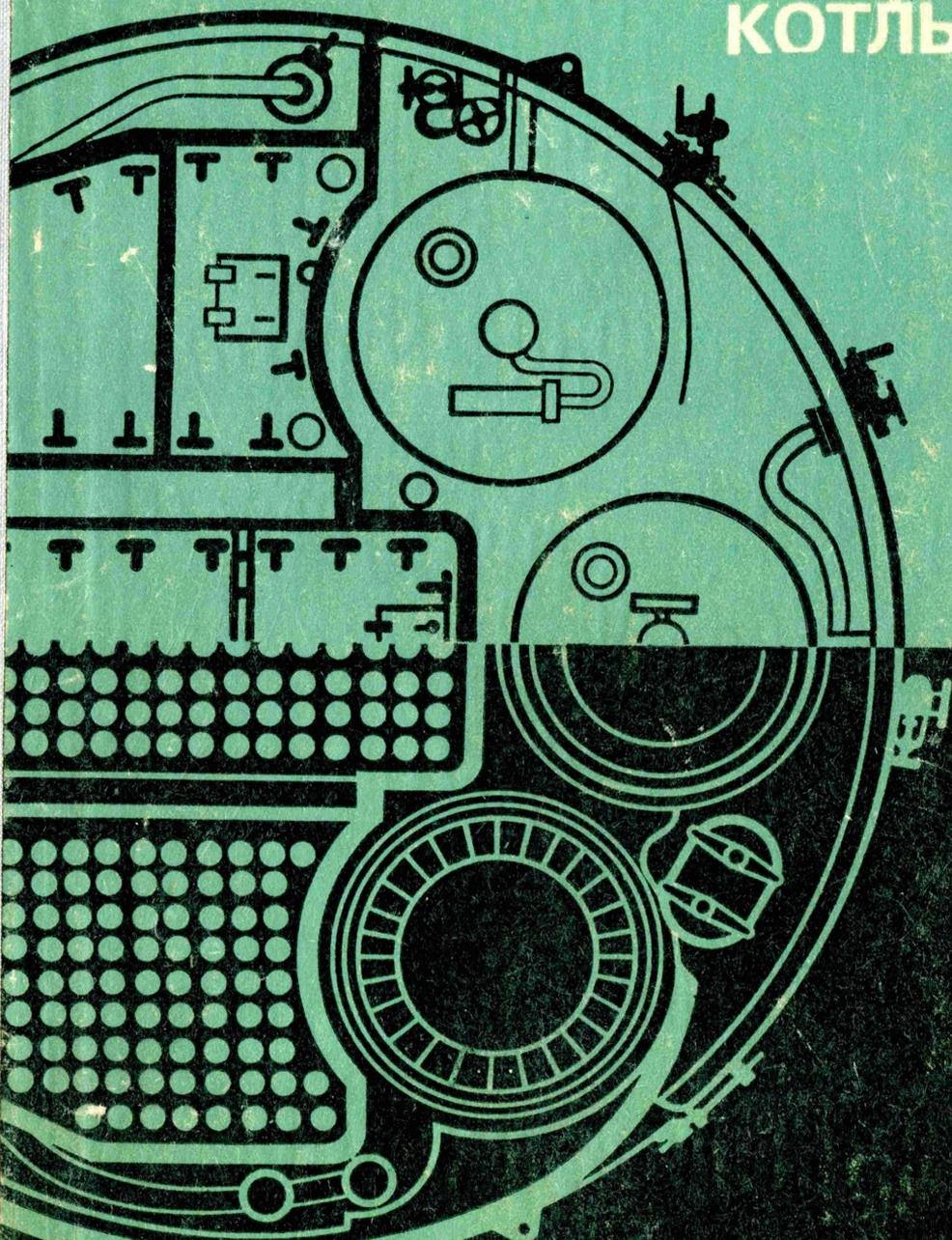


В. К. ЛЫСЕНКО, Б. И. ЛУБОЧКИН

СУДОВЫЕ ПАРОВЫЕ КОТЛЫ



В. К. ДЫСЕНКО, Б. И. ЛУБОЧКИН

СУДОВЫЕ ПАРОВЫЕ КОТЛЫ

УСТРОЙСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Утверждено Управлением учебных заведений
Министерства морского флота СССР
в качестве учебника для учащихся
судомеханической специальности
мореходных и арктического училищ



МОСКВА „ТРАНСПОРТ“ 1975

Судовые паровые котлы. Устройство и эксплуатация. Лысенко В. К.,
Лубочкин Б. И. Изд. 3-е, перераб. и доп. М., «Транспорт», 1975, с. 320.

В книге рассмотрены конструкции современных котельных агрегатов морских судов, основы теории горения топлива, теплообмена и аэрогидродинамики котлов, изложены правила их эксплуатации. Значительное внимание уделено вопросам повышения эффективности эксплуатации котельных агрегатов и их надежности.

Приведены также некоторые номограммы, графики, формулы и зависимости, необходимые для выполнения простейших расчетов.

Книга предназначена в качестве учебника для учащихся судомеханических отделений мореходных и арктического училищ и является третьим изданием. Она может быть использована слушателями курсов усовершенствования командного состава флота, механиками и котельными машинистами паровых и дизельных судов.

В настоящем издании учебника отсутствует материал по судовым ядерным реакторам, изучение этого раздела предусмотрено в других курсах.
Рис. 130, табл. 19, список лит. 10 назв.

Л $\frac{31806-295}{049(01)-75}$ 295—75

© Издательство «Транспорт», 1975.

§ 1. Назначение и принцип действия котла

Паровым котлом называется устройство, предназначенное для непрерывного производства водяного пара путем превращения какого-либо вида энергии в тепловую. Для получения пара может быть использована химическая энергия топлива (обычные паровые котлы), электроэнергия (электрокотлы) или атомная энергия (реакторы).

В обычных паровых котлах пар образуется в результате передачи тепла, полученного при сжигании топлива, воде, находящейся внутри котла. Схема простейшего котла представлена на рис. 1.

Топка, состоящая из топочного пространства 12 и топочного устройства 13, предназначена для смешивания воздуха с топливом и сжигания последнего. Газоходы 2 необходимы для передачи тепла топочных газов поверхности нагрева котла и удаления газов в атмосферу.

Поверхностью нагрева котла называется поверхность находящихся в топке и газоходах труб, через которую тепло от газов передается воде. Поверхность нагрева с одной стороны омывается топочными газами, а с другой — водой. Ее измеряют в квадратных метрах и подсчитывают со стороны газового пространства.

Часть газоходов, располагаемая за котлом, называется дымоходом, который переходит в дымовую трубу.

Часть внутреннего пространства котла, в котором находится вода, называется водяным пространством 10, а часть, занятая образующимся в котле паром, — паровым пространством 9.

Для пополнения котла (при расходе воды на получение пара) необходимо подавать через питательный клапан 5 воду, которую называют питательной. Питательная вода перед питательным клапаном подогревается дымовыми газами в экономайзере 3.

Вода в котле должна поддерживаться на постоянном уровне. При излишнем питании котла вода может попасть в паропровод

и вызвать аварию парового двигателя. При недостаточном питании уровень воды в котле опустится и часть поверхности нагрева не будет омываться водой, в результате температура этой части резко повысится, металл стенок будет перегреваться и потеряет прочность, что может привести к повреждению и аварии котла.

Для контроля уровня воды в котле устанавливают водоказательные приборы 11, действие которых основано на принципе сообщающихся сосудов.

