в котором уголь подавался снизу под наклонную колосниковую решетку, выжимаясь сквозь нее при помощи механического толкателя.

К середине 1920-х гг. конструкции механических топочных устройств, в основном, сложились. В 1927 г. американский паротурбинный сухогруз «Мэрсер» был снабжен устройством, подававшим уголь из бункеров к двум шаровым мельницам, после которых он в измельченном виде поступал в топку двух шотландских котлов. Судно совершило несколько рейсов общей протяженностью 30 000 миль.

Положительный результат, полученный в ходе эксплуатации «Мэрсера», подтолкнул судовладельцев к продолжению опытов с «механическим кочегаром». Они переделали топки котлов двух старых сухогрузов под механическое сжигание угля, а компания «Бурвинт-Вайт-Коул» заказала два новых углевоза с подобными устройствами. Экономический кризис 1930 г. положил конец экспериментам: облегчение ручного труда в условиях безработицы было невыгодно [50].

Механизация топочного процесса шла в направлении автоматизации всех трех его составляющих (заброски угля, шуровки, удаления шлака) или их части. Использование механического или пневмомеханического *забрасывателя*, рис. 2.50а, позволяло автоматизировать одну или две операции: при неподвижной колосниковой решетке — загрузку угля; при подвижной — загрузку угля и удаление шлака. Механический забрасыватель 4 в виде лопаток вращался со скоростью 300—700 об/мин. Дальность заброса регулировалась заслонкой 3.



Рис. 2.50. Схемы механизации сжигания твердого топлива

Автоматической очистки топки достигли применением *качающихся колосников*. Они могли разворачиваться на угол 60°, в результате чего шлак проваливался в щели между ними. Шуровки слоя такие топки практически не требовали. С конца 1930-х гг. стали использоваться топки, оборудованные *подвижными колосниками*. Их схема представлена а рис. 2.50б. Колосниковая решетка выполнялась в виде подвижной цепи. Колосники 5 двигались с регулируемой скоростью 2—25 м/ч при помощи двух цепей 1, приводимых в действие от электродвигателя мощностью 1,5—3 кВт через редуктор 4, вал 3 и звездочки 2. Цепи были связаны между собой балками 6, к которым прикреплялись колосники. Уголь из бункера сыпался на колосники за счет собственного веса, толщина его слоя регулировалась специальной заслонкой.

На рис. 2.50в показана топка с *шурящей планкой*. Проект первой отечественной топки подобного появился в 1940 г., а с 1949 г. их стали

производить серийно. В этих устройствах все три операции были механизированы. Они имели неподвижную колосниковую решетку, поверх которой при помощи цепи перемещалась особая трехгранная балка, называемая шурующей планкой. Цепь располагалась в щели, размещавшейся в середине колосниковой решетки, и приводилась в движение от звездочки, вращавшейся в различных направлениях. Шурующая планка совершала возвратно-поступательные движения. Она подавала свежий уголь, разравнивала его по решетке, сбрасывала шлак в сборник и поддерживала заданную толщину угольного слоя. Планка находилась в действии около 30 секунд, затем она отводилась под загрузочный бункер, где остывала. Длина ее хода могла регулироваться.

Топками с шурующей планкой были оборудованы вертикальные водотрубные котлы сухогрузных судов типа «Коломна». Они обеспечивали производство 6,5 т/ч пара с температурой 335 °С и давлением 1,6 МПа. Их КПД на номинальной нагрузке составлял 76 %.

Основным недостатком рассмотренных механических топок являлась невозможность полного сжигания угля. Этот недостаток был преодолен переходом к сжиганию мелкоразмолотого угля во взвешенном состоянии. Одним из первых использовать угольную пыль в качестве топлива еще в 1865 г. предлагал П. Д. Кузьминский. Однако в то время его идеи не могли быть технически реализованы.

Впервые сжигание угольной пыли удалось осуществить в конце XIX в. Это стало возможным благодаря работам русского ученого Г. Ф. Делпа и германского инженера Шварцкопфа. Последний разработал устройство для подачи в топку угольной пыли, представлявшее собой вращающуюся металлическую щетку, на которую из бункера сыпалась угольная пыль. Несмотря на удовлетворительную работу, это приспособление применения не нашло, так как не давало особых преимуществ перед слоевым сжиганием, но требовало значительных затрат энергии на предварительный размол угля.

