

Котельную установку таких пароходов образовывали от двух до шести огнетрубных оборотных котла, работавших на твердом топливе и производивших насыщенный или слабоперегретый пар. Вспомогательные механизмы имели, как правило, паровой привод. Скорость судов при мощности машин 500—1 800 кВт составляла 8—12 узлов.

На рис. 1.17 показано расположение основных элементов пароэнергетической установки в корпусе американского транспортного судна «Стейт оф Калифорния», построенного в 1888 г.

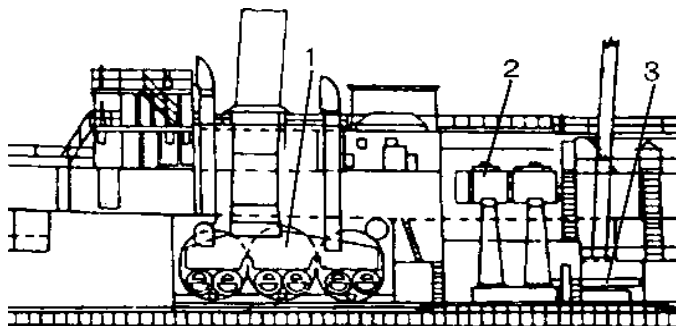


Рис. 1.17. Размещение элементов пароэнергетической СЭУ в корпусе транспорта «Европа»:

1 — паровые котлы; 2 — главная машина; 3 — валопровод

Судно, в российском флоте называвшееся «Европа», было оборудовано двухцилиндровой машиной системы «компаунд» мощностью 1 490 кВт при частоте вращения 70 об/мин.

Цилиндр низкого давления этого парового двигателя имел диаметр 1 850 мм, цилиндр высокого давления — 1 070 мм. Ход поршня составлял 1 300 мм. Он вращал гребной винт с диаметром 4,88 и шагом 7,62 м. Масса этого агрегата составляла 196 т. Пар для него вырабатывали шесть двухтопочных огнетрубных оборотных котла, имевшие общую массу 130 т. В корпусе парохода, весившем 1 440 т, для них размещался запас угля, равный 1 000 т. Скорость полного хода судна достигала 13 узлов [37].

Аналогичное расположение главных механизмов имели транспортные пароходы, оборудованные поршневыми паровыми машинами трехкратного расширения, строившиеся в период 1900—1940-х гг. План машинного и котельного отделений таких судов показан на рис. 1.18.

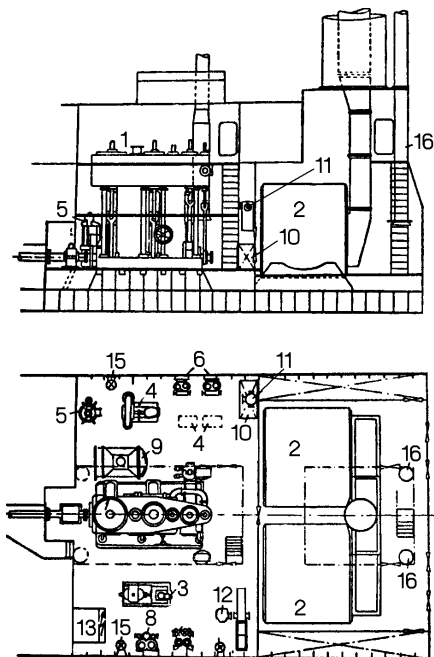


Рис. 1.18. Размещение пароэнергетической установки с машиной трехкратного расширения:

1 — главная машина; 2 — главные котлы; 3 — паровая динамомашинка; 4, 5, 6, 7, 8 — циркуляционный, мокровоздушный, питательный, балластный, пожарный насосы; 9 — главный конденсатор; 10 — теплый ящик; 11 — подогреватель питательной воды паровых котлов; 12 — вентилятор; 13 — распределительный щит; 14 — фильтры; 15 — клинкеты; 16 — вентиляционные трубы

Совершенствование конструкции и тепловых схем судовых пароэнергетических установок с поршневыми машинами протекало вплоть до конца 1950-х гг. Его основные этапы рассмотрены в последующих главах этой книги.

ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ СУДОВЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Первые стационарные цилиндрические и сферические котлы. Специальные судовые котлы. Два направления в развитии котельной техники. Тенденции развития огнетрубных судовых котлов и их характерные особенности. Водотрубные котлы, их основные конструктивные схемы. Комбинированные конструкции. Схемы утилизации тепла ДВС.

Особенности использования твердого топлива. Механизация топочных процессов. Современные твердотопливные котлы. Первые опыты по нефтяному отоплению. Выгоды от замены твердого топлива жидким. Топочные устройства для сжигания жидкого топлива, их сравнительные характеристики. Организация подачи воздуха в топку котлов и удаления отработавших газов.

2.1. ПЕРВЫЕ СУДОВЫЕ КОТЛЫ

Котлы являются неотъемлемой частью судовой пароэнергетической установки. В XVII—XVIII вв. стационарные паровые котлы выполнялись в виде цилиндрических или сферических сосудов, обмурованных кирпичной кладкой. Котел, построенный в 1756 г. И. И. Ползуновым для его паровой машины, был образован верхней частью, выполненной в виде полусферы, вогнутым днищем и боковыми стенками. Топка, работавшая на твердом топливе, располагалась под котлом. Дымовые газы омывали вначале его днище, затем боковые стенки, после чего уходили в дымоход. Кожухом служила кирпичная кладка.

Вот как описывал конструкцию котла сам изобретатель: «...он должен быть из ковanej меди... Величиною же оной в диаметре по горизонту в пять, уступы, коими висеть будет на печи, с половиною, от горизонта до дна в полтора, а от горизонта до свода, где примкнется регулятор паров, в два с половиною; диаметр же дна три с половиною фута. В нем кубичное содержание воды около восемнадцати, а порой тридцать четыре фута. На верхнем оного своде овал, мерою по длине восемнадцать, шириною, сквозь которой для починки и поправления в котел проходить бы человеку было можно, на что также накрывать медною доскою, к коньцу пришлифованною, и прикреплять винтами. В которой приделать две пробные трубки с ключами, самые тонкие, и одна другой опущенные в котел ниже на три дюйма, так что одна сколько до горизонта воды не дойдет, а другая концем столько же

ниже горизонта в воду опустится. И в то время, как вода кипит, чрез оные можно знать, сколь высоко ее в котле стоит..

Недостаток же воды, что тратится из котла и выходит в цилиндр парами, снабдит питательная трубка от ключа, из которой по малой препорции пустить должно беспрерывно воды столько, сколько в котле требует убыль; и питательная ж трубка должна быть не малой вышины, дабы тягостию воды, которая в ней, против упругости в котле стоящих паров противиться могла. Сверх же того в своде котла должно быть еще двум трубкам: и одной паровой и при ней на оболочках свинцовый фентель, а другой фентельной с фентелем же, из коих первая проведется через печь и как место даст, а другая, короткая, припаянная к своду, а обе служат для паров. По первой из них, как машина стоит, выгоняет пары и прохлаждает котел, а другая, — если при действии машины усилятся над меру велии пары и чтобы не сорвало свода; отпирается фентель сам. На дне же котла имеется трубка с ключем, по которой выпускается вода вон, если сделается зачемлибо ненадобна...» [19].

Как следует из приведенного описания, первый паровой котел отечественной постройки содержал многие элементы современно-го: эллиптический лаз, водоуказательный прибор, питательную трубу, предохранительный, стопорный и дренажный клапаны.

С начала XIX в. сферические котлы стали заменяться клепаными прямоугольными или цилиндрическими конструкциями. Цилиндрическая форма оказалась наиболее благоприятной для обеспечения прочности их корпусов. Видоизменение конструкции простейшего котла, показанного на рис. 2.1, шло в направлении уменьшения размеров его паропроизводящих элементов при одновременном увеличении их числа. Указанный котел стал основой для развития двух основных направлений котельной техники, шедших параллельно.

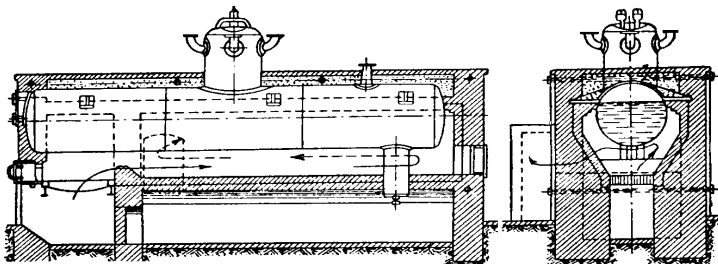


Рис. 2.1. Простейший цилиндрический котел

Первое из них характеризовалось созданием *огнетрубных* (современное название — *газотрубных*) котлов, обладавших большим водяным объемом с расположенной в нем развитой системой жаровых и дымогарных труб, использовавшихся для движения топочных газов.

Второе — заключалось в том, что в ходе совершенствования конструктивных форм огнетрубных котлов и развития технологии котлостроения появились *водотрубные* агрегаты, имевшие развитые трубчатые поверхности нагрева, заполненные водой, омываемые газами с внешней стороны.

Хотя каждое направление развивалось в значительной степени самостоятельно, общим стало стремление конструкторов к уменьшению размеров цилиндрических элементов при увеличении их общего количества, размещенного в одном и том же объеме. Помимо огне- и водотрубных котлов появились так называемые *комбинированные*, конструкции которых сочетали оба указанных принципа действия.

Первыми судовыми, по конструкции практически не отличавшимися от стационарных, в начале XIX в. стали цилиндрические и прямоугольные котлы. Прямоугольные, получившие название *сандучных*, рис. 2.2, изготавливались клепкой вначале из медных листов, затем — из листового железа, а впоследствии — из специальной котельной стали. Они производили влажный пар с давлением 0,11—0,12 МПа. Давление, превышающее 0,13 МПа, в этот период считалось высоким.

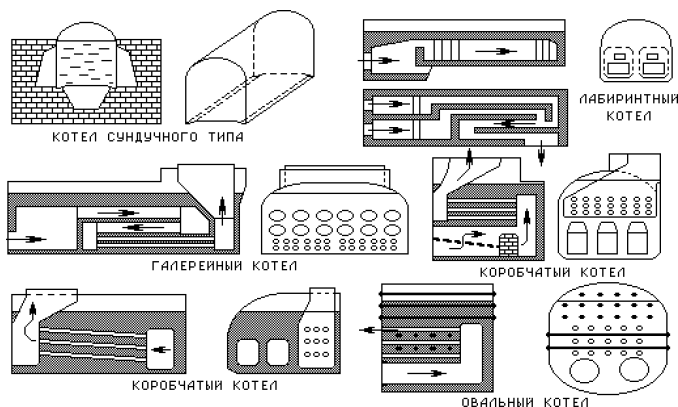


Рис. 2.2. Развитие конструктивных схем огнетрубных котлов

Особенностью этих аппаратов являлась массивная кирпичная обмуровка. Из-за значительного веса и малой паропроизводительности для использования в составе ЭУ судов они оказались малопригодны.