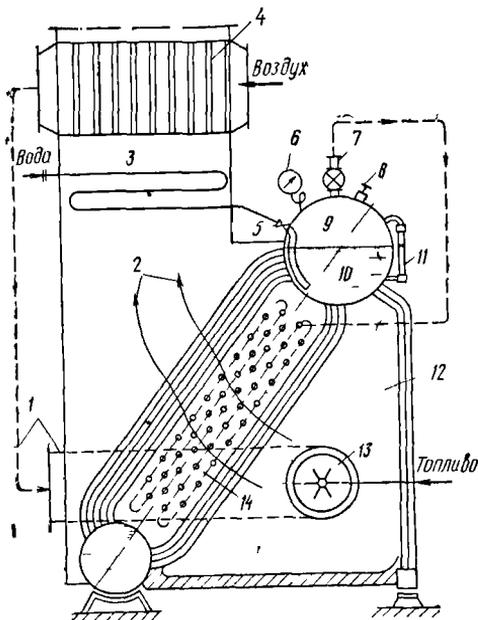


Рис. 1. Простейший котел

Поверхность воды в котле, разделяющая паровое и водяное пространства, называется зеркалом испарения. Пар отбирается из парового пространства через стопорный клапан 7. Для наблюдения за давлением пара служит манометр 6. Чтобы предотвратить повреждение котла при чрезмерном росте давления пара, устанавливают предохранительный клапан 8, который срабатывает при повышении давления в котле до определенного предела, устанавливаемого заводом-изготовителем. Воздух для горения подогревается дымовыми газами в воздухоподогревателе 4 и по каналам 1 поступает в топку.

При установившемся режиме работы котла расход тепла в паре и неизбежные тепловые потери должны соответствовать приходу тепла, получаемого при сжигании топлива в топке.

В котле непрерывно происходят следующие процессы:

- топочный — горение топлива в топке котла;
- аэродинамический — подача в топку воздуха и удаление из газоходов газообразных продуктов горения топлива;
- теплопередачи — передача тепла от газов воде через поверхность нагрева;
- циркуляции — движение воды и пара внутри котла вдоль его поверхности нагрева (гидродинамика котла).

В результате этих процессов осуществляется непрерывное производство водяного пара.

§ 2. Судовая котельная установка

В простейшем случае в корпусе котла вода одновременно подогревается до температуры кипения и испарения. Такой котел может вырабатывать только насыщенный пар. Современные котлы

(точнее, котельные агрегаты) имеют значительно более сложную конструкцию. Так, в современном котельном агрегате имеются следующие основные узлы:

собственно котел с парообразующей поверхностью нагрева; водяной экономайзер, в котором питательная вода подогревается за счет тепла продуктов горения, покидающих собственно котел;

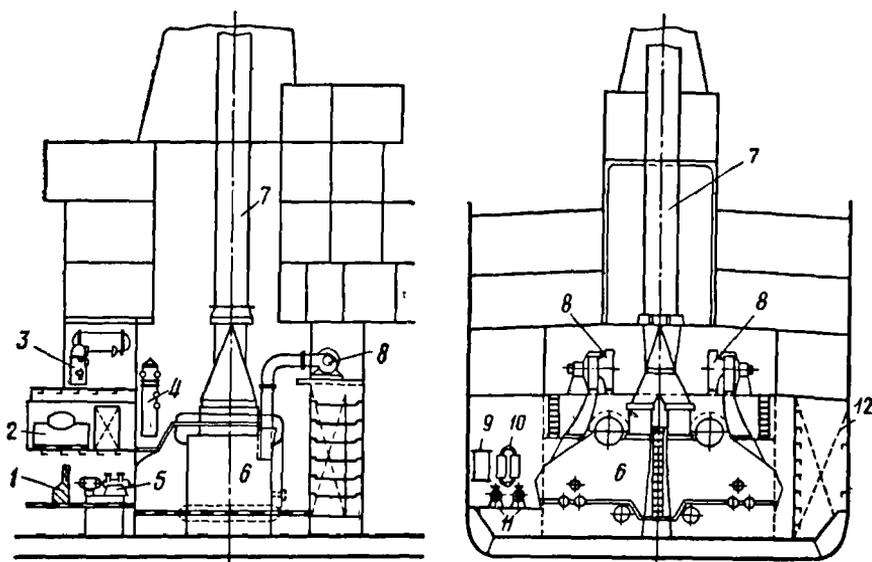


Рис. 2. Котельное отделение морского судна

пароперегреватель 14 (см. рис. 1);

пароохладитель для выработки охлажденного (точнее, слабоперегретого) пара;

воздухонагреватель, в котором воздух до подачи в топку подогревается теплом продуктов горения, покидающих котел;

арматура парового и водяного пространств;

устройство для осушения пара;

дымоходы с дымовой трубой;

обмуровка, изоляция и обшивка, служащие для уменьшения потерь тепла в окружающую среду;

фундамент и каркас, объединяющие в одно целое все узлы котельного агрегата.

Судовая котельная установка состоит из котельных агрегатов вместе с необходимыми для их обслуживания вспомогательными устройствами и располагается на судне в одном или нескольких котельных отделениях (рис. 2).

Позиции на рисунке означают: 1 — щит автоматического регулирования работы котлов; 2 — подогреватель-дегазатор питательной воды; 3 — система подготовки питательной воды; 4, 9 — подогреватели питательной воды и топлива;

5 — питательный насос; 6 — котельные агрегаты; 7 — дымовая труба; 8 — вентиляторы, подающие воздух в топку котла; 10 — фильтр топлива; 11 — топливные насосы; 12 — бортовая топливная цистерна.

Вспомогательные устройства котельной установки обеспечивают: подачу воздуха в топку и удаление из нее продуктов горения; подачу топлива к топке; питание котла водой; подготовку питательной воды; контроль и регулирование работы котла.

Один только перечень основных узлов современной котельной установки (см. рис. 2) свидетельствует о ее сложности по сравнению с простейшими котлами. Усложнение конструкции дало громадные практические результаты: экономичность работы судовых котлов возросла за последние 50—60 лет в 1,5—2 раза.

Условия эксплуатации морского судна предъявляют особые требования к его котельной установке, которые можно свести к следующим:

надежность и безопасность работы при любых условиях, вплоть до штормовых (при крене судна до 45° и дифференте до $15\text{—}20^\circ$); простота обслуживания и ремонта;

максимальная паропроизводительность при минимальных массе и габарите;

высокая экономичность работы при минимальной стоимости изготовления и эксплуатации.

Эти требования необходимо помнить при рассмотрении и оценке конструкций судовых паровых котлов.

§ 3. Основные понятия и определения

Конструктивные характеристики. К конструктивным характеристикам относят размеры элементов поверхности нагрева, топки, габарит и массу котла (без воды и с водой, налитой до рабочего уровня). Эти характеристики котла имеют важное значение при постройке судна и оказывают существенное влияние на экономичность эксплуатации морского судна.

Поверхность нагрева парового котла в общем случае обозначают символом H и измеряют в квадратных метрах. Она может состоять из нескольких элементов:

$H_{\text{эк}}$ — экономайзерной поверхности нагрева, через которую горячие газы подогревают питательную воду;

$H_{\text{к}}$ — паробразующей поверхности нагрева котла, через которую тепло топочных газов передается испаряющейся воде;

$H_{\text{пц}}$ — поверхности нагрева пароперегревателя, через которую насыщенному пару сообщается дополнительное тепло и он становится перегретым;

$H_{\text{вп}}$ — поверхности нагрева воздухоподогревателя, через которую продукты горения передают свое тепло воздуху перед поступлением его в топку котла.

Величину поверхности нагрева собственно котла, пароперегревателя и экономайзера определяют со стороны газового пространства по обычным геометрическим соотношениям. Так, если поверх-

ность нагрева собственно котла образована из $z=500$ труб длиной $l=4$ м и диаметром $d_n=44,5$ мм (причем эти трубы омываются газами), то она будет равна

$$H_k = \pi d_n l = 500 \times 3,14 \times 0,0445 \times 4 = 279 \text{ м}^2.$$

Объем топки также определяют по обычным геометрическим соотношениям.

Параметры. Качество пара, вырабатываемого котельным агрегатом, определяют параметры котла.

Насыщенный пар характеризуется давлением и степенью его сухости.

Давление пара p измеряется в килограмм-силах на квадратный сантиметр ($\text{кгс}/\text{см}^2$), а в международной системе единиц СИ — в барах.

Котельный манометр показывает избыточное давление $p_{\text{изб}}$ пара в котле сверх атмосферного. Действительное, или абсолютное, давление пара принято обозначать через $p_{\text{абс}}$.

Между абсолютным и избыточным давлением существует зависимость

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{изб}} + B,$$

где B — барометрическое давление, которое в котельной технике можно принимать равным $1 \text{ кгс}/\text{см}^2$.