Практически пригодные результаты сжигания угольной пыли были получены в Германии в 1921—1925 гг. К середине 1930-х гг. удалось разрешить основные проблемы, препятствовавшие использованию пылевидного топлива, после чего началось его активное применение в стационарной энергетике. В этот же период появились судовые котлы, оборудованные топками для сжигания пылевидного топлива.

Первая отечественная установка подобного типа была установлена в 1935 г. на пароходе «Георгий Димитров». Ее принципиальная схема показана на рис. 2.51. Из бункера 1 уголь поступал в дробилку 2,

в которой производится его предварительное разрушение до кусков с размерами 15—20 мм. Затем измельченный уголь проходил электромагнитный сепаратор 3 и поступал в мельницу 4, в которой он оконча-

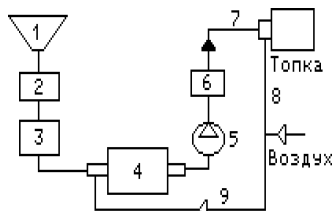


Рис. 2.51. Приготовление угольной пыли

тельно размалывался. Образовавшаяся угольная пыль подсушивалась горячим воздухом, подаваемым по воздухопроводу 9. Получившаяся при этом воздушно-угольная смесь вентилятором 5 нагнеталась в сепаратор 6, в котором от нее отделялись наиболее крупные частицы. Очищенная смесь подавалась в горелку 7, к которой по воздухопроводу 8 поступал необходимый для горения воздух.

Основным механизмом рассмотренной установки являлась угольная мельница. Существовало несколько их типов: шаровые, пневматические, ударные. Наиболее надежными считались тихоходные шаровые мельницы, но в силу своих значительных размеров и массы на судах они применения не нашли. Более подходящими для судовых условий оказались быстроходные ударные мельницы. Мельница системы Раймонда, широко применявшаяся в 1930-х гг., состояла из бронированного корпуса, внутри которого с частотой 1 500 об/мин вращались диски с билами. Удары била по углю и угля о корпус приводили к образованию пыли. Расход электроэнергии на ее приготовление и транспортировку к горелкам обычно составлял 18—20, а в отдельных случаях — 35—40 кВт·ч/т.

Сжигание угольной пыли производилось при помощи горелок, по устройству напоминавших паровые форсунки. Схема одного из вариантов такой горелки приведена на рис. 2.52а. Конструкция топki огнетрубного котла для сжигания угольной пыли показана на рис. 2.52б.

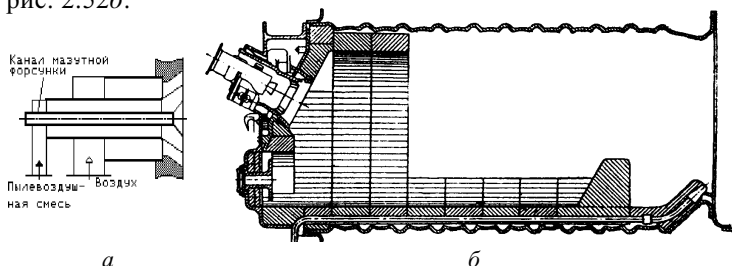


Рис. 2.52. Устройства для сжигания угольной пыли

Ее гофрированная жаровая труба на значительной длине футерована жаропрочными блоками. Температура в угольной топке достигала 1 500 °С, то есть была значительно выше, чем в мазутной.

Уголь в судовых котлах широко применялся до конца 1950-х гг. Если в 1914 г. 96,6 % пароходов мирового торгового флота в качестве топлива использовали каменный уголь, то к 1962 г. общий тоннаж подобных судов составлял менее 3 % [48].

Предпосылки для полного перевода судовых котлов на сжигание жидкого топлива сложились в конце 1950-х гг. В это время резко выросли объемы добычи нефти, количество производимых нефтепродуктов, понизилась их стоимость. К середине 1960-х гг. от использования угля в СЭУ отказались повсеместно и, как тогда казалось, навсегда. Однако в начале 1980-х гг. за рубежом стали появляться первые современные судовые паротурбинные установки с котлами, работающими на угле. Возврат к нему стал возможен в результате совершенствования способов бункеровки судов топливом и удаления шлака, внедрения топок с «кипящим слоем», полной автоматизации процессов его подготовки и подачи к топкам. Сжигание угля в современных котлах производится тремя способами: слоевым, в виде пыли, в «кипящем слое» (то есть гранулированного топлива в воздушном потоке).