Их применяли до начала 40-х гг. XIX в. Отдельные экземпляры эксплуатировались и во второй половине XIX в.

Дальнейшим развитием сундучного стал *лабиринтный* котел. Он представлял собой конструкцию коробчатой формы, внутри которой размещались газоходы, выполненные в виде прямоугольных камер. Между камерами располагались пространства, заполненные водой. Газы, образующиеся при горении топлива, двигались по газоходам в нескольких направлениях и выходили через боковой проход в дымовую трубу. Подобные сооружения широко использовались в период 1820—1830 гг. Давление пара них было выше, чем в сундучных, оно достигало 0,2 МПа. КПД лабиринтных котлов составлял 30—35 %, а их надежность оставляла желать лучшего ввиду низкого качества используемого металла и взрывоопасности. Последняя объяснялась высоким водосодержанием, характеризовавшемся наличием в котле, даже небольшой мощности, значительной массы воды.

Серьезным недостатком лабиринтных котлов являлось наличие в них газоходов с плоскими стенками, не допускавшее повышения давления пара даже при их значительной толщине. Кроме этого, оказалась затруднена очистка их поверхности нагрева, как с газовой, так и с пароводяной стороны. Однако в отличие от сундучных, в лабиринтных котлах поверхность нагрева располагалась внутри корпуса, что позволяло выполнять их более компактными, понизить вес кирпичной обмуровки, а значит — уменьшить удельную массу. Корпуса котлов собирались клепкой из металлических листов толщиной 8—10 мм.

В 30-х гг. XIX в. появились аппараты, специально спроектированные для установки на суда. При разработке их конструкции решались задачи увеличения площади поверхности нагрева и паропроизводительности при сохранении или уменьшении габаритов и массы. Основные тенденции развития судовых котлов, наметившиеся в этот период, остаются актуальными и в наше время. К их числу относятся:

- увеличение надежности и долговечности;
- повышение параметров пара, то есть температуры и давления;
- снижение удельного расхода топлива;
- уменьшение водосодержания (отношения количества воды к паропроизводительности), характеризующего аккумулирующую способность и маневренные качества, а также взрывоопасность и вес;
- снижение стоимости постройки, затрат на эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт.

В течение 1820—1850 гг. появились и получили развитие *галерейные* котлы. Такое название они получили из-за того, что газы в них двигались снизу вверх, проходя по газоходам в виде галерей. Эти устройства уже имели, наряду с плоскими стенками, цилиндрические газоходы, хорошо выдерживавшие повышенное давление воды и пара. Применение в них труб относительно малого диаметра позволило увеличить площадь поверхности нагрева.

Галерейным котлам были присущи те же недостатки, что и лабиринтным. Давление пара в них к 1850 г. достигло 0,4—0,45 МПа, а экономичность за счет более развитой поверхности нагрева была выше, чем у лабиринтных: КПД достигал 50 %. На рис. 2.3 показана конструкция галерейного котла с цилиндрическими элементами, построенного в США в 1830 г. [4]. Из двух топок 1 газы проходили через две трубы большого диаметра 2 и восемь труб меньшего диаметра 3, затем делали поворот на 180° и направлялись в четыре трубы 4, из которых удалялись в дымоход 5. Пар, собиравшийся в сухопарнике 6, дополнительно подсушивался за счет контакта с горячей поверхностью газохода.

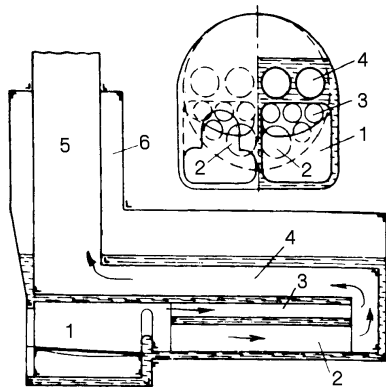


Рис. 2.3. Галерейный котел

В период 1840—1880 гг. широкое распространение получили *коробчатые* котлы, имевшие различные конструктивные формы. Они являются прототипами появившихся несколько позднее *оборотных*. Коробчатые котлы обладали развитыми поверхностями нагрева, образованными системами многочисленных дымогарных труб. Одновременно в них сохранялись топочные камеры и корпус, имевшие плоские стенки. Выходные газоходы, в отличие от более поздних оборотных котлов, еще не были вынесены наружу перед передним днищем, а располагались внутри корпуса. В коробчатых котлах, также как и в предыдущих типах, не удалось значительно повысить давление пара и обеспечить высокую паропроизводительность при сравнительно небольших размерах.

Для повышения параметров пара был совершен переход вначале к *овальным* (как к промежуточной форме), а затем к *цилиндрическим*

котлам. Применение цилиндрического корпуса (бочки) и большого числа дымогарных труб позволили заметно увеличить их паропроизводительность и давление пара. Овальные котлы получили некоторое распространение в период 1860—1880 гг. В них появились цилиндрические топки (жаровые трубы). Наличие в конструкции плоских стенок требовало применения длинных поперечных связей, увеличивающих прочность корпуса. Давление в овальных котлах достигало 0,6 МПа.

2.2. РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИЙ СУДОВЫХ ОГНЕТРУБНЫХ КОТЛОВ

Развитием простейшей цилиндрической конструкции, показанной на рис. 2.1, стали *жаротрубные* котлы. Схема одного из них показана на рис. 2.4а. Они оборудовались гладкими или гофрированными жаровыми трубами. Котлы ланкаширского типа имели по две таких трубы.

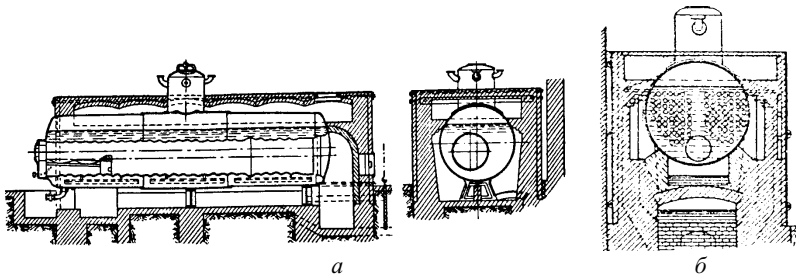


Рис. 2.4. Жаротрубные и котлы с дымогарными трубами

Стремление к размещению больших поверхностей нагрева в относительно небольших объемах корпусов привело к дальнейшему уменьшению диаметра труб с одновременным увеличением их числа. Такие конструкции, рис. 2.4б, получили название *котлов с дымогарными трубами*. Они имели нижнюю топку и являлись трехходовыми по газовой стороне. Параллельно включенные дымогарные трубы образовывали второй ход газов, первый и третий ходы располагались под корпусом и по обеим сторонам его газохода [44, 90].

Дальнейшее развитие цилиндрической схемы привело к созданию одной из наиболее удачных конструкций судовых огнетрубных котлов — *оборотных*, которые также назывались *шотландскими*. Их первые варианты появились в конце 50-х гг. XIX в. Свое название они получили по направлению движения дымовых газов относительно поверхности нагрева, совершавших поворот на 180°, рис. 2.5. Наибо-

лее рациональную форму корпуса эти агрегаты приобрели к 1870-м гг. С этого времени их конструкция принципиально не менялась на протяжении почти сотни лет.

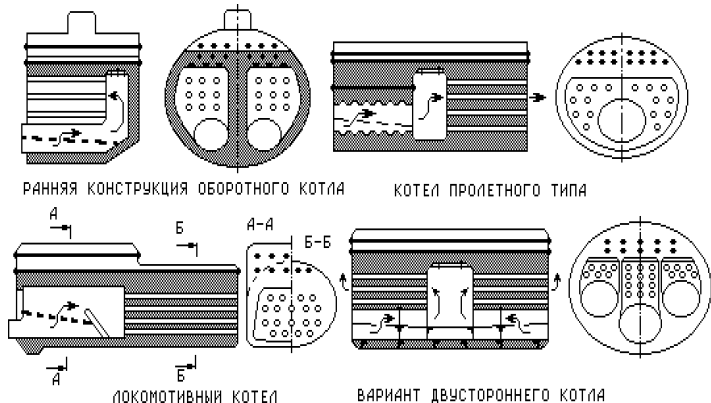


Рис. 2.5. Конструкции цилиндрических огнетрубных котлов

Вначале оборотные котлы изготовлялись из стальных листов клепкой, а с 1930-х гг. — сваркой. К началу XX в. давление пара в них достигло максимального значения (2,0—2,5 МПа). Их паропроизводительность обычно не превышала 5—6 т/ч, а КПД при отсутствии дополнительных поверхностей нагрева (пароперегревателей, экономайзеров и воздухоподогревателей), составлял около 75 %. С конца 1950-х гг. оборотные котлы стали применять, в основном, в качестве вспомогательных. В настоящее время они в единичных экземплярах встречаются на судах старой постройки.

На рис. 2.6 показан разрез оборотного агрегата сварной конструкции. Переднее днище 2 составлено из трех стальных листов, заднее 3 — из двух. Котел выполнен

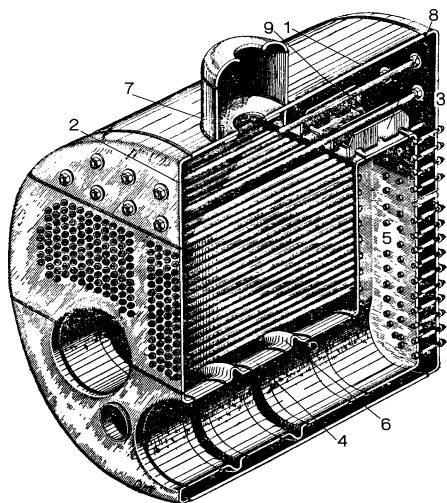


Рис. 2.6. Оборотный котел

трехтопочным (некоторые старые конструкции имели по четыре топки). Топки образованы жаровыми трубами 4, соединенными с индивидуальными огневыми камерами 5. Жаровые трубы гофрированные, изготовлены сваркой из цилиндрических колен, соединенных между собой кольцами волнообразной формы 6. Такая конструкция жаровой трубы придавала ей необходимую жесткость и способность противостоять давлению окружающей воды. Волнистые жаровые трубы стали применяться с конца 1870-х гг. Испытания их различных вариантов, проведенные в этот период, показали, что гладкая труба начинала деформироваться при давлении, превышающем 1,4 МПа, а волнообразная выдерживала давление 6,4 МПа.