Степень сухости пара обозначается выражением $1-x$ (где x — влажность пара в долях единицы).

Все современные паровые котлы вырабатывают перегретый пар, давление и температуру которого принято обозначать дробью, т. е. $p/t_{\text{п.п}}$. Например, выражение $48/465$ обозначает, что перегретый пар имеет давление $48 \text{ кгс}/\text{см}^2$ при температуре 465°C .

В соответствии с ГОСТ 9867—61 с 1 января 1963 г. рекомендовано применение Международной системы единиц СИ (приложение 1). Переход на новую систему требует определенного времени, необходимого для замены контрольно-измерительных приборов, справочных таблиц и другой документации. Так, в новой системе единиц давление измеряется в ньютонах на квадратный метр, т. е. $1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 98\,100 \text{ Н}/\text{м}^2$. Применение столь малой единицы давления в котельной технике вызовет некоторые неудобства, поэтому более широко будет применяться единица давления — бар. $1 \text{ бар} = 100\,000 \text{ Н}/\text{м}^2$.

Тогда $1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 0,981 \text{ бар}$.

Показатели мощности. Количество пара, выдаваемого котельным агрегатом в единицу времени, называется паропроизводительностью и измеряется обычно в тоннах в час ($D \text{ т}/\text{ч}$).

Различают номинальную $D_{\text{ном}}$ и максимальную $D_{\text{макс}}$ паропроизводительности котла. Номинальной паропроизводительностью называют наибольшее часовое количество пара, вырабатываемое котлом за больший промежуток времени. Максимальная паропроизводительность может быть достигнута при форсировке котла в течение нескольких часов. Однако при длительной форсировке

срок службы котла значительно сокращается вследствие ускорения износа.

В соответствии с нуждами различных потребителей в судовых котлах обычно вырабатывается одновременно: перегретый пар (для главных двигателей) и охлажденный (перегретый на 10—20° выше температуры насыщения) для вспомогательных механизмов, отопления и других хозяйственно-бытовых нужд. Таким образом, пар, выдаваемый котлом, может иметь различную энтальпию при одинаковом давлении.

Помимо паропроизводительности котла, применяется термин теплопроизводительность Q (ккал/ч) — полное количество тепла, затраченное на единицу времени на нагрев воды, испарение и перегрев пара:

$$Q = D(i_x - i_{п.в}) + D_{охл}(i_{охл} - i_x) + D_{п.п}(i_{п.п} - i_x), \quad (1)$$

где D — полное количество пара, вырабатываемого котлом, кг/ч;

$D_{охл}$, $D_{п.п}$ — соответственно количество охлажденного и перегретого пара, кг/ч;

i_x , $i_{охл}$, $i_{п.п}$ — соответственно энтальпия влажного насыщенного, охлажденного и перегретого пара, ккал/кг;

$i_{п.в}$ — энтальпия питательной воды, ккал/кг.

При расчетах принимают:

$$i_x = xi' + (1 - x)i'', \quad (2)$$

где x — влажность пара;

i' — энтальпия воды, ккал/кг;

i'' — энтальпия сухого насыщенного пара, ккал/кг.

В новейших котлах с промежуточным перегревом пара теплопроизводительность котла вычисляют с учетом тепла, пошедшего на этот перегрев.

К количественным показателям можно отнести и часовой расход топлива (кг/ч) на работу котла при номинальной или максимальной паропроизводительности.

В соответствии с системой единиц СИ теплопроизводительность котла выражают в киловаттах (кВт), так как теплопроизводительность, по сути дела, и есть мощность, выраженная в тепловых единицах.

Для получения мощности котла в киловаттах необходимо теплопроизводительность, выраженную в килокалориях на час, разделить на 860, так как $1 \text{ кВт} = 1000 \text{ Вт} = 1000 \text{ Дж/с} = 1000 \times 0,000239 \times 3600 \text{ ккал/ч} = 860 \text{ ккал/ч}$ ($1 \text{ Дж} = 0,000239 \text{ ккал}$).

Показатель напряженности работы котла — видимая тепловая нагрузка топочного объема q_v измеряется в ккал/м³ч

$$q_v = \frac{BQ_n^p}{V_T}, \quad (3)$$

где B — часовой расход топлива, кг/ч;

Q_n^p — теплота сгорания топлива, ккал/кг;

V_T — объем топочного пространства, м³.

Поэтому приведенные характеристики применяют обычно при сравнении однотипных котлов или разных режимов работы одного и того же котла.

Экономические показатели работы. Большое значение для оценки экономичности работы котла имеет его коэффициент полезного действия (к. п. д.) $\eta_k(\%)$ — отношение количества тепла, использованного в котле для производства пара, к количеству тепла, которое выделяется при полном сгорании израсходованного топлива:

$$\eta_k = \frac{Q}{BQ_H^p} 100. \quad (4)$$

Для определения экономичности стационарных энергетических установок широко применяют такие показатели, как себестоимость 1 т пара или 1 млн. ккал тепла, полученных в котельном агрегате. На морском транспорте, занимающемся в основном перевозками пассажиров или грузов, большое значение имеет себестоимость не 1 т пара, а, например, 1 тонно-мили, валютная эффективность перевозок, удельный расход топлива на 1000 тонно-миль и другие показатели. Такие показатели относятся уже к силовой установке судна и рассматриваются в специальных курсах.

При постройке судна большое значение имеют такие экономические характеристики, как стоимость проектирования, постройки и установки котла.

Глава II. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ КОТЛОВ

§ 4. Классификация котлов

Более чем двухсотлетнее применение паровых котлов, являющихся основой современной теплоэнергетики, привело к чрезвычайному разнообразию их типов и конструкций, разрабатывавшихся применительно к конкретной области промышленности и транспорта.

По назначению различают главные и вспомогательные котлы. Главные котлы вырабатывают пар для главных паровых двигателей, приводящих в движение гребные винты, и судовых вспомогательных механизмов. Вспомогательные котлы вырабатывают пар в основном для вспомогательных механизмов. Их устанавливают чаще всего на теплоходах. Пар, необходимый для работы вспомогательных механизмов и хозяйственно-бытовых нужд, обычно отбирается из главных паровых котлов, причем его давление и температуру снижают до требуемых величин.

По типу омывания газами поверхности нагрева котлы разделяют на огнетрубные, водотрубные и комбинированные (огнетрубно-водотрубные). В огнетрубных котлах

дымовые газы проходят внутри труб и камер, образующих поверхность нагрева котла, в водотрубных — между трубами, в комбинированных применяют совместно те и другие конструкции.

По роду циркуляции воды котлы бывают с естественной и принудительной циркуляцией. При естественной циркуляции движение воды и пароводяной смеси внутри котла происходит вследствие их разной плотности. Принудительная циркуляция обеспечивается работой различных насосов. Котлы с принудительной циркуляцией можно разделить в свою очередь на котлы с многократной принудительной циркуляцией и прямоточные.

По давлению пара различают котлы низкого, среднего и высокого давления. Например, в морском котлостроении котлы, вырабатывающие пар с избыточным давлением ниже 15—18 кгс/см², принято называть котлами низкого давления, до 40—45 кгс/см² — среднего и более 45 кгс/см² — высокого давления. Необходимо отметить, что этот вид классификации весьма неточен и изменяется с развитием котельной техники. Так, в последнее время называют котлами высокого давления котлы, вырабатывающие пар давлением более 80 кгс/см².

Помимо этой основной классификации может быть еще несколько детальных подразделений. Например, водотрубные котлы можно разделить по числу барабанов, наклону испарительных труб, расположению пароперегревателя и т. д. Такие различия приведены при рассмотрении отдельных типов котлов.

§ 5. Основные типы котлов

В конце XVIII века, на заре котлостроения, простейший паровой котел представлял собой металлический цилиндр, частично заполненный водой. Под котлом располагалась топка.

Развитие паровой энергетики, особенно со времени изобретения И. И. Ползуновым в 1763—1765 гг. универсального парового двигателя, потребовало дальнейшего усовершенствования паровых котлов. Опыт показал, что увеличение поверхности нагрева котла позволяет получать больше пара, а повышение давления пара приводит к увеличению мощности парового двигателя. При этом одновременно стремились уменьшить габарит и массу котла, что было особенно важно в связи с широким применением паровых котлов на транспорте (железнодорожном и водном) в первой половине XIX века.