Наиболее перспективным считается третий способ. Его использование позволяет уменьшить объем топки и габариты поверхностей нагрева за счет более интенсивного, чем в котле с мазутным отоплением, теплообмена. Так, котлы фирмы «Energy Equipment» с производительностью 27 т/ч имеют габариты мазутных, вырабатывающих 4,5 т/ч.

Мощность ЭУ зарубежных судов с угольным отоплением составляет 9 000—18 000 кВт. Их тепловые схемы упрощены: они предусматривают вторичный перегрев пара. Котлы производят пар с давлением 5—6 МПа и температурой 495 °С. На грузовом судне «Ривер Бойн» японской постройки, оборудованном паротурбинной установкой мощностью 13 975 кВт, установлены котлы, работающие на угле со слоевым сжиганием. Удельный расход топлива в этой установке составляет 660 г/(кВт·ч). Подача угля к котлам осуществляется при помощи воздуха с давлением 0,25 МПа. Возможно, что в ближайшие годы следует ожидать дальнейшего совершенствования подобных главных котельных установок, но они вряд ли смогут составить существенную конкуренцию дизельными СЭУ. Область их использования будет, вероятнее всего, ограничена каботажными перевозками в районах, близких к угольным месторождениям [34].

Значительное повышение экономичности судовых парознергетических установок было достигнуто в результате перевода котлов на отопление *жидким* топливом. Его теплота сгорания составляет 39 000—42 000 кДж/кг, то есть в полтора раза выше, чем у каменного угля. Применение жидкого топлива увеличило автономность плавания судов, облегчило процесс бункеровки, улучшило условия труда экипажей и позволило автоматизировать процесс сгорания.

Переход с дровяного и угольного отопления котлов на нефтяное потребовал разработки специальных приспособлений для сжигания жидкого топлива. Первыми в середине XIX в. были предложены *каскадные* топки. Топливо — мазут или сырая нефть — последовательно стекало в них по специальным ступенчатым направляющим. Горение было неполным, в результате котел интенсивно загрязнялся нагаром. Распространения такие несовершенные устройства не получили [2].

Следующим шагом в попытке внедрения на судах жидкого топлива стали приспособления, в которых происходило *дробление* топливных струй на отдельные крупные капли. Первым подобный аппарат в 1843 г. разработал французский ученый Пекле. В нем топливо, вытекающее из небольших отверстий, перед подачей в топку разбивалось на тонкие струи. Конструкция аппарата оказалась неудачной и не получила признания. В 1862 г. в США был выдан патент на еще одно устройство для отопления судовых котлов нефтью. В нем она поступала в топку в виде крупных капель, которые затем воспламенялись.

Разрабатывались и другие системы отопления (Хана и Льюитона, Маккинея и др.), в которых предлагалось выполнять под топку пористым и пропитывать его нефтью. По мере ее выгорания следовало осуществлять дополнительную пропитку. В Англии появились системы, обеспечивавшие подачу *газифицированного* топлива (паров нефти или газов, образовавшихся из нее из-за нагревания жаром самой топки). Одна из них — система Фуа — была даже установлена на пароходе «Палос», но применения не нашла, так как ее действие сопровождалось взрывами еще во время испытаний [7].

Качественное сжигание жидкого топлива могло быть достигнуто только в результате его *распыливания* на мелкие капли, которое не предусматривалось ни в одной из ранних систем отопления. Кроме распыливания необходимо было также решить еще ряд задач, среди которых основными являлись:

— организация тщательного перемешивания капель и воздуха;

- бесперебойная подача воздуха в зону горения;
- обеспечение постоянного подвода тепла к месту ввода топлива в топочную камеру.

Первым комплексно эти задачи решил в 1865—1866 гг. русский инженер А. И. Шпаковский. Его работы увенчались созданием первой форсунки, работавшей на скипидаре, распыливаемом сжатым воздухом. Производительность форсунки Шпаковского автоматически изменялась при помощи первого в мире регулятора давления пара. Он управлял подачей топлива в зависимости от давления пара в котле.

Шпаковский также в 1869 г. первым реализовал отопление котла мазутом или сырой нефтью, распыливаемыми паром. Форсунку, схема которой показана на рис. 2.53, он в 1870 г. установил на каспийском пароходе «Иран». Топливо поступало по трубе 1 через регулирующий клапан во внутренний канал форсунки 2. Распыливающий пар двигался по паропроводу 3 в кольцевую полость, образованную между корпусом форсунки и ее внутренним топливным каналом. Воздух для горения подавался в топку через отверстие 4.