Огневыми камерами выполнены из плоских стальных листов. К их потолку приварены скобы 8. Необходимую жесткость корпусу придуют длинные и короткие 9 связи, закрепленные в плоских стенках при помощи гаек. В верхней части корпуса установлен сварной сухопарник 7, выполненный в виде колпака. Сухопарник предназначен для уменьшения влажности поступающего в паропровод пара. Дымогарные трубы, образующие основную поверхность нагрева, крепятся к днищам вальцовкой или сваркой. Часть дымогарных труб играет роль связей: они крепятся в трубных досках на резьбе.

Схема размещения двухтопочного оборотного котла с петлевым пароперегревателем в корпусе судна показана на рис. 2.7 [90].

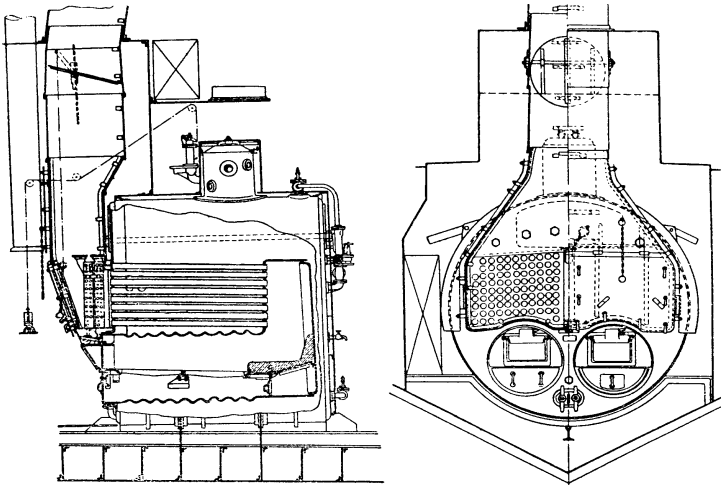


Рис. 2.7. Установка оборотного котла на судне

С начала 1870-х гг. получил широкое распространение другой тип огнетрубного котла — *пролетный*, рис. 2.5. Он отличался от оборотного тем, что газы в нем омывали поверхность нагрева, не делая поворота. Такой агрегат при равной паропроизводительности имел большую длину и меньший диаметр корпуса, чем оборотный. Он оказался удобным для размещения в корпусах речных судов.

Специально для оборудования быстроходных судов с мощными пароэнергетическими установками был разработан *локомотивный* котел, по конструкции подобный паровозному. Его топка имела большие размеры, позволявшие существенно интенсифицировать процесс горения топлива и в два-три раза увеличить паросъем с поверхности нагрева по сравнению с оборотным. Высокое тепловое напряжение топочного объема стало причиной их относительно низкой надежности и малого срока службы. Часть дымогарных труб поверхности нагрева иногда выполнялась увеличенного диаметра и использовалась для размещения внутри них петель пароперегревателя.

Главной областью применения этих агрегатов в 1880—1890-х гг. стали быстроходные боевые корабли — эскадренные миноносцы. Разновидностью локомотивных являлись *мокродонные* аппараты, имевшие топку, экранированную снизу водным пространством. Они получили некоторое распространение в 1870—1880-х гг.

Стремление судостроителей увеличить мощность огнетрубных котлов привело к созданию их *двухсторонних* моделей, являвшихся, по сути, вариантами оборотных, рис. 2.5. Они имели сложную конструкцию и использовались относительно редко. Котлы выпускались как с общими, так и раздельными для каждой жаровой трубы огневыми камерами. Их паропроизводительность достигала 12 т/ч и более, рабочее давление пара в конце XIX в. было доведено до 1,8—2,0 МПа. Выпуск подобных устройств прекратился в начале XX в. в связи с появлением более мощных, компактных и экономичных водотрубных котлов.

Одним из наиболее эффективных путей повышения экономической эффективности пароэнергетических установок является применение перегретого пара. Первые котлы, снабженные пароперегревателями, стали устанавливаться на транспортные суда с 1870-х гг. На боевых кораблях внедрение перегретого пара в широких масштабах началось только после первой мировой войны. До этого в течение 1890—1910 гг. предпринимались лишь отдельные попытки его использования. Такое положение объяснялось относительно низкой надежностью существовавших в то время пароперегревателей.

Применительно к огнетрубным котлам к началу XX в. сложились четыре основных типа пароперегревателей, рис. 2.8. В зависимости от преобладающего способа подвода тепла газов к пару их разделяли на *конвективные* (кустовые; размещенные в дымогарных трубах; установленные в дымовой коробке) и *радиационные* (расположенные в огневой камере).

Кустовой пароперегреватель представлял собой несколько петель труб, установленных в дымогарных трубах увеличенного диаметра. При этом в каждой из последних, размещавшихся среди труб обычного диаметра, располагалась отдельная секция пароперегревателя. Она состояла из нескольких петель. Подобные устройства имели ограниченное применение в начале XX в.

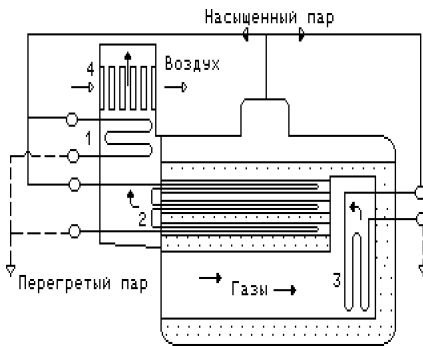


Рис. 2.8. Типы пароперегревателей

Наиболее распространенной конструкцией являлся пароперегреватель системы Шмидта 2, также размещенный в дымогарных трубах. Насыщенный пар из сухопарника котла поступал в один из коллекторов пароперегревателя и проходил по трубам, установленным в виде отдельных петель в дымогарных трубах. Пар, последовательно совершив путь по петлям одной секции, через второй коллектор отводился к потребителям. Конструкция пароперегревателя Шмидта представлена на рис. 2.9. Она позволяла вынимать его из котла для осмотра, ремонта и очистки.

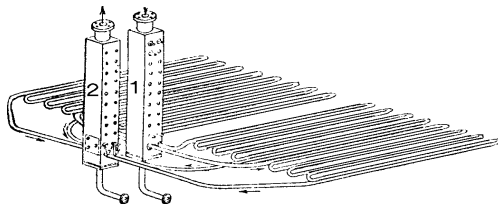


Рис. 2.9. Пароперегреватель Шмидта

В *дымовой коробке* котла (рис. 2.8) размещался пароперегреватель змеевикового типа 1. Он находился в зоне относительно низких температур газов и не обеспечивал высокую температуру перегрева.

Радиационный пароперегреватель 3 располагался в огневой камере. Так как температура газа в районе его установки достигала 900 °С, поверхность змеевика, достаточная для получения высокой температуры перегрева пара, была значительно меньше, чем у конвективного. Главным недостатком радиационных теплообменников являлась их невысокая надежность, обусловленная действием высокой температуры газов на металл труб змеевиков.

Как указывалось выше, применение перегретого пара позволило существенно увеличить экономичность пароэнергетических установок. Так КПД огнетрубного котла, оборудованного пароперегревателем системы Шмидта, увеличивался на 3—5 % по сравнению с котлом, производившим насыщенный пар. Экономичность котлов могла быть повышена за счет подогрева питательной воды в экономайзере или воздуха, подаваемого в топку, в воздухоподогревателе. Эти поверхности нагрева (рис. 2.8, поз. 4) размещались в газоходах. Установка экономайзеров и воздухоподогревателей на оборотные котлы началась в первом десятилетии XX в.

В связи с ограниченной паропроизводительностью огнетрубных котлов, для обеспечения паром мощных машин на крупнотоннажных судах и кораблях приходилось размещать до двух десятков, а в отдельных случаях и больше, этих аппаратов. Масса котельной установки вместе с запасами воды и угля на судах конца XIX в. достигала 20—25 % полного водоизмещения судна. С появлением в начале XX в. паровых турбин, работавших на паре с высокими параметрами, огнетрубные котлы стали быстро вытесняться более совершенными водотрубными. К концу 1950-х гг. главные огнетрубные котлы использовались, в основном, на речных и небольших морских, в том числе и рыбопромысловых судах с мощностью машин не выше 400—600 кВт.

Длительное использование огнетрубных котлов в качестве главных было вызвано их ценными качествами, среди которых выделялись:

— высокая аккумулирующая способность, сглаживающая изменение давления пара при резком изменении нагрузки. Она обеспечивала низкую скорость изменения уровня воды в котле при нарушении нормального режима его питания;

— простота обслуживания, надежность и высокий срок службы (превышающий в отдельных случаях пятьдесят лет);

— относительно низкая чувствительность к качеству питательной воды. Это оказалось особенно важным для установок с паровыми машинами, конденсат которых загрязнялся смазочным маслом.

Одновременно огнетрубным котлам были свойственны и серьезные недостатки, основными из которых являлись:

- ограниченное рабочее давление при большой массе, превышающей часовую производительность котла в 15—20 и более раз;
- взрывоопасность, обусловленная мгновенным вскипанием большого водяного объема при нарушении герметичности корпуса;
- высокие трудоемкость и стоимость изготовления и ремонта;
- недостаточная экономичность;
- высокая жесткость конструкции, требовавшая продолжительного времени для подъема давления пара, достигавшего у котлов больших габаритов 24 и более часов;
- слабая неупорядоченная естественная циркуляция, не позволявшая обеспечивать высокий паросъем с поверхности нагрева.

С конца 50-х гг. XX в. огнетрубные котлы выполняют на судах роль вспомогательных. Котлостроительными фирмами с начала XX в. было предложено множество их конструкций, часть которых успешно эксплуатируется и в настоящее время. Так, с 1920-х гг. на судах, оборудованных дизельными двигателями, стали применяться английские котлы «Кохран», устройство одного из которых показано на рис. 2.10а.