Долгое время, вплоть до 20-х годов нашего столетия, усовершенствование паровых котлов шло по пути создания новых конструкций и проверки их в работе. Этим объясняется то обстоятельство, что история котельной техники насчитывает более 200 типов судовых котлов, из которых к настоящему времени сохранилось немногим более 10.

Задачи увеличения поверхности нагрева, уменьшения массы котлов и повышения параметров пара решались в основном

по двум направлениям. Первое заключалось в том, что внутри удобного с конструктивной точки зрения и выгодного в смысле прочности корпуса цилиндрической формы находилась наибольшая поверхность нагрева. Это привело к созданию весьма удачного котла, называемого судовым огнетрубным оборотным котлом. Такой котел, появившийся в 50-х годах XIX века, вследствие многих достоинств получил наиболее широкое распространение и удержался на флоте до наших дней.

На рис. 3 показана схема огнетрубного оборотного котла. Его поверхность нагрева составлена из размещенных внутри цилиндрического корпуса жаровых труб 8, огневых камер 7 и дымогарных труб 5. Корпус котла образован барабаном 4 (бочка котла), передним 1 и задним 6 днищами.

В жаровых трубах 8 размещается топка. Горячие газы, образующиеся при сгорании топлива в топке, проходят огневые камеры 7, поворачивают на 180° (отсюда и происходит название котлов — оборотные), поступают в дымогарные трубы 5, а затем в дымовую коробку или дымник 2, откуда удаляются в дымовую трубу.

Для котла характерно движение газов внутри труб, омываемых снаружи водой (отсюда название — огнетрубные котлы). В верхней части корпуса установлен сухопарник 3.

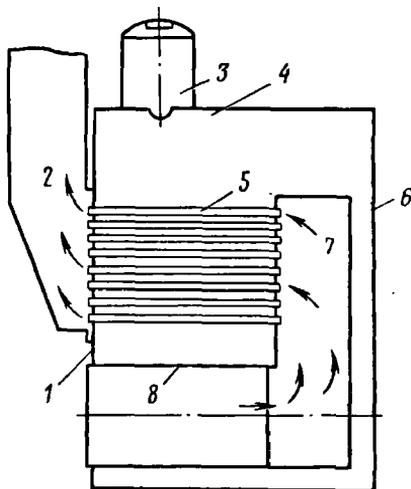


Рис. 3. Огнетрубный оборотный котел

Рассмотрение рис. 3 позволяет сделать вывод о том, что возможности дальнейшего развития внутренней поверхности нагрева у данной конструкции исчерпаны. Поэтому уже во второй половине прошлого столетия наряду с дальнейшим усовершенствованием котлов с внутренней поверхностью нагрева появляются и развиваются котлы с внешней поверхностью нагрева. Это было второе направление в судовом котлостроении.

Стремление увеличить поверхность нагрева котла и выработать пар повышенного давления привело к разделению одного цилиндра (содержащего воду и пар) простейшего котла на несколько цилиндров меньшего диаметра, располагавшихся в газоходах. Впоследствии небольшие цилиндры таких котлов, называвшихся батарейными, были заменены пучками испарительных труб относительно малого диаметра, образующими основную поверхность нагрева котла. Такие котлы были названы водотрубными, так как в них вода и пароводяная смесь перемещаются внутри труб, омываемых снаружи горячими газами.

Водотрубные котлы отличаются компактностью и небольшой массой, позволяют почти неограниченно повышать давление пара. Вследствие этих преимуществ они практически вытеснили огнетрубные котлы на морском флоте.

На рис. 4 показаны схемы горизонтального (а) и вертикального (б) водотрубных котлов. Горизонтальными принято называть котлы, у которых угол наклона испарительных труб к горизонту не превышает 30—35°, а вертикальными — 45° и более.

Позиции на рисунке означают: 1 — пароводящие трубы; 2 — пароводяной барабан-коллектор; 3 — соединительные патрубки; 4, 6 — передние и задние секционные камеры; 5 — испарительные трубы; 7 — водяные коллекторы; 8 — топка.

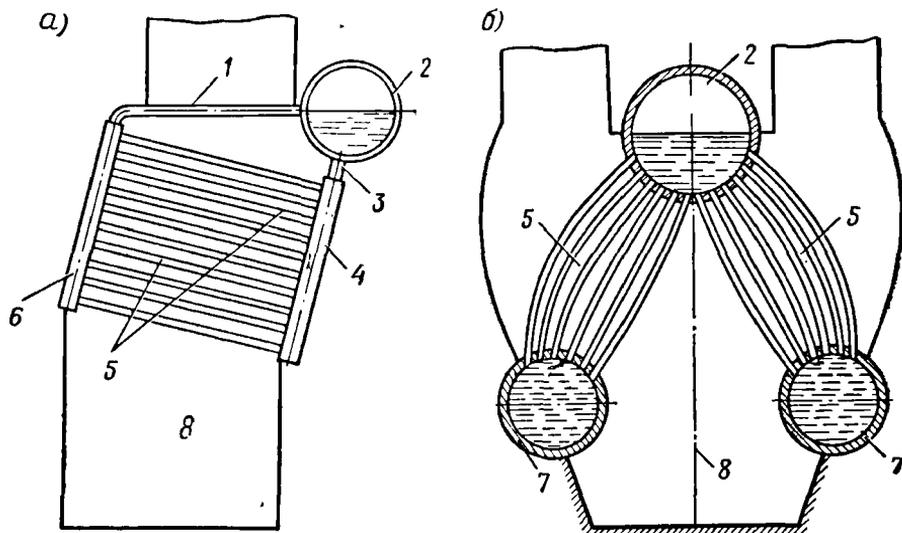


Рис. 4. Горизонтальный и вертикальный водотрубные котлы

Развитие водотрубных котлов шло по пути уменьшения диаметра испарительных труб и уплотнения пучка труб для получения более развитой поверхности нагрева. При увеличении размеров водотрубных котлов диаметр их коллекторов практически мало изменяется. С повышением количества испарительных труб растет только длина коллектора. Это дает возможность повышать давление пара в котле без значительного увеличения толщины стенок барабанов.

Следует отметить, что почти каждая новая конструкция отличается от предыдущих меньшим удельным водосодержанием, т. е. уменьшением величины,

$$W = \frac{M_B}{D},$$

где M — масса воды в котле, т;

D — производительность котла, т/ч;

Для современных котлов $W=0,25\div 0,45$. Это означает, что вся вода из котла может быть за короткое время испарена. Срок, во время которого уровень воды при перерыве питания опустится и обнажит раскаленный металл, исчисляется в таких котлах минутами.

Снижение удельного водосодержания, позволяющее уменьшить массу и размеры котла, сопровождается снижением и его аккумулярирующей способности, т. е. количества тепла, содержащегося в воде и металле котла при его работе.

Величина аккумулярирующей способности имеет большое значение для регулирования работы котла; эту характеристику надо рассмотреть подробнее.

При работе котла в установившемся режиме приход тепла (полученного при сгорании топлива) и его расход (с паром, покидающим котел, и неизбежными тепловыми потерями) равны, т. е. наблюдается тепловое равновесие. При этом температура воды и давление пара в котле остаются постоянными. Однако тепловое равновесие часто нарушается, например, при изменении расхода пара или количества выделяемого в топке тепла, или того и другого одновременно. При этом будет изменяться и давление пара.

Для восстановления требуемой величины давления нужно, чтобы выделение тепла в топке снова стало соответствовать его расходу. Для этого необходимо определенное время, зависящее не только от выделения тепла в топке, но и от запаса тепла в котле.

При увеличении расхода пара количество выделяемого в топке тепла может оказаться недостаточным, в результате чего давление пара снизится. То же самое происходит и при неизменном расходе пара, но в случае временных нарушений работы топки (например, при погасании факела). Тепловое равновесие нарушается также при снижении расхода пара (замедлении хода судна, внезапной остановке главных двигателей) или при увеличении тепловыделения в топке: в результате передачи воде избыточного тепла температура ее кипения и давление пара возрастают.