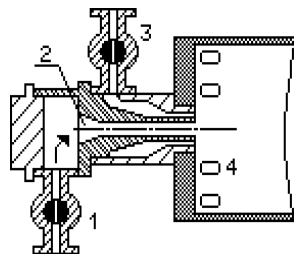


Рис. 2.53. Форсунка Шпаковского

В том же 1870 г. форсунками Шпаковского снабдили пароход «Алексей» и железную шхуну «Россия». Кроме Шпаковского, удачные опыты по отоплению судовых котлов нефтяными остатками в 1872 г. производили инженеры Каменский в Баку и Порецкий в Николаеве [10].

К началу 70-х гг. XIX в. Россия стала первой страной, в которой в широких масштабах практиковалось нефтяное отопление котлов гражданских судов. Журнал «Русское судоходство» в 1889 г. сообщал: «РОПиТ (Российское Общество пароходства и торговли. — С. Г.) в настоящее время проводит опыт отопления пароходов нефтеостатками. Для первых опытов Общество употребило один из больших срочногогрузовых пароходов крымско-кавказской линии “Святослав”, на котором были сделаны все необходимые изменения в системе отопления для замены угля нефтеостатками... Общество вошло в сношение с нефтеперерабатывающими заводами в Новороссийске, которые будут снабжать пароходы нефтяными остатками. Ожидают, что перемена топлива доставит Обществу большие сбережения» [58].

Спустя пять лет этот же журнал писал: «Весьма интересно сведение о возможности плавания без кочегаров, чем целый класс труженников освобождается от чрезвычайно мучительной и опасной работы у котлов — что в особенности важно для России, обладающей наибольшим изобилием нефти... Раньше пароходы, плававшие по Каспийскому морю, отапливались дровами. Но так как вдоль каспийского побережья очень мало дров, и они не только дороги, но и громоздки, то вскоре нашли более полезным заменить их нефеостатками...» [59].

На кораблях применение жидкого топлива началось позже, чем на торговых. В 1875 г. одной из первых на отопление котлов мазутом была переведена канонерская лодка Балтийского флота «Пицаль». В 1880-х гг. нефть широко использовалась на миноносцах. Однако позже от применения жидкого топлива на кораблях отказались из-за опасений, что его воспламенение в боевых условиях может привести к их гибели от пожаров. Вернулись к нефтяному отоплению корабельных котлов уже перед первой мировой войной 1914—1918 гг.

В конце 1870-х— начале 1880 гг. форсунка А. И. Шпаковского была усовершенствована. На отечественных судах, кроме нее, применялись форсунки конструкции Калашникова, Ленца, Александрова, Шухова. В. И. Калашников устранил недостатки существующих устройств. Он придал пламени форму полуконуса, обеспечив к нему доступ воздуха со всех сторон. Это позволило добиться более полного сгорания за счет равномерного прогрева факела. Форсунки Калашникова получили широкое распространение: в 1884—1896 гг. их установили на волжских пароходах более 700 шт. [25].

Одну из наиболее удачных конструкций форсунок в 1880 г. предложил В. Г. Шухов, рис. 2.54а. Распыливание топлива в ней осуществлялось за счет кинетической энергии струи пара. Мазут подводился через внутренний канал круглого сечения, пар поступал через концентрично расположенную кольцевую щель. Регулировалась производительность форсунки винтом, изменявшим величину кольцевой щели. Существовали и другие виды форсунок, схожие с рассмотренной, например, — с плоскими щелевидными отверстиями, рис. 2.54б.

Кругло- и плоскопламенные форсунки, получившие название *паровых*, отличались простотой устройства, надежностью, широким диапазоном регулирования производительности. Топливо к ним подавалось самотеком. Их главным недостатком являлся высокий расход пара на распыливание, достигавший 0,6 кг на 1 кг сожженного топлива у круглопламенных и 0,5 кг/кг у плоскопламенных. Распыливание топ-

лива при помощи пара сопровождалось значительными потерями конденсата. Кроме пара, можно было использовать сжатый воздух, но это требовало воздушного компрессора и затрат энергии на его привод.