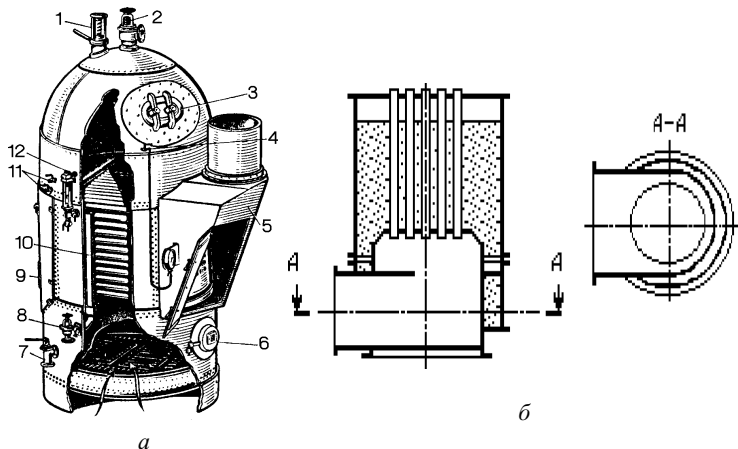


Рис. 2.10. Конструкции вспомогательных газотрубных котлов:

- 1, 2 — предохранительный и стопорный клапаны; 3, 6 — лазы; 4 — водяной объем; 5 — газоход; 7, 8 — клапаны нижнего продувания и питательный; 9 — обшивка; 10 — трубы; 11 — пробные краны; 12 — водоуказатель

Котел, изготовленный клепкой, имеет характерную полусферическую топку и горизонтальные дымогарные трубы. При снятом поде топки он может работать как утилизационный, используя тепло отработавших газов ДВС. В последующие годы котлы этого типа были модернизированы, стали изготавливаться цельносварными с полностью экранированной топкой, позволявшей избежать применения кирпичной обмуровки. Паропроизводительность котлов «Кохран» лежит в пределах 1—10 т/ч при давлении пара 1,0—1,8 МПа [54].

В период 1930—1950-х гг. на промышленных и транспортных судах малого водоизмещения устанавливались огнетрубные вспомогательные котлы с вертикальными дымогарными трубами. Примером такой конструкции является отечественный котел типа КОВ-8, рис. 2.10б, использовавшийся в составе ЭУ рыболовного сейнера типа РС-300, построенного в 1958 г. Его поверхность нагрева образована гладкими трубами с наружным диаметром 44,5 и толщиной стенки 3 мм. Площадь поверхности нагрева равна 8 м², паропроизводительность составляет 150 кг/ч. Котел работает на жидком топливе и имеет простую конструкцию. Его корпус легко разбирается, облегчая техническое обслуживание поверхности нагрева. Аналогичную конструктивную схему имели вспомогательные котлы, в 1920—1940 гг. производившиеся фирмами «Крупп», «Линдхольмен» и другими.

В середине 1960-х гг. отечественная промышленность освоила выпуск семейства горизонтальных вспомогательных огнетрубных автоматизированных котлоагрегатов типа КВА с паропроизводительностью 0,25—1,0 т/ч и рабочим давлением пара 0,5 МПа. Они состоят из парового котла, вспомогательных механизмов и устройств, собранных на общей раме. На рис. 2.11 показан поперечный разрез котлоагрегата типа КВА-0,5/5, устанавливавшегося в 1965—1969 гг. на средних рыболовных траулерах типов СРТМ и СТР. Котлоагрегат является трехходовым по газовой стороне. Газы, образовавшиеся в жаровой трубе, направляются вторым и третьим ходами в пучки прямых

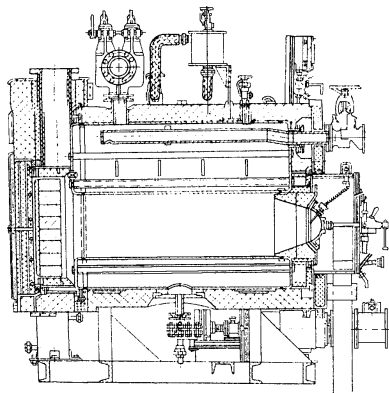


Рис. 2.11. Котлоагрегат КВА 0,5/5

гладких труб с наружным диаметром 38 мм, состоящие из 40 и 18 труб соответственно. Котлоагрегаты типа КВА хорошо зарекомендовали себя в процессе эксплуатации.

В 1980-х гг. на их базе стали выпускаться модернизированные модели, получившие индекс КГВ (котлоагрегат газотрубный вспомогательный). От своих прототипов они отличались конструкцией отдельных узлов. Для интенсификации теплообмена между газами и водой в новых аппаратах применили завихрители, изготовленные из жаропрочной стали, установив их в дымогарных трубах. Эта мера позволила увеличить их КПД до 87—88 %.

Современные газотрубные котлы выпускаются агрегатированными, то есть совместно со вспомогательными механизмами, системами и блоком управления. Они производятся в виде мощностных рядов, разные модели которых имеют общую компоновочную схему, но различные размеры поверхности нагрева, производительность и рабочее давление пара. Разнообразие моделей позволяет удовлетворить самые широкие потребности рынка. Примерами таких конструкций могут служить вертикальные котлоагрегаты «Спеннер», рис. 2.12а, горизонтальные «Стимблок» фирмы «Бабкок и Вилькокс», рис. 2.12б, а также рассмотренные выше типа КВА (КГВ).

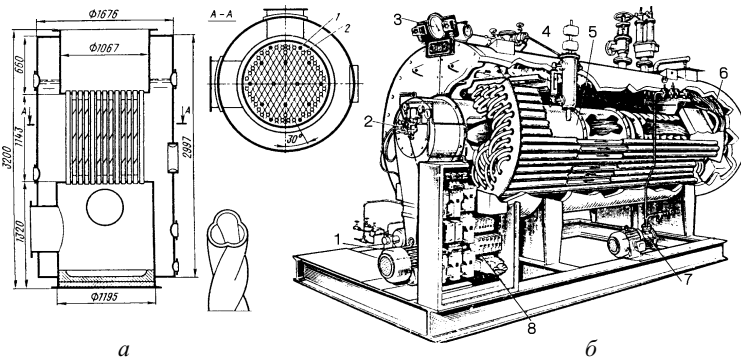


Рис. 2.12. Котлоагрегаты «Спеннер» и «Стимблок»

В агрегатах «Спеннер» применены оригинальные трубы «Свирилоф», в которых интенсивное закручивание движущегося потока газа значительно увеличивает теплоотдачу к воде. Они рассчитаны на давление пара 0,7—1,0 МПа (в отдельных случаях до 1,8 МПа) и имеют производительность 0,5—11 т/ч. «Стимблоки» выполнены трехходовыми по газам, имеют частично гофрированную жаровую трубу 5

и могут комплектоваться пароперегревателем. Их топочное устройство 2 оборудовано механической форсункой. Контроль за работой производится при помощи манометра 3 и водоуказательного прибора. Автоматическое поддержание уровня воды, подаваемой питательным насосом 7, обеспечивается при помощи регулятора уровня 4. Корпус закрыт слоем теплоизоляции 6. На фундаментной раме установлены вентилятор 1 и блок управления 8.

2.3. РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИЙ СУДОВЫХ ВОДОТРУБНЫХ КОТЛОВ

К концу XIX в. главным препятствием для дальнейшего совершенствования пароэнергетических установок оказалась недостаточная производительность и невысокие параметры пара огнетрубных котлов, бывших в это время основным типом котельной техники. Существенное увеличение мощности ЭУ было достигнуто применением водотрубных котлов, имевших значительно меньшую массу воды, чем огнетрубные. Рост мощности потребовал интенсификации движения воды в трубах и газов относительно поверхности нагрева. Первую задачу решили путем организации направленного движения воды и пароводяной смеси, вторую — применением искусственной тяги с использованием механических устройств.

Водотрубные котлы, в отличие от огнетрубных, требовали меньше времени для разводки, они оказались менее взрывоопасными, но требовали применения более качественной питательной воды.

Все они в конце XIX в. делились на камерные и безкамерные. *Камерные* имели прямые пучки труб, присоединенные к плоским коробкам (камерам), которые, в свою очередь, соединялись с коллекторами. Камеры являлись наиболее слабым местом агрегатов: они имели большое количество лючков, через которые осуществлялся доступ к трубам, были сложны в изготовлении и ненадежны. Лючки часто текли, вызывая необходимость останова котла. *Безкамерные* аппараты состояли из пучков кипяtilьных труб, непосредственно присоединенных к паровым и водяным коллекторам.

До 60-х гг. XIX в. водотрубные котлы использовались ограничено. Они имели вид коробок с короткими горизонтальными или вертикальными испарительными трубками. Циркуляция воды в них была слабая, КПД низким. Быстрое развитие и внедрение водотрубных котлов на судах началось в 60—70-х гг. XIX в. Их массовому распространению

способствовали развитие металлургической промышленности, освоившей производство бесшовных цельнотянутых медных труб, а также появлению новых методов изготовления листовой котельной стали, использовавшейся для сборки корпусов.

К концу XIX в. сложились две основные группы водотрубных котлов: *горизонтальные* с трубами большого диаметра (100—150 мм) и их слабым наклоном к горизонту, и *вертикальные* с трубами малого диаметра (30—50 мм), установленными под большим углом. Первую группу образовывали французские котлы систем Бельвиля и Колле-Никлоса; американские типа Бабкок-Вилькоккс; японские Мийабара. Ко второй группе принадлежали английские конструкции Ярроу, Фостер-Уиллера, Торникрофта, Блекиндена; германские Шульца-Торникрофта, французские систем Нормана и Дю Тампля; американские системы Мошера. Кроме них производилось большое количество других разновидностей, не получивших широкого распространения на судах [53].

Первый водотрубный котел установил в конце XVIII в. на одном из своих судов американец Дж. Фитч. Он состоял из железного корпуса кубической формы, в котором располагались двадцать водогрейных труб малого диаметра. Котел Фитча оказался ненадежным и просуществовал недолго. В 1804 г. на судне американца Дж. Стивенса также был применен водотрубный котел с поверхностью нагрева, состоявшей из сотни водогрейных труб диаметром 51 и длиной 457 мм. Ее площадь составляла 7,3 м² [3].

Первыми достаточно надежными водотрубными котлами стали так называемые *батарейные*. Их поверхность нагрева была образована набором цилиндрических элементов, соединенных в одну систему. На рис. 2.13а показан батарейный котел германского парохода, построенный в 1834 г.

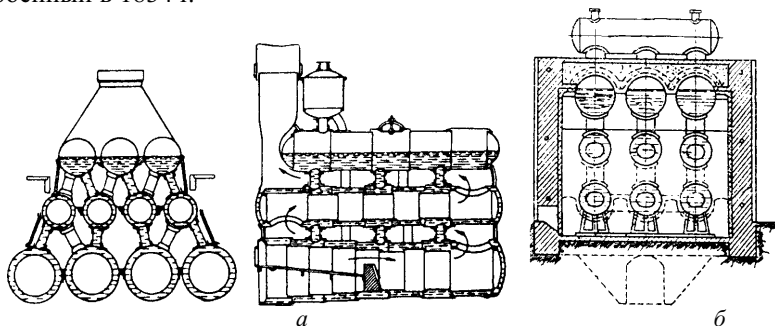


Рис. 2.13. Батарейные котлы

Его корпус состоял из одиннадцати цилиндрических элементов. Четыре нижних цилиндра с двойными стенками служили топками. Топочные газы проходили через двойные стенки среднего ряда, затем отдавали тепло трем верхним элементам и удалялись через газоход в атмосферу. В верхней части котла размещался сухопарник.