Для нормальной работы паровых двигателей давление пара должно быть в известных пределах постоянным, а паропроизводительность котла должна соответствовать потреблению пара. Колебания давления и расхода пара в котле старых систем, обладающих высоким водосодержанием, сглаживаются за счет значительной аккумуляции тепла. При уменьшении расхода пара избыток тепла, выделяющегося в топке, пойдет на аккумуляцию. Давление пара в котле при этом возрастает, и повышается энтальпия воды. Именно на это и расходуется излишнее тепло, которое таким образом запасается в воде и в металле котла.

Если при дальнейшей работе котла увеличится расход пара, то давление в котле упадет и вода окажется перегретой по сравнению с энтальпией, соответствующей этому сниженному давлению.

Накопленное в воде излишнее тепло расходуется на образование дополнительного количества пара, что на некоторое время

восстанавливает требуемое давление. Это явление называется аккумуляцией тепла давлением. Кроме того, используют еще аккумуляцию тепла уровнем воды, усиливая питание котла и поднимая в нем уровень при снижении расхода пара, чтобы иметь запас тепла при увеличении расхода пара из котла.

Способность котла аккумулировать тепло, связанная с его удельным водосодержанием, имела важное значение для котлов с ручным обслуживанием топки и ручным регулированием питания. Если удельное водосодержание огнетрубного котла равно 4,5, это означает, что для испарения всей воды, содержащейся в котле при работе его с полной нагрузкой, потребуется 4,5 ч. Последствия нарушения теплового равновесия в таком котле становятся заметными только через 15—20 мин с момента его возникновения. Этого времени достаточно для того, чтобы кочегар мог отрегулировать работу топки.

Котлам с большим водосодержанием присущи, однако, значительные недостатки: большая масса, медленный подъем давления пара и др.

Как было сказано, развитие котельных установок неуклонно сопровождалось уменьшением водосодержания. В современных водотрубных котлах оно составляет $W=0,25 \div 0,3$. Это означает, что вся вода в котле может быть испарена за 15—20 мин. Регулировать работу таких котлов вручную практически невозможно. В настоящее время широко применяют автоматическое регулирование горения, при котором подача топлива и воздуха в топку, а следовательно, и его тепловыделение регулируются автоматически, в соответствии с нагрузкой котла.

Величина удельного водосодержания имеет также непосредственное отношение к регулированию питания котла водой. Для судовых огнетрубных котлов это сводится к поддержанию уровня воды в котле в заданных пределах. Например, для огнетрубного котла после прекращения питания требуется не менее 10 мин для того, чтобы уровень воды стал ниже допустимого и возникла опасность перегрева металла. Этого времени достаточно для принятия необходимых мер.

В котлах с малым удельным водосодержанием изменение уровня от наивысшего допускаемого до наименьшего при прекращении питания происходит в течение нескольких десятков секунд и ручное управление питанием становится затруднительным. Поэтому для современных судовых котлов применяют, как правило, автоматическое регулирование питания.

§ 6. Основные этапы развития котлов

Производство XIX в. было создано на основе паровых двигателей, превращающих тепловую энергию в механическую работу. Развитие крупной промышленности потребовало расширения рынков и быстрой, безопасной и массовой переброски сырья и товаров.

Началом внедрения пара на морских судах можно считать постройку Фултоном в 1807 г. парохода «Клермонт». На этом деревянном судне с машиной мощностью в 20 л. с. был установлен небольшой котел с кирпичной обмуровкой, отапливавшийся дровами.

Первый русский пароход «Елизавета» совершил рейс на линии Петербург — Кронштадт 3 ноября 1915 г. В 1815—1820 гг. было построено еще несколько пароходов, на которых ставили медные и железные коробчатые котлы, работавшие с избыточным давлением пара 0,2—0,3 кгс/см².

Через 20 лет после постройки первого парового судна в мировом флоте насчитывалось уже около 1000 пароходов, и рост парового тоннажа стал обгонять рост парусного флота.

В начале XIX века судовые котлы отапливались дровами, силовые установки не обладали достаточной надежностью в работе, вследствие чего первые океанские пароходы были парусно-паровыми. До середины XIX века питание котлов производилось морской водой. Образующееся при этом большое количество накипи на поверхности нагрева вызывало перегрев стенок и нередко приводило к взрывам котлов. Постройка во второй половине XIX века стальных цилиндрических котлов и применение для их питания конденсата пара дали возможность повысить давление пара до 5—7 кгс/см² и значительно уменьшить опасность взрывов.

В 70-х годах XIX века появились судовые огнетрубные оборотные котлы, был применен перегрев пара и несколько позже — подогрев воздуха. С тех пор основная схема огнетрубного котла существенным изменениям не подвергалась.

С появлением в конце прошлого века нового типа парового двигателя — турбины выяснилось, что огнетрубный котел не может удовлетворить ее потребности в паре повышенных параметров. К началу XX века насчитывалось уже около 50 конструкций водотрубных котлов, но они отличались сложностью и дороговизной, а по экономичности уступали огнетрубным.

Выдающаяся роль в совершенствовании котельной техники принадлежит русским ученым и инженерам. Под руководством конструктора В. И. Калашникова (1849—1908 гг.) было построено более 150 паровых котлов. Разносторонняя деятельность инж. В. Г. Шухова (1853—1939 гг.), впоследствии почетного академика АН СССР, была тесно связана с котельной техникой. В. Г. Шухов создал оригинальную конструкцию мощного водотрубного котла, неоднократно копировавшуюся за границей. Большие заслуги в области создания судовых водотрубных котлов принадлежат В. Я. Долголенко (1864—1941 гг.). Котлы его конструкции были установлены на многих кораблях военного флота, в том числе и на историческом крейсере «Аврора».

Судовые котлы строили на многих крупных отечественных заводах — Невском, Балтийском, Северной верфи, Сормовском, Николаевском и др. Коллективы этих предприятий создали и усовершенствовали много типов морских котлов.

В России в 1893 г. над созданием наиболее совершенных конструкций прямоточных водотрубных котлов работали Д. П. Артемьев и П. Д. Кузьминский. В 1907 г. испытывали прямоточный котел В. В. Табулевича. Такие котлы были построены уже в советское время Л. К. Рамзиным (1887—1948 гг.).

Отечественной науке и технике принадлежит заслуга в решении проблемы сжигания жидкого топлива в котлах. Начало этим работам положил великий русский ученый Д. И. Менделеев (1834—1907 гг.).

Способ сжигания жидкого топлива распыливанием был впервые предложен А. И. Шпаковским в 1865 г. Оригинальные конструкции форсунок создали В. Г. Шухов, О. К. Ленц и др. В конце XX века коллектив инженеров Тентелевского завода создал первую форсунку с механическим распыливанием жидкого топлива.

За рубежом наиболее распространенные типы морских котлов создавали конструкторы Бабкок, Вилькокс, Ярроу (Англия), Бельвиль и Норман (Франция), Бенсон и Вагнер (Германия) и др.

Одновременно с совершенствованием конструкций разрабатывались теоретические методы расчета котлов, основанные на научных исследованиях процессов горения топлива, теплопередачи и парообразования. В области теории паровых котлов успешно работал проф. И. А. Вышнеградский (1831—1895 гг.), создавший капитальный труд «Механическая теория теплоты». Теория тяги была разработана впервые инж. И. П. Алымовым (1831—1884 гг.).

Широко известны имена проф. В. И. Гриневецкого (1871—1919 гг.), предложившего в 1905 г. метод графического расчета котла, и проф. К. В. Кирша (1877—1919 гг.), работавшего над вопросами сжигания твердых топлив и впервые в мире осуществившего сжигание в топках котлов антрацита.

За рубежом в области развития теории паровых котлов большую роль сыграли труды известных ученых Мюнцингера и Бауэра (Германия), Ситона и Стромейера (Англия), Гудзона (США) и других.