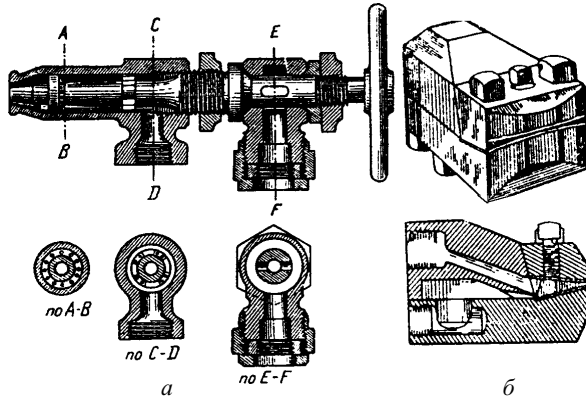


Рис. 2.54. Паровые форсунки

Стремление к снижению потерь пара привело к созданию форсунок, в которых распыливание топлива производилось за счет давления, создаваемого топливным насосом. Такие форсунки получили название *механических центробежных*. Первую механическую форсунку предложили в начале 90-х гг. XIX в. инженеры петербургского Тентеловского завода. В 1894 г. ее модернизировал инженер Шенснович. Топочные устройства его конструкции в 1895 г. были установлены на электростанции в Новороссийске.

Вариант механической форсунки, так называемой *лабиринтной*, показан на рис. 2.55а. В ее головке находится винтовой распылитель, обеспечивавший интенсивное закручивание топливной струи, вызывавшее ее разрушение под действием центробежной силы.

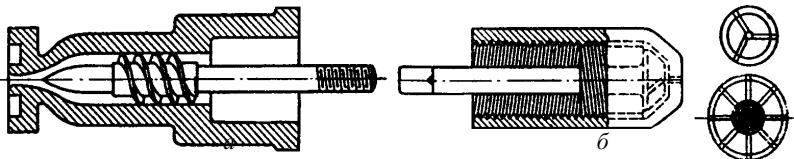


Рис. 2.55. Ранние варианты механических форсунок

На рис. 2.55б показан распылитель с тангенциальными каналами от форсунки фирмы «Бабкок и Вилькокс». Его форма близка к современной. Топливо, подаваемое к распылителю под давлением

1,0—1,2 МПа, проходило через специальные каналы небольшого сечения, приобретало вращательное движение и в виде зонтика через сопло поступало в топку. Факел формировался под действием воздуха, нагнетаемого вентилятором в топку через специальные воздугонаправляющие устройства, образованные неподвижными лопатками, закручивавшими воздушный поток.

С 1920-х гг. на судах широкое применение нашли топочные устройства фирмы «Тодд» с механическими форсунками, рис. 2.56. На ствол форсунки 1 навинчена распределительная шайба 2. Топливо подводится через канал в рукоятке 3 и ствол к отверстиям распределительной шайбы 4 и к тангенциальным каналам распылителя 5. Распылитель имеет вихревую камеру *a*, топливо в которую подается через тангенциальные каналы *b*. В вихревой камере оно приобретает интенсивное вращательное движение и с высокой скоростью выбрасывается через сопло *c*. Расход воздуха регулируется при помощи поворотных направляющих лопаток *б*. Конический диффузор 7 со щелями на поверхности предназначен для обеспечения устойчивости факела и улучшения условий зажигания топливоздушной смеси.

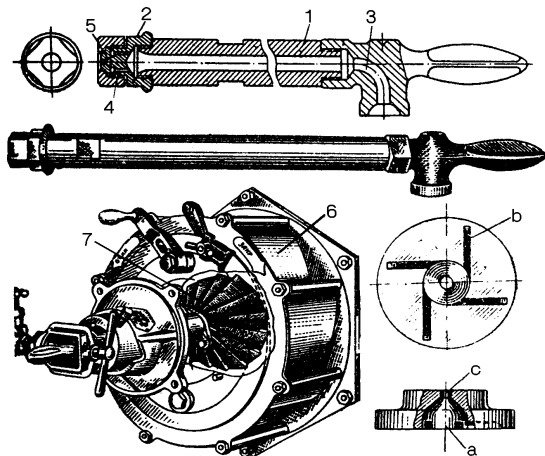


Рис. 2.56. Топочное устройство «Тодд»

Несколько позже котлы стали оборудовать паромеханическими форсунками, сочетающими принципы действия своих предшественниц — механической и паровой. Их распылители имели по два набора тангенциальных каналов: для подачи пара и подвода топлива.