На рис. 2.13б представлена схема батарейного котла с нижней топкой, в котором все элементы выполнены одностенными. Полное омывание поверхности барабанов газами достигалось установкой специальных перегородок. Продукты сгорания удалялись в атмосферу через боковой газоход. Стационарные котлы подобного типа использовались до середины 20-х гг. XX в.

В 1830-х гг. появилась прообраз водотрубного котла, показанного на рис. 2.14 [82]. По существу, он являлся комбинированным огневодотрубным. В его верхней части размещался пароводяной барабан 1. Средняя часть включала несколько секций прямых кипяtilьных труб 2, вставленных с небольшим наклоном в стенки передних и задних камер 3. Пар собирался в верхней части пароводяного барабана и отводился по паросборной трубе 4 в машину. Этот агрегат стал прототипом горизонтальных секционных водотрубных котлов, появившихся позже.

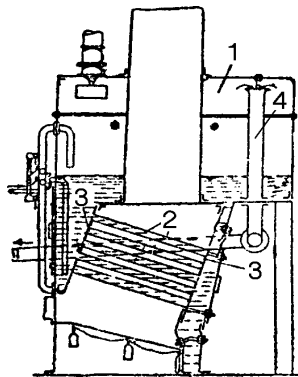


Рис. 2.14. Прообраз водотрубного котла

Все первые судовые водотрубные котлы, строившиеся в течение 1840—1860 гг., представляли собой аппараты коробчатой формы, весьма похожие на своих огнетрубных собратьев, в которых дымогарные трубы были заменены кипяtilьными. Значительная часть поверхности нагрева состояла из плоских стенок, то есть они являлись, по сути, комбинированными. Кипяtilьные трубы размещались внутри корпусов вертикально или горизонтально, рис. 2.15 (схемы 1, 2, 3). Наличие плоских стенок сдерживало рост давления пара. Его повышения достигли в результате создания конструкций, у которых вся поверхность нагрева была выполнена из жестких цилиндрических элементов небольшого размера.

Первый котел такого типа, пригодный для длительной эксплуатации, в 1850 г. создал француз Ж. Бельвиль. Котел Бельвиля, рис. 2.15 (схема 4), состоял из нескольких секций водогрейных труб, выполненных

в виде змеевиков. Секции располагались одна над другой. Вода подавалась вначале в нижний коллектор, из него поступала в водогрейные трубы и последовательно проходила по каждой секции. Такие агрегаты получили значительное распространение в 1865—1905 гг. Ими было снабжено большое количество боевых кораблей Российского Императорского флота. Впервые в российском флоте котлы Бельвиля установили в 1885 г. на крейсер «Минин».

Производительность котлов Бельвиля достигала 3—5 т/ч при давлении пара 1,2—2,0 МПа. Масса воды в них составляла около 8 % полного веса, агрегаты легко разбирались, были удобны для технического обслуживания и ремонта. В начале XX в. их стали оборудовать экономайзерами, подогревающими питательную воду теплом дымовых газов. Применение экономайзеров позволило поднять КПД до 80—82 %.

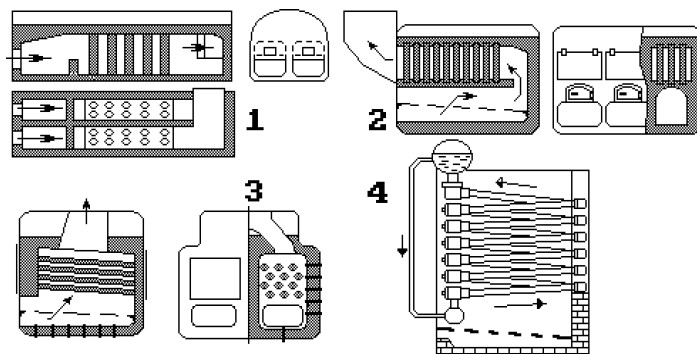


Рис. 2.15. Конструкции первых водотрубных котлов

Наряду с несомненными достоинствами, котлы Бельвиля имели серьезные недостатки. Среди них выделялись высокая влажность производимого пара и ненадежная циркуляция воды, вызванная наличием значительных сопротивлений ее движению в процессе прохождения по трубам длинного пути с множеством поворотов под углом 180° . Из-за малого водяного объема они требовали обязательного использования автоматических регуляторов питания и не допускали больших перегрузок.

С 1896 г. этот тип стал основным для крупных боевых кораблей отечественного флота. Так, на знаменитом эскадренном броненосце «Князь Потемкин-Таврический» было установлено 24 агрегата, часть которых могла работать на жидком топливе (сырой нефти). Такое же количество котлов модели 1894 г. находилось на крейсере «Аврора».

Они были разделены на три группы и располагались в трех котельных отделениях корабля [64].

Основные характеристики котлов «Авроры»:

— рабочее давление пара, МПа	1,72;
— число водогрейных трубок в элементе	20;
— число рядов трубок	10;
— наружный диаметр трубок, мм	115;
— общее число трубок	3 960;
— длина элемента, мм	223;
— общая площадь колосниковых решеток, м ²	108;
— общая площадь нагрева всех котлов, м ²	3 355.

Питали котлы двенадцать паровых насосов производительностью по 17 т/ч, сгруппированные по четыре штуки в каждом котельном отделении. Отдельные группы котлов обслуживали по две воздухоудки с паровым приводом с общей производительностью 3 000 м³/ч. Вентилювали кочегарки также двенадцать паровых вентиляторов с суммарной часовой подачей 360 000 м³ воздуха. Котельные отделения имели по отдельной дымовой трубе с поперечным сечением 5,8 м². Их высота от колосниковых решеток котлов до верхнего среза газохода составляла 27,4 м.

Развитием котлов Бельвиля стала конструкция, которую в 1907 г. предложил инженер Балтийского завода В. Я. Долголенко. В ней каждая испарительная секция состояла из двух серий элементов. Благодаря этому потоки воды и пароводяной смеси поднимались вверх наподобие винта в две нитки. Такое решение позволило снизить сопротивление движению воды и улучшить ее циркуляцию. Новый аппарат, получивший название «системы Долголенко-Бельвиля», стал быстро вытеснять предшествующие типы.

Водосодержание котлов Долголенко было значительно меньше, чем огнетрубных, а их маневренные качества оказались заметно более высокими. Испытания, проведенные на Балтийском заводе в 1913 г., показали, что если у обычного котла Бельвиля предельная нагрузка колосниковой решетки (удельное количество сжигаемого угля) достигала 100 кг/(м²·ч), то котел Долголенко допускал вдвое большую напряженность, приближаясь по этому показателю к шатровым типа Ярроу. Конструкция Долголенко была запатентована в 1911 г. Несколько позже фирма «Делоне-Бельвиль» приобрела этот патент и улучшила эксплуатационные качества собственных агрегатов.

Стремление конструкторов преодолеть специфические недостатки аппаратов Бельвиля и их вариантов привело вначале к появлению

камерных, а затем — секционных горизонтальных водотрубных котлов. *Камерные*, рис. 2.16, были образованы пароводяным барабаном и системой кипяtilьных труб, присоединенных к двум плоским водяным камерам, которые, в свою очередь, соединялись с барабаном.

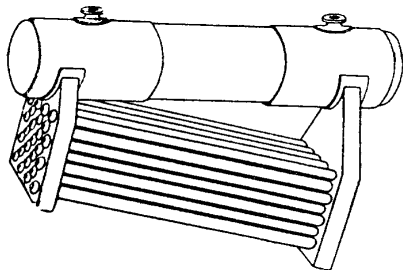


Рис. 2.16. Корпус камерного котла

На фронтальных поверхностях камер напротив каждой кипяtilьной трубы устанавливались лючки, через которые производилась чистка и ремонт камер и труб. Наклон труб к горизонту обеспечивал естественную циркуляцию воды: передняя камера заполнялась пароводяной смесью, выходящей из труб, задняя — некипящей водой. Отделение пара происходило в пароводяном коллекторе. Диаметр кипяtilьных труб достигал 150 мм. Полнота омывания поверхности нагрева газами достигалась установкой в трубном пучке направляющих перегородок.

Конструкция сдвоенной камеры показана на рис. 2.17 [90]. Необходимую жесткость ей придавали короткие связи, ввернутые в стенки. Камеры первых котлов изготавливались клепкой, затем их стали выполнять литыми, а позже — штампованными.

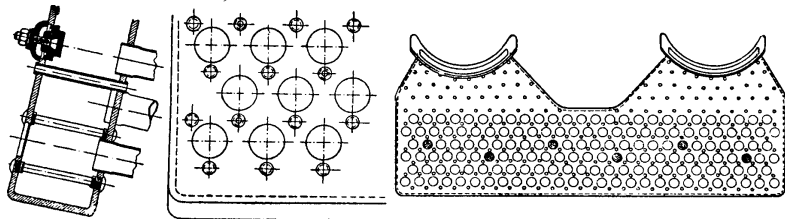


Рис. 2.17. Конструкция сдвоенной камеры

Громоздкость и конструктивные недостатки камер заставили отказаться от них и перейти к *секционным* котлам, в которых две камеры большого размера были заменены несколькими меньшими, но выдерживавшими более высокое рабочее давление.

Секционные агрегаты стали единственным типом горизонтальных водотрубных котлов, нашедшим широкое применение. Они использовались в течение почти семидесяти лет. Их первые конструкции появились в конце 80-х гг. XIX в.

На рис. 2.18 показан котел фирмы «Бабкок-Вилькокс», построенный в 1896 г. Он имел топку с угольным отоплением, экранированную трубами диаметром 102 мм. Поверхность испарительного пучка состояла из пяти рядов прямых труб диаметром 102 и одиннадцати рядов диаметром 51 мм. Топка небольшого объема располагалась под испарительным пучком. В верхней части газохода устанавливался водяной экономайзер. Скорость движения газов в испарительном пучке составляла всего 0,4—0,5 м/с. Она, а также большой наружный диаметр испарительных труб, являлись причиной низкой интенсивности конвективного теплообмена (в XIX в. считалось, что она зависит от времени контакта газов с поверхностью нагрева) [48]. Давление пара в первых секционных котлах достигало 1,8—2,0 МПа, их экономичность оказалась несколько выше, чем оборотных.