Победа Великой Октябрьской социалистической революции открыла широчайшие перспективы для творческой деятельности и технического прогресса народного хозяйства. Ленинский план электрификации страны, развитие отечественной индустрии требовали совершенствования котельной техники, постройки новых высокоэкономичных и мощных котельных агрегатов. Ф. Э. Дзержинский и акад. Г. М. Кржижановский по заданию В. И. Ленина руководили работами по организации новой экспериментальной базы для научных работ. Были созданы Всесоюзный теплотехнический институт (ВТИ), ныне носящий имя Ф. Э. Дзержинского, Центральный котлотурбинный институт (ЦКТИ) им. И. И. Ползунова, Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского и другие.

§ 7. Основные сведения о топливе

Тепловая энергия, заключенная в паре, который вырабатывает котел, получается за счет химических реакций горения топлива. Свойства топлива оказывают непосредственное влияние на показатели работы котла.

Топливом называется горючее вещество, которое активно окисляется кислородом воздуха и обеспечивает высокое тепловыделение при горении.

Топливо для морских паровых котлов должно удовлетворять следующим требованиям:

высокое выделение тепла при горении на единицу объема топлива, что обусловлено необходимостью иметь наибольший радиус действия судна при наименьшем запасе топлива, чтобы обеспечить больше места для груза;

отсутствие склонности к самовозгоранию и постоянство характеристик при длительном хранении в судовых бункерах;

минимальное содержание негорючих веществ (золы и влаги), которые, занимая место, не дают тепла и ухудшают горение.

невысокая стоимость (на современных судах расходы топлива составляют до 40% общих расходов по эксплуатации судна, т. е. стоимость топлива является одной из основных составляющих себестоимости перевозок);

малое содержание серы, образующей сернистый газ при горении топлива. При низкой температуре дымовых газов возможна конденсация дымовых паров (точка росы) на стальных поверхностях, размещенных в газоходах; образующаяся при этом серная кислота и другие сернистые соединения разъедают поверхности (экономайзера, воздухоподогревателя) и быстро выводят их из строя.

На морском флоте в связи с указанными требованиями используют наиболее ценные виды топлива — мазут и каменный уголь, причем применение последнего в настоящее время ограничено судами старой постройки.

Следует иметь в виду, что топливо, потребляемое морским флотом, представляет собой ценное сырье для химической промышленности, поэтому его экономия имеет большое значение для всего народного хозяйства СССР.

Рентабельность работы морского флота во многом зависит от расходов на топливо. Стоимость же топлива зависит не только от его качества, но также от расходов по его перевозке, хранению на складе и т. д. Например, стоимость 1 т топочного мазута зависит от его качества и порта бункеровки. При приеме топлива в зарубежных портах обычно учитывают разницу цен в них и по возможности осуществляют бункеровку там, где топливо наиболее дешево.

Применение дешевого топлива и повседневная борьба за его экономию служат основой снижения себестоимости перевозок на морском транспорте.

§ 8. Химический состав и теплота сгорания топлива

Пригодность топлива для сжигания в том или ином топочном устройстве и выбор наиболее рационального способа сжигания зависят от свойств топлива, определяемых так называемыми опорными характеристиками.

Основной характеристикой топлива является его элементарный состав.

Топливо представляет собой химические соединения различных элементов: углерода С, водорода Н, кислорода О, азота N и серы S. Кроме того, топливо содержит влагу W и некоторые минеральные соединения, называемые золой А.

Рабочая масса топлива характеризует состав топлива в том виде, в котором оно поступает в котельную. Для рабочей массы можно записать:

$$C^p + H^p + O^p + S^p + N^p + A^p + W^p = 100\%, \quad (5)$$

где C^p , H^p , O^p и т. д. — содержание отдельных элементов в процентах по массе.

Если из топлива полностью удалить влагу, то получим сухую массу:

$$C^c + H^c + O^c + S^c + N^c + A^c = 100\%.$$

Содержание золы и влаги в рабочей массе топлива называется балластом:

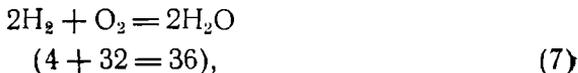
$$B = A^p + W^p. \quad (6)$$

Количество тепла в килокалориях, выделяющееся при полном сгорании 1 кг топлива, называется теплотой сгорания (теплотворной способностью) топлива.

При определении теплоты сгорания топлива в лабораторных условиях водяные пары по окончании процесса сгорания конденсируются; при этом определяют так называемую высшую теплоту сгорания топлива, Q_v ккал/кг. В системе СИ теплота сгорания определяется в килоджоулях на 1 кг ($1 \text{ ккал/кг} = 4,19 \text{ кДж/кг}$).

В практике большое значение имеет низшая теплота сгорания топлива, т. е. с вычетом тепла, идущего на испарение влаги топлива и влаги, образующейся при сгорании водорода (так как дымовые газы покидают котел при температуре более 100°C и содержащиеся в них пары не конденсируются).

В составе рабочей массы топлива имеется W^p частей влаги и при горении образуется девять частей воды на каждую часть H^p . Действительно:



т. е. на одну часть водорода приходится $\frac{36}{4} = 9$ частей воды (или водяных паров).

При этих условиях можно получить следующую зависимость между низшей и высшей теплотой сгорания топлива (ккал/кг):

$$Q_H^p = Q_B^p - 600(9H^p + W^p), \quad (8)$$

где 600 ккал/кг — примерное значение скрытой теплоты парообразования сконденсировавшегося водяного пара и нагрева воды от 20 до 100°, а H^p и W^p — выражены в долях от 1 кг топлива.

§ 9. Основные технические характеристики мазутов

В настоящее время для отопления главных котлов на судах морского флота применяют преимущественно мазуты. Для отопления вспомогательных котлов часто применяют то же топливо, на котором работает и главный двигатель (ГД), т. е. дизельное топливо разных марок и моторное топливо марок ДТ и ДМ. Топочный мазут представляет собой искусственное нефтяное топливо, которое изготавливают на нефтебазах путем разбавления остатков крекинг-процесса маловязкими фракциями перегонки нефти (солями или керосином) в количестве до 14%.

Флотские мазуты изготавливают разбавлением остатков прямой гонки сырой нефти. Мазут содержит тяжелые примеси (до 30%), состоящие из сложных молекул с повышенным содержанием углерода. Большинство примесей — это смолистые вещества, которые при длительном хранении мазута частично образуют в результате окисления трудносжигаемые и трудноудаляемые отложения. Для уменьшения вредного влияния этих отложений в мазут добавляют 0,2% по массе присадок ВНИИ-НП-102 или ВНИИ-НП-103.

Качество мазута определяется его характеристиками: плотностью, вязкостью, температурой застывания, вспышки и воспламенения, зольностью и влажностью.

По величине плотности мазута определяют расход топлива (путем измерения объема цистерн и танков). При этом надо учитывать температуру топлива в танках. Плотность мазута определяют ареометром при температуре 20°С; обычно она составляет 920—980 кг/м³, но иногда может превысить 1000 кг/м³. В системе СИ плотность измеряется в ньютонах на кубический метр (1 Н/м³ = 0,102 кг/м³).

Вязкость мазута имеет большое значение для правильного устройства и эксплуатации топливной системы на судах. Вязкость обычно измеряют в условных градусах вязкости (градусах Энглера) при определенной температуре. Градус вязкости (°ВУ или °Е) — условная величина, представляющая собой отношение времени истечения 200 мл данной жидкости из калиброванного отверстия специального прибора (вискозиметра Энглера) ко времени истечения из того же отверстия 200 мл дистиллированной воды при температуре 20°С (диаметр отверстия в стандартном вискозиметре Энглера равен 2,83 мм).

Вязкость мазута обычно определяют при 50 или 70° С, что специально указывают (например, °ВУ₇₅ = 12).

Измерение вязкости топлива в градусах Энглера принято в СССР и большинстве европейских стран. В США вязкость топлива оценивают в секундах Сейболта (Su), в английских странах — в секундах Редвуда (Rl). Между этими единицами вязкости и кинематической вязкостью ν_k в сантистоксах (сСт) существует довольно сложная зависимость, и на судне должна быть таблица переводных коэффициентов.

Для подавляющего большинства мазутов, применяющихся на морских судах, можно пользоваться следующими соотношениями:

$$^{\circ}E = 0,132\nu_k; \quad Rl = 4,35\nu_k; \quad Su = 4,62\nu_k.$$

Вязкость мазута зависит от температуры. Маловязкий мазут легче перекачивается по трубам, лучше распыливается форсункой и полнее сгорает. При сжигании высоковязкого мазута его подогревают в системе подогрева топлива на пути от судовых танков до расходных цистерн и перед форсунками.

Мазут подогревают обычно паром, протекающим по змеевикам в цистернах. Соединения трубопроводов и их фланцы должны быть герметизированы, чтобы не было обводнения мазута. В судовых танках во избежание большого расхода пара обычно применяют подогрев только у мест приема мазута трубами, идущими к перекачивающему насосу.

Температурой застывания называют такую температуру, при которой текучесть жидкости практически прекращается. Температура застывания мазутов находится в пределах от —8 до +25° С (последняя величина относится к высокопарафинистым мазутам).

Температура подогрева, при которой над поверхностью налитого в чашку мазута образуются в случае поднесения открытого огня кратковременные вспышки, называют температурой вспышки. Если огонь убрать от поверхности жидкости, то горение (вспышки) должно прекратиться.

Температурой воспламенения называют такую температуру подогрева налитого в чашку мазута, при которой начинается устойчивое горение его с поверхности, если поднести открытый огонь, причем горение продолжается не менее 5 с после того, как источник огня убран.

Температуры вспышки и воспламенения определяют либо в приборе Мартенс-Пенского с закрытой чашкой, либо в приборе Бренкена с открытой чашкой, причем показания для одного и того же мазута будут неодинаковыми. Поэтому после величины температур вспышки и воспламенения всегда указывают прибор с помощью которого они определены.

В приборе Мартенс-Пенского температуры вспышки и воспламенения определяют при постепенном нагревании мазута в закрытой чашке. Прибор имеет специальную зажигательную лампу, которую наклоняют в пространство над поверхностью нагреваемого

мазута под крышкой, когда его температура становится близкой к ожидаемой (вспышки или воспламенения).

В приборе Бренкена применен открытый тигель, в котором мазут нагревается до определенной температуры вспышки или воспламенения.

Чем более вязок мазут, тем значительно различаются температуры вспышки, определенные с помощью этих приборов, причем температура вспышки по Мартенс-Пенскому будет ниже, чем по Бренкену, так как в закрытом приборе имеются более благоприятные условия образования горячей смеси из воздуха и паров мазута над его поверхностью.

Низкая температура вспышки увеличивает опасность пожара. В открытых цистернах разрешается максимальный подогрев мазута до температуры на 20—30° С ниже температуры вспышки.

Зольность мазута АР (в количестве 0,1—0,3%) содержит агрессивные вещества, которые, расплавляясь на горячей поверхности металла, вызывают его коррозию. Такими веществами являются соединения натрия (NaCl, Na₂SO₄ и Na₂O) и окислы ванадия.

При достаточном количестве кислорода в газовой среде на металле отлагается легкоплавкая и весьма агрессивная пятиокись ванадия V₂O₅, а при малом количестве кислорода — тугоплавкая неагрессивная окись V₂O₄.

Содержащиеся в дымовых газах продукты сгорания горючей (органической) серы также вызывают коррозию в присутствии кислорода и водяных паров.

Характеристики жидкого топлива регламентируются ГОСТами. В табл. 1 представлены основные характеристики отечественных мазутов, применяющихся на морском флоте с 1965 г. (по ГОСТ 10585—63).

Таблица 1

Характеристики	Мазут нефтяной		
	флотский		топочный
	Ф-5	Ф-12	40-М
Вязкость условная (не более), °ВУ:			
при температуре 50° С	5	12	—
» » 80° С	—	—	8
Зольность (не более), %	0,1	0,1	0,15
Содержание (не более), %			
механических примесей	0,1	0,15	1
воды	1	1	2
серы	2	0,8	0,5 (малосернистый)
			2 (сернистый)
			3,5 (высокосернистый)
Температура вспышки (не ниже), °С, при определении в тигле:			
закрытом	80	90	—
открытом	—	—	90

Характеристики	Мазут нефтяной		
	флотский		топочный
	Ф-5	Ф-12	40-М
Температура застывания (не выше), °С	—5	—8	+10
Теплота сгорания низшая на сухое топливо (не является браковочной характеристикой), ккал/кг	9870	9870	9700

Примечания: 1. Характеристики моторного топлива, применяющегося для вспомогательных котлов теплоходов, приведены в соответствующих руководствах.

2. Мазут флотский Ф-5 получают из продуктов прямой перегонки нефти с добавкой 2% керосино-газойлевых фракций крекинга, а мазут-топливо — из крекинг-мазуты, также разбавленных легкими фракциями.

Влажность мазута обычно составляет 1—2%, но может достигать до 5% и более вследствие проникновения заборной воды через неплотности танков, неправильного хранения мазута на нефтебазах, баржах и т. д.

Отдельные характеристики мазута можно определить непосредственно на судне с помощью судовой калориметрической лаборатории анализов масла и топлива (СКЛАМТ).

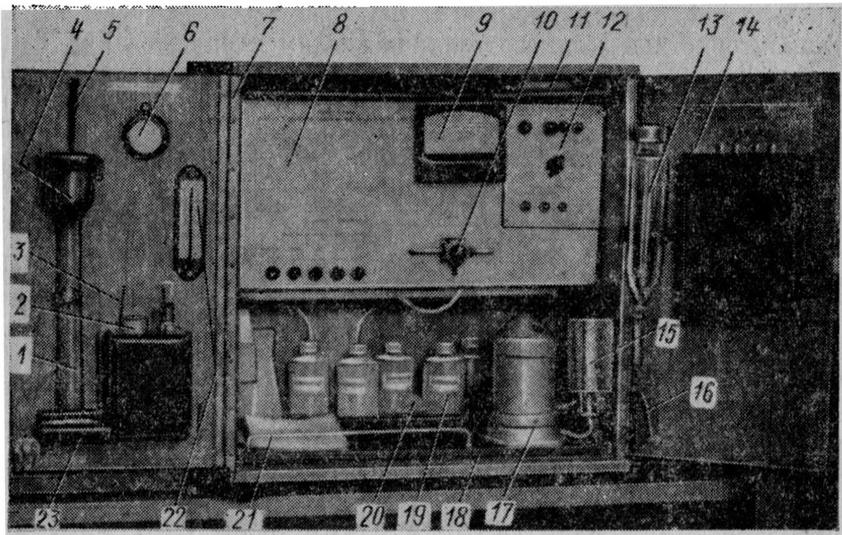


Рис. 5. Лаборатория СКЛАМТ-1

Лаборатория СКЛАМТ-1 (рис. 5) позволяет определить следующие характеристики топлива: плотность, вязкость, содержание воды, температуру вспышки.

Определение плотности. Плотность определяют денсиметрами со следующими пределами ареометрических шкал: 0,7—0,76; 0,76—0,82; 0,82—0,88; 0,88—0,94; 0,94—1.

Пробоотборник, заполненный испытуемым нефтепродуктом, выдерживают при температуре окружающей среды с таким расчетом, чтобы разность температур пробы и окружающего воздуха не превышала $\pm 5^\circ\text{C}$. Температуру нефтепродукта измеряют термометром 22.

После выравнивания температуры нефтепродукт наливают в чистый сухой цилиндр 1, затем берут денсиметр 14, который находится на дверце лаборатории и, держа его за верхний конец, опускают в нефтепродукт. После прекращения колебаний денсиметра производят отсчет по верхнему краю мениска; при этом газ должен находиться на уровне мениска.

Отсчет, произведенный по шкале денсиметра, показывает плотность нефтепродукта при температуре измерения. Для приведения плотности к любой температуре делают расчет по формуле

$$p_t = p_{t_1} + \gamma(t_1 - t), \quad (9)$$

где p_t и p_{t_1} — плотности нефтепродукта при соответствующих температурах;

γ — температурная поправка на плотность (определяется по табл. 2);

t_1 — температура, при которой определяется плотность;

t — температура, к которой приводится плотность.