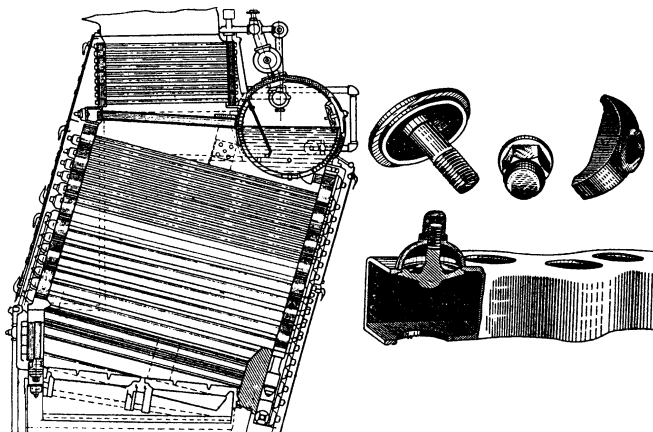


Рис. 2.18. Секционный котел фирмы «Бабкок-Вилькокс»

В секционных агрегатах, строившихся в последующие периоды, точечные экраны не применялись, так как существовавшие в то время несовершенные способы водоподготовки не позволяли предотвратить быстрое загрязнение экранов накипью. При этом трубы перегревались и выходили из строя. К использованию точечных экранов в судовых котлах вернулись позже в 40-х гг. XX в., после появления более эффективных способов обработки воды.

Следующим этапом в развитии конструкций секционных котлов явилось увеличение объема топки и подвод в нее воздуха через пространство между ее стенками и наружным кожухом. Такое решение стало использоваться с 1910—1912 гг. Трубы в моделях, построенных в этот период, обычно имели диаметр 51 мм. Трубы большего диаметра использовались только для изготовления первого, наиболее теплонапряженного ряда, примыкающего к топке.

Во время второй мировой войны (1939—1945 гг.) было выпущено несколько тысяч секционных котлов упрощенной конструкции, установленных на большом количестве транспортных судов, в том числе, — и на известной серии сухогрузов типа «Либерти». Они не имели топочных экранов и состояли из труб большого диаметра. Подобное отступление диктовалось необходимостью массового изготовления в военный период относительно простых, дешевых и надежных котлов, производивших пар для поршневых машин.

Схема котла сухогруза типа «Либерти» показана на рис. 2.19. Увеличение его экономичности достигалось применением петлевого пароперегревателя 8 и установкой в трубном пучке перегородок 10, делавшим его трехходовым по газам. Последнее решение увеличивало скорость движения газов и интенсифицировало теплообмен. Очистка поверхности нагрева от сажи во время работы обеспечивалась включением сажеобдувочных аппаратов 9. Патрубки 3 и передние камеры 2 играли роль опускающих труб. Пароводяная смесь, образовавшаяся в кипятильных трубах 5, через задние камеры 4 и трубы 6 отводилась в пароводяной коллектор 1. Котел работал на жидком топливе и производил 10 т/ч слабоперегретого пара с температурой 220—230 °С. Его КПД составлял 84—85 %, удельный вес был равен 5,9 кг/кг.

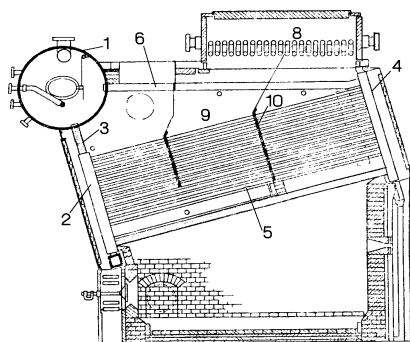


Рис. 2.19. Котел парохода типа «Либерти»

Секционные агрегаты производились и в начале 50-х гг. XX в., несмотря на широкое распространение в послевоенные годы более совершенных типов водотрубных котлов. Агрегаты этого периода сильно отличались от выпущенных в течение 1910—1940-х гг. Их производительность составляла 22—30 т/ч при давлении пара 3,5—4,5 МПа. Температура перегрева достигла 460 °С, КПД приближался к 93 %.

На рис. 2.20 показана одна из последних конструкций секционного котла. Его передние камеры 2 соединялись с пароводяным коллектором 1 при помощи патрубков 9. Нижние части камер были связаны с коллектором прямоугольного сечения 8 (грязевиком), из которого осуществлялось нижнее продувание. Конвективный петлевой пароперегреватель 10 располагался между первым 11 и вторым 3 конвективными пучками испарительных труб диаметром 38—44,5 и 32—38 мм соответственно. Топка экранировалась задним 5 и боковым 6 экранами, выполненными из труб диаметром 51—83 мм. Экраны соединялись с пароводяным коллектором трубами 4. Котел имел горизонтальный воздухоподогреватель 7. Его работа обеспечивалась топочными устройствами с механическими форсунками.

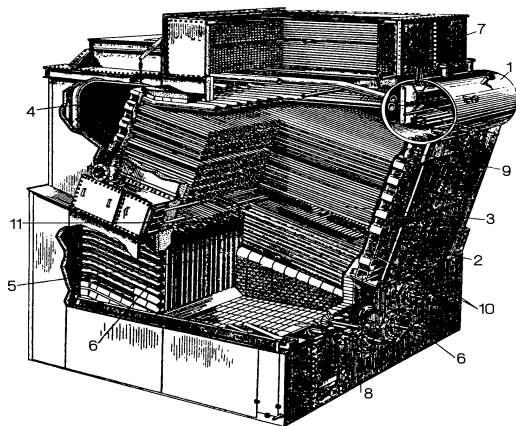


Рис. 2.20. Секционный котел середины 1950-х гг.

Главным недостатком секционных котлов являлась высокая жесткость их конструкции, обусловленная наличием камер и прямых труб большого диаметра. Жесткость ухудшала маневренные качества. Использование сложных толстостенных секционных камер удорожало конструкцию котла и ограничивало рабочее давление, а наличие значительного количества лучков на пароводяном пространстве снижало его

надежность. С конца 1950-х гг. производство агрегатов такого типа было прекращено.

В 90-х гг. XIX в. — начале XX в. на отечественных судах и кораблях получили некоторое распространение котлы системы Никлоса. Они, в частности, были установлены на легендарном крейсере «Варяг». Отличительной чертой котлов Никлоса были испарительные элементы Фильда, представлявшие собой две концентрические трубки 1 и 2, вставленные одна в другую с зазором, рис. 2.21 [53].

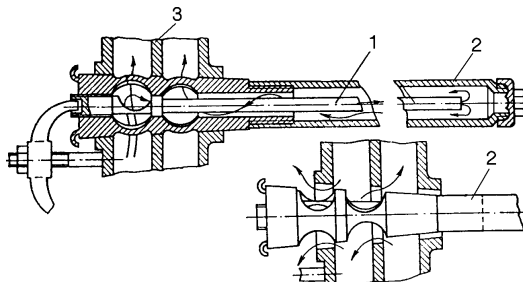


Рис. 2.21. Испарительный элемент Фильда

Наружная трубка заканчивалась дном, а внутренняя, не доходившая до дна, была открыта с обеих сторон. Трубки располагались горизонтально. Одним концом они крепились к коллектору 3, вторым свободно выходили в топку. Предполагалось, что при таком расположении испарительные элементы не будут деформироваться под действием тепловых напряжений. Собственно испарительной являлась наружная трубка диаметром 82,6 мм, внутренняя — играла роль водогрейной. Коллектор делился на две вертикальные полости. Наружная сообщалась с водогрейными трубками, внутренняя, примыкавшая к топке, — с испарительными. Крепились элементы Фильда к коллекторам без использования резьбовых соединений с помощью скоб. Такое конструктивное решение должно было облегчить разборку и замену трубок, которую можно было произвести без вскрытия агрегата.

Опыт эксплуатации котлов Никлоса показал, что ожидаемых преимуществ достигнуть не удалось. Трубки прикипали к посадочным местам, при замене часто ломались, остатки их соединительных и крепежных деталей приходилось высверливать. Большое количество подержанных течи соединений и трещины, часто возникавшие в коллекторах, снижали надежность котла. Скорость циркуляции воды в горизонтально расположенных трубах была низкой, что приводило к их интенсивному загрязнению накипью, перегреву и деформации.

Разрывы труб и ослабление их посадки в гнездах коллектора при разрушении крепежа часто приводили к смертельным ожогам коцегаров. Еще одним конструктивным недостатком котлов Никлоса являлась невозможность полного удаления воды из труб при их осушении. Названные причины привели к тому, что после 1905 г. от их применения на вновь строящихся отечественных кораблях отказались.

В середине 80-х гг. XIX в. появились двухпроточные *шатровые* или *треугольные* котлы, относившиеся к безкамерному типу. Они были конструктивно значительно проще секционных и при одинаковой с ними производительности имели меньшую массу. Отсутствие секционных камер позволило увеличить давление пара в них вначале до 2,5—3,2 МПа, а затем довести его до 4—6 МПа и более.

Некоторые конструктивные формы шатровых котлов приведены на рис. 2.22. Первые модели (выпущенные до 1910 г.) имели прямые кипяtilьные трубы (схема 1), которые увеличивали жесткость конструкции и ухудшали ее маневренные качества. При резких теплосменах, вызванных изменением нагрузки, в местах вальцовки труб в коллекторах могли возникать течи. Кроме этого, обеспечить надежное крепление прямых труб к цилиндрическим коллекторам в направлениях, не совпадавших с радиусом коллектора, было сложно. Это не давало возможность увеличивать количество рядов труб в пучке по ходу газов. Применение косо́й вальцовки сильно удорожало постройку аппарата. В то же время прямые трубы облегчали их очистку от накипи. Разрешило указанное противоречие следующее компромиссное решение: трубной доске коллектора стали придавать овальную форму или делать ее ступенчатой (схема 2).

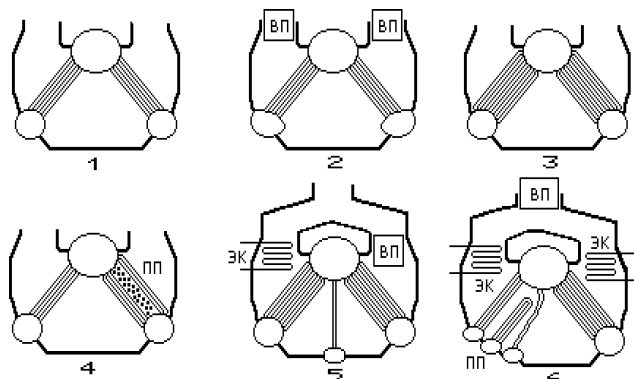


Рис. 2.22. Компоновки шатровых котлов

Во втором десятилетии XX в. большинство шатровых котлов строилось с изогнутыми трубами (схема 3). Их применение позволило уменьшить жесткость конструкции, так как гнутые трубы компенсировали возможное неравномерное расширение элементов при нагреве. Совершенствование методов водоподготовки также способствовало отказу от прямых труб. Котлы снова стали выпускаться с цилиндрическими коллекторами. Их КПД лежал в пределах 78—83 %. Дальнейшее повышение экономичности достигалось применением дополнительных поверхностей нагрева: экономайзера (ЭК), пароперегревателя (ПП) и воздухоподогревателя (ВП).

Установка пароперегревателя внутри конвективного пучка (схема 4) привела к сокращению площади поверхности нагрева и производительности. Увеличение поверхности нагрева было достигнуто установкой дополнительного пучка труб, замкнутого на четвертый коллектор (схема 6). На этой же схеме показано расположение в котле вертикального петлевого пароперегревателя. Такая компоновка увеличивала габариты котла, затрудняя его размещение на судне. Использование пароперегревателя, размещенного за пучками труб, также влекло за собой возрастание размеров котла и требовало увеличения площади нагрева самого пароперегревателя, так как он находился в зоне относительно низких температур газов.

На схеме 5 показан агрегат с вертикальным топочным экраном. Развитие поверхности нагрева привело к тому, что КПД главных шатровых котлов достигал 90—92 %.

Недостатком их конструкции являлась невозможность экранирования пода (нижней части) топок и фронтальных стен, не позволявшая снизить массу кирпичной обмуровки и облегчить условия ее работы.

На рис. 2.23 показана конструкция шатрового аппарата типа «Ярроу» периода 1895—1905 гг. Он имел угольное отопление, прямые трубы и нижние коллекторы овальной формы. Производительность подобных устройств достигала 5—8 т/ч при давлении пара 1,7 МПа.

На рис. 2.24 приведены поперечные разрезы двух шатровых котлов постройки начала 1920-х и конца 1950-х гг. Котел, изображенный слева, работал на твердом топливе и имел развитые пучки труб, расположенные над колосниковой решеткой. Топочные газы двигались в пучках с большими скоростями из-за наличия направляющих перегородок, созданных за счет совмещения трубок соседних рядов. Со стороны переднего фронта устанавливались прямые необогреваемые опускные трубы большого диаметра, соединявшие верхний и нижние коллекторы. Их наличие повышало надежность циркуляции воды.

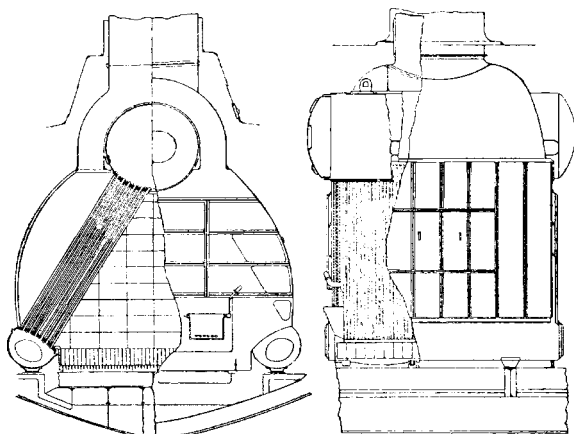


Рис. 2.23. Размещение котла «Ярроу» на судне

Котел, показанный справа, являлся асимметричным и работал на жидком топливе. Его производительность составляла 31,5 т/ч, давление и температура пара были равны 4 МПа и 425 °С, КПД достигал величины 92 %. Он оборудовался горизонтальным пароперегревателем, располагавшимся внутри конвективного пучка. Воздух в топку подавался от воздухоподогревателя, общего для двух агрегатов.

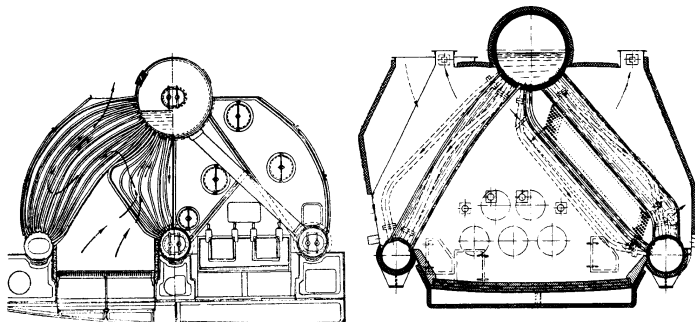


Рис. 2.24. Шатровые котлы 1920-х и 1950-х гг.

Отечественная промышленность серийно выпускала котлы шатрового типа в период 1926—1960 гг. На морских и речных судах среднего водоизмещения с паровыми поршневыми машинами широко применялся котел КВ-5, производивший 4 т/ч перегретого пара с давлением 1,5 МПа и температурой 300 °С. В начале 1960-х гг. производство шатровых агрегатов было прекращено.

С конца 1950-х гг. дальнейшее развитие водотрубных котлов протекало в направлении постройки *вертикальных однопроточных* конструкций с естественной циркуляцией. Их первые типы появились еще в 1920-х гг. и вскоре стали широко использоваться в стационарной энергетике. В однопроточных котлах конвективные пучки труб располагаются с одной стороны пароводяного коллектора, с другой стороны которого устанавливается топочный экран. Схемы их различных компоновок приведены на рис. 2.25.

Агрегаты, изображенные на схемах 1 и 2, имеют только боковые экраны. Под топкой у них не экранирован. Различие этих схем заключается в расположении пароперегревателя: внутри конвективного пучка труб и снаружи него. Такие модели характерны для СЭУ средней мощности 1930—начала 1950-х гг. Их производительность достигала 30—50 т/ч при давлении пара 4—6 МПа, КПД составлял около 90 %.

На схемах 3—5 показаны так называемые «D-образные» котлы с экранированным подом топки. Их топочные фронты также могли частично или полностью покрываться экранами. Подобные конструкции нашли широкое распространение на судах в 1950-е и 1960-е гг. К ним относятся котлы типов BDU фирмы «Кавасаки»; M21 фирмы «Бабкок-Вилькокс»; D, DSD, ESD фирмы «Фостер Уиллер»; КВГ-25, КВГ-34, КВГ-40 отечественного производства. КПД указанных агрегатов достигал величины 92—93 %, давление и температура перегрева пара составляли 3,5—6 МПа и 450—510 °С.

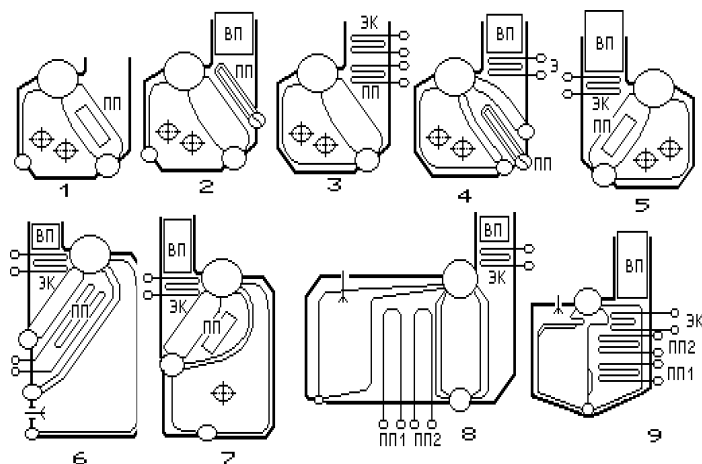


Рис. 2.25. Конструктивные схемы однопроточных водотрубных котлов

На схемах 6 и 7 приведены трех- и четырехколлекторные котлы, использовавшиеся на крупнотоннажных судах в 1940—1950-е гг. Совершенствование их конструкций шло в направлении снижения числа коллекторов — наиболее сложных и дорогостоящих узлов. Показанный на схеме 6 агрегат имел удельный вес, сопоставимый с весом секционных, но экономичность его была выше за счет развития дополнительных поверхностей нагрева. Аппарат, представленный на схеме 7, является развитием предыдущего типа. Он имеет более простую конструкцию и меньший удельный вес. Оба рассмотренных типа снабжены полностью экранированными топками.

Современные главные водотрубные котлы имеют компоновки, показанные на схемах 8 и 9. Они сложились в 1960—1970-х гг. Оба типа характеризуются потолочным расположением топочных устройств, полностью экранированными топками, наличием промежуточных пароперегревателей.

Стены топок выполнены из мембранных экранов — элементов, образованных стальными трубами с вваренными между ними пластинами. Экраны являются газонепроницаемыми, они хорошо защищают обмуровку топки от перегрева. Впервые их стали использовать в стационарных котлах в начале 1930-х гг., на судах их начали применять спустя два десятилетия [27, 35, 40].

Направления эволюции некоторых из рассмотренных выше конструкций можно проиллюстрировать на примере двух главных котлов отечественной постройки типов КВГ-25К и КВГ-80. Первый был создан в конце 1950-х гг., второй — в начале 1970-х гг.

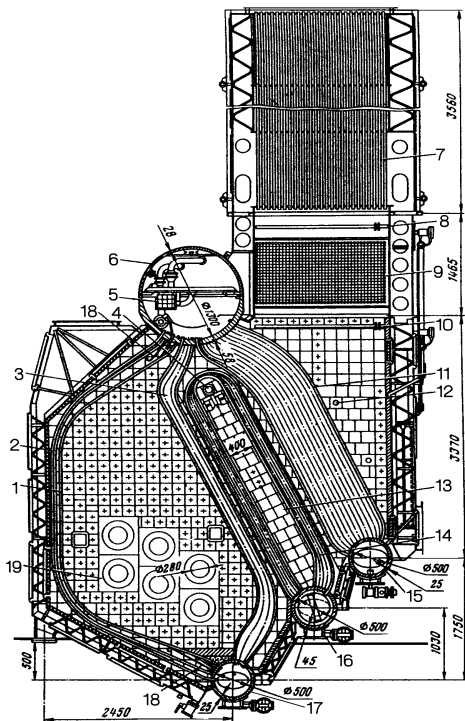


Рис. 2.26. Котел типа КВГ-25К

Котел КВГ-25К имел производительность 25 т/ч, рабочее давление 4,4 МПа и температуру перегрева 470 °С. Его устанавливали на паротурбоходах серии «Ленинский комсомол», рис. 2.26. Он имел два циркуляционных контура. Первый был образован боковым экраном 1, притопочным пучком 3 и опускными трубами 2, замкнутыми на пароводяной и экранный коллекторы 6 и 17. Второй — состоял из конвективного пучка 11 и опускных труб, присоединенных к коллекторам 6 и 15. Щиты 18 предотвращали нагрев опускных труб в районе разведения экранов. Коллекторы выполнялись сварными, испарительные трубы крепились к ним вальцовкой. В пароводяном коллекторе устанавливался пароохладитель 5, служивший для снижения температуры пара, поступающего к вспомогательным механизмам.

Петли вертикального пароперегревателя 14 присоединялись к коллектору 16. Между трубами предусматривалось пространство для их технического обслуживания. Внутри коллектора 16 размещались продольные и поперечные перегородки, обеспечивавшие четыре хода пара внутри труб. Пароперегреватель закреплялся на балке 4, продуваемой воздухом. В шахте газохода были установлены гладкотрубный противоточный экономайзер 9 и вертикальный газовый воздухоподогреватель 7, выполненный трехходовым по воздуху.

Котел отапливался шестью топочными устройствами, расположенными на переднем фронте. Удаление сажи с поверхностей нагрева во время работы производилось при помощи сажеобдувочных аппаратов 8, 10, 12. Котел имел двухслойный кожух, внутреннее пространство которого использовалось для движения воздуха, поступающего в топку. Обмуровка топки выполнялась из шамотного кирпича. Площадь испарительной поверхности нагрева агрегата составляла 407 м², пароперегревателя — 200 м², экономайзера — 263 м², газового воздухоподогревателя — 684 м².

КПД котла на номинальной нагрузке достигал 93 %, его масса с водой была равна 88 т. Три агрегата аналогичной конструкции с большей производительностью типа КВГ-40 были установлены на крупнейшем в мире плавучем рыбообработывающем заводе «Восток», имевшем водоизмещение 43 400 т. Это уникальное судно было построено в Ленинграде в 1971 г.

Главный котел высокого давления типа КВГ-80/80 первого отечественного супертанкера «Крым», построенного в 1973 г., относился к *радиационному* типу, рис. 2.27. Его номинальная паропроизводительность была равна 80 т/ч, рабочее давление пара составляло 8 МПа,

а температура его перегрева принималась равной 515 °С. Котел имел естественную циркуляцию воды. По сравнению с рассмотренным выше котлом КВГ-25 он обладал рядом принципиальных конструктивных особенностей. Повышенные параметры пара, наличие двух пароперегревателей (первичного и промежуточного), высокая экономичность предопределили такую его компоновку, в которой отсутствовал развитый конвективный испарительный пучок труб.

Паропроизводящими элементами являлись лучевоспринимающие поверхности нагрева полностью экранированной топки и двухрядного испарительного пучка, расположенного за средним экраном. Топка котла выполнялась полностью экранированной. Испарительные трубы, образующие экраны, являлись подъемными. Подвод воды из пароводяного коллектора 5 в нижние коллекторы 7 осуществлялся по необогреваемым опускным трубам. Экран 8 был выполнен в виде сплошной стенки труб, делящей котел на две шахты. Правая шахта образовывала топочную камеру, левая — включала конвективные поверхности нагрева двух секций основного и промежуточного пароперегревателей 1, 2 и водяного экономайзера 3. Пароводяная смесь отводилась в коллектор 5 по подъемным трубам.

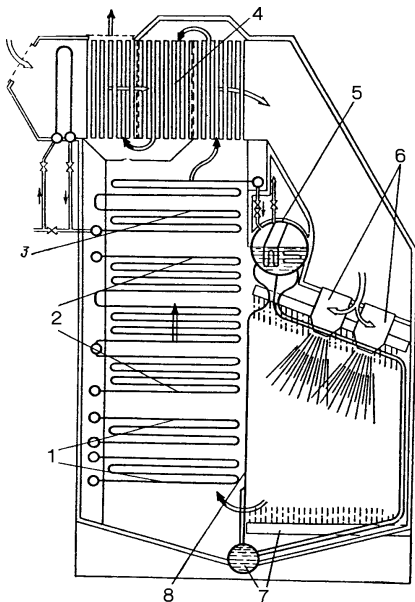


Рис. 2.27. Котел типа КВГ-80/80

Котел имел потолочное расположение топочных устройств 6. Газы поступали в конвективные поверхности через нижнюю разреженную часть экрана 8. Воздухоподогреватель 4 предусматривал три хода по газам. Внутренняя поверхность труб третьего хода защищалась от коррозии специальным фторопластовым покрытием. Площадь испарительной поверхности котла составляла 472 м², основного пароперегревателя — 580 м², промежуточного — 2 016 м², экономайзера — 3 535 м². Кожух выполнялся однослойным. Масса агрегата вместе с воздухоподогревателем

достигала 300 т. Он имел максимальный среди главных отечественных котлов КПД, достигавший 96 %.

За более чем столетнюю историю развития главные водотрубные котлы прошли путь от камерных до радиационных. В течение наиболее активного периода их совершенствования (1900—1975 гг.) котлостроители добились увеличения рабочего давления пара более чем в шесть раз (с 1,5 до 10 МПа), паросъема с одного квадратного метра поверхности нагрева — в восемь раз — с 20 до 160 кг/(м²·ч). Удельная масса агрегатов с естественной циркуляцией за это время снизилась вшестеро: с 12 кг на единицу часовой производительности до 2,0.

В течение последних лет этого периода развитие главных водотрубных котлов протекало в следующих основных направлениях:

- увеличения размеров топки и снижения ее теплового напряжения до значений, обеспечивающих надежную работу экранов;
- использования мембранных экранов, позволивших резко снизить толщину и массу кирпичной обмуровки топочных камер;
- перехода на потолочное расположение топочных устройств, обеспечившее равномерное заполнение топки факелом;
- совершенствования конструкции топочных устройств, уменьшения коэффициента избытка воздуха с 1,3 до 1,03;
- обеспечения возможности сжигания разных видов топлив;
- усовершенствования сажеобдувочных устройств;
- замены вальцовочных соединений сварными;
- использования однослойной обшивки;
- установки пароперегревателей в конвективных шахтах, удаленных от действия высоких температур газов;
- совершенствования систем автоматического управления, регулирования, защиты и диагностики технического состояния;
- использования на крупнотоннажных судах так называемых «полуторакотельных» установок.

«Полуторакотельная» установка вместо традиционных двух главных котлов состояла из одного главного и одного вспомогательного. Последний обеспечивал судно паром на стоянках, использовался для подогрева груза, мытья танков и в качестве аварийного источника пара для главных турбин. Подобную схему в начале 1970-х гг. применили на первом отечественном паротурбинном супертанкере «Крым».

2.4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ВОДОТРУБНЫЕ КОТЛЫ

В настоящее время, в связи с преобладанием на судах в качестве энергетических установок дизелей, главные котлы имеют ограниченное применение. На современных судах пар производится во вспомогательных и утилизационных котлах, отличающихся большим разнообразием конструкций и рабочих параметров. Основным их типом являются вертикальные однопроточные конструкции с естественной циркуляцией воды.

На транспортных и рыбодобывающих судах, где потребность в паре относительно невелика, их производительность и рабочее давление пара лежат в пределах 0,5—5 т/ч и 0,5—1,0 МПа. На крупных рыбообрабатывающих судах (плавбазах) и танкерах эти параметры имеют более высокие значения: до 35—40 т/ч и 1,5—2,5 МПа соответственно. Вспомогательные котлы таких судов по компоновке, тепловой мощности и размерам мало отличаются от главных. Примерами подобных конструкций являются отечественные агрегаты типов КВ-1 (35 т/ч, 2,6 МПа, 320 °С) и КВ 35/25 с аналогичными параметрами пара, устанавливавшиеся на крупнотоннажных нефтерудовозах и танкерах.

Начало деления судовых котлов на *главные* и *вспомогательные* относится к 1890-м гг. До этого малые потребности в паре удовлетворялись за счет действия небольшой части многочисленных аппаратов, входивших в состав пароэнергетических установок крупных судов, имевших по отдельности незначительную производительность. Позднее для этой цели стали устанавливаться специальные стояночные агрегаты, мощность которых была ниже, чем остальных. Окончательное разделение котлов на главные и вспомогательные сложилось после появления на судах дизельных энергетических установок.

Развитие вспомогательных водотрубных котлов идет как в направлении модернизации уже существующих удачных конструкций, так и по пути создания новых типов. Вместе с ними совершенствуются обслуживающие их системы и вспомогательное оборудование. Направлениями развития вспомогательных котлов являются:

- повышение их экономичности и надежности;
- совершенствование систем автоматизации и управления, использование в них микропроцессоров;
- применение топочных устройств, работающих на различных сортах топлив, в том числе низкого качества;

— широкое использование стандартизованных элементов и узлов, положительно проявивших себя в предшествующих конструкциях.

Тенденции развития вспомогательных котлов малой и средней мощности в течение 1940—1980-х гг. можно проследить на примере ряда отечественных конструкций. На рис. 2.28 показан однопроточный вспомогательный котел шатрового типа, строившийся в 40-х гг. XX в.

Он имел малую мощность и паропроизводительность всего 0,6 т/ч. Поверхность нагрева была образована двумя пучками труб: экраным и конвективным, каждый из которых замыкался на свой коллектор и представлял собой отдельный циркуляционный контур. Дополнительные поверхности нагрева он не имел. Топочный под испарительными трубами не экранировался. Эта конструктивная особенность предопределяла низкую экономичность агрегата: его КПД не превышал 72 %.

Сходное устройство имел вспомогательный котел типа КВС-30/1 производительностью 2 т/ч, рис. 2.29. В 1950—1970-х гг. он широко использовался в составе СЭУ дизельных транспортных судов и больших морозильных рыболовных траулеров (БМРТ).

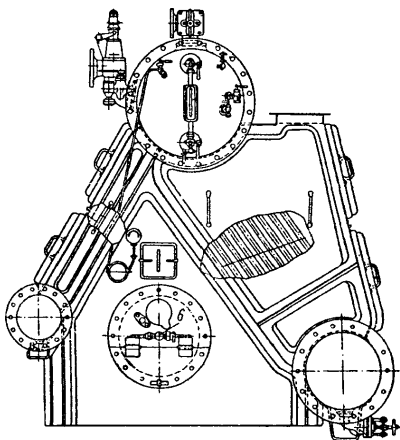


Рис. 2.28. Вспомогательный шатровый котел

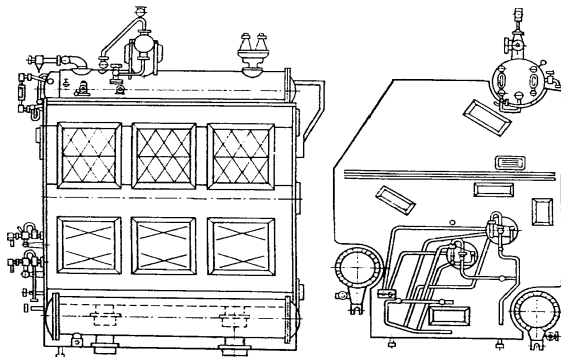


Рис. 2.29. Котел типа КВС-30/1