При измерении плотности высоковязких нефтепродуктов (вязкость при 50°C выше 200 сСт) их разбавляют равным количеством керосина или дизельного топлива известной плотности. Плотность полученной смеси приводят к нужной температуре по формуле (9) и вычисляют по формуле

$$p = 2p_1 - p_2, \quad (10)$$

где p_1 — плотность смеси;

p_2 — плотность керосина или дизельного топлива.

Т а б л и ц а 2

Плотность нефтепродуктов	Температурная поправка
0,69—0,739	0,0009
0,74—0,819	0,0008
0,82—0,889	0,0007
0,89—0,969	0,0006
0,97—1	0,0005

Пример. Определить плотность мазута, если плотность смеси его с керосином $p_1^{20} = 0,885$, плотность керосина $p_2 = 0,84$.

Плотность мазута при 20°C :

$$p^{20} = 2 \times 0,885 - 0,84 = 0,93.$$

Определение вязкости. Метод основан на зависимости времени истечения нефтепродукта от температуры. Определение можно проводить при крене не более 15° и при температурах нефтепродуктов 50 и 100°C .

Средняя проба нефтепродукта должна принять температуру помещения, где будет проводиться определение. Перед анализом необходимо измерить температуру нефтепродукта с помощью термометра.

При испытании нужно закрыть отверстие индикатора 4 вязкости штырем 5 и заполнить его (отверстие) испытуемым предварительно перемешанным нефтепродуктом (см. рис. 5). С помощью термометра измерить температуру нефтепродукта и долить нефтепродукт до края индикатора вязкости. Под отверстие индикатора подставить мерный цилиндр, выдернуть штырь и одновременно включить секундомер 6. Когда нефтепродукт заполнит цилиндр до метки 100 мл, выключить секундомер, закрыть отверстие индикатора вязкости штырем и сделать отсчет в секундах. По специальным номограммам, находящимся на верхней полке лаборатории, для данного продукта находят вязкость в сантистоксах (сСт) при 50 или 100° С.

Определение содержания воды в топливе. Метод определения основан на измерении подъема температуры при взаимодействии гидрида кальция с водой, содержащейся в испытуемом нефтепродукте.

Пробу нефтепродукта тщательно перемешивают встряхиванием (в течение 5 мин) в пробоотборнике, заполненном не более чем на $\frac{3}{4}$ объема. Вязкие и парафинистые нефтепродукты предварительно нагревают до 40—50° С.

Для определения содержания воды в мазутах в мерный цилиндр 1 наливают 10 мл испытуемого продукта и из крана 10 доливают до 50 мл керосин или дизельное топливо, предварительно проверив содержание воды в нем. Затем закрывают цилиндр пробкой и тщательно перемешивают в течение 5 мин. В пробирку отбирают 10 мл полученной смеси, опускают в пробирку с пробой термометр и помещают ее в гнездо пенопластового футляра 23.

При отборе пробы нагретого нефтепродукта пробирку с нефтепродуктом выдерживают до температуры окружающей среды. Замеряют начальную температуру t_1 испытуемого продукта. Ампулу с гидридом кальция, находящуюся в специальном футляре 11, вскрывают при помощи надфиля. Гидрид кальция высыпают в пробирку, перемешивают и наблюдают за повышением температуры. Максимальное показание термометра отмечают как конечную температуру t_2 пробы.

По полученной разности температур $\Delta t = t_2 - t_1$ (по номограмме, которая находится на верхней панели лаборатории) определяют содержание воды в испытуемом нефтепродукте в процентах. Результат умножают на 5, и, при наличии воды в керосине или дизельном топливе, ее содержание вычитают из полученной величины.

Подъем температуры, не превышающей 0,5° С, после прибавления гидрида кальция к испытуемой пробе и отсутствие выделения пузырьков газа свидетельствуют о практическом отсутствии воды в исследуемом нефтепродукте. Время взаимодействия нефтепро-

дукта с гидридом кальция без разбавления керосином составляет 10—20 мин, при разбавлении керосином оно равно 5—10 мин.

Остальные позиции на рис. 5 означают: 2 — пробирки для определения содержания воды; 3 — проволока \varnothing 1 мм; 7 — защелка; 8 — верхняя панель; 9, 17 — приборы для определения температуры вспышки; 12 — блок стабилизированного питания; 13 — делительная воронка; 15 — пробоотборник; 16 — фиксатор дверцы; 18 — выдвижной рабочий столик; 19 — емкости для индикаторов (реактивов); 20 — автоматические пипетки (дозаторы); 21 — зажим для фильтровальной бумаги.

Определение температуры вспышки топлива. Температуру определяют путем визуального наблюдения за воспламенением паров нефтепродуктов от нагретой электрическим током спирали специального воспламенителя. Температуру измеряют электрическим термометром, шкала которого проградуирована на два предела измерений (в °С): от 50 до 150; от 150 до 250.

При определении температуры вспышки топлива используют первую шкалу.

Конструктивно прибор состоит из двух блоков: блока нагревателя с тигелем и датчиком температуры и блока стабилизированного питания с измерительным прибором, проградуированным в градусах Цельсия.

Для определения температуры вспышки топлива желательно прогреть установку до 50°С.

Перед испытанием следует:

снять с блока нагревателя защитный колпак; вынуть из блока нагревателя воспламенитель и тигель; установить воспламенитель в гнездо;

включить установку тумблером в сеть. В течение 5 с по секундомеру при нажатой кнопке вспышки определить степень нагрева воспламенителя (спираль должна быть нагрета до ярко-красного каления);

вынуть воспламенитель из гнезда, закрыть нагреватель защитным колпаком и прогреть установку до 100°, поставив переключатель интервала температур в положение 50—150°С, переключатель предела нагрева — на 90—110°С. Пока идет нагрев установки до 100°С, заполнить тигель (с более высоким внутренним стержнем) исследуемым топливом. Налить топливо в тигель с небольшим менником до уровня верхней кромки стержня.

Когда установка прогреется до 100°С, переключатель предела нагрева поставить в нулевое положение. Снять с нагревателя защитный колпак и охладить установку до 50°С.

Во время испытания необходимо:

установить тигель с исследуемым топливом в нагреватель, воспламенитель — в гнездо и проверить правильность установки воспламенителя по отношению к тигелю (спираль воспламенителя должна быть ниже верхнего края тигеля на толщину проволоки);

закрыть нагреватель защитным колпачком (смотровое окно должно быть обращено к себе). Поставить переключатель предела

нагрева на два интервала температур выше предполагаемой температуры вспышки исследуемого топлива. Проверить положение переключателя интервала на 50—150°С и следить за повышением температуры на нижней шкале измерительного прибора так, чтобы скорость нарастания температуры не превышала 2°С в минуту. Скорость нагрева регулировать переключателем предела нагрева; за 10°С до предполагаемой температуры вспышки в течение 5 с при нажатой кнопке вспышки наблюдать вспышку через смотровое окно защитного колпака. Включение кнопки повторять через каждые 2°С до появления вспышки, а при ее появлении зафиксировать температуру вспышки по измерительному прибору. Выключить установку тумблером из сети. Показание измерительного прибора в момент появления вспышки соответствует температуре вспышки топлива в закрытом тигле;

после определения температуры вспышки топлива снять защитный колпак, пинцетом вынуть воспламенитель и тигель из нагревателя, вылить из тигля топливо и протереть его сухой ветошью; повторить определение температуры вспышки топлива при охлаждении установки до 50°С; расхождение между двумя параллельными определениями не должно превышать $\pm 3^\circ\text{C}$.

Для анализа топлива необходимы разбавители (керосин и дизельное топливо) и гидрид кальция в ампулах 0,7 г.

В помещении, где проводится работа с нефтепродуктами, запрещается пользоваться открытым огнем. На рабочем месте и около него запрещается хранить горючие вещества, кроме пробы, с которой проводится работа. Использованные жидкости нужно выливать в сточную цистерну. У рабочего места должен находиться огнетушитель.

Следует соблюдать особую осторожность при работе с гидридом кальция. Открывать ампулы можно только сухим надфилем, при попадании гидрида кальция на кожу рук необходимо протереть это место чистой ветошью и только после полного удаления гидрида кальция вымыть руки водой с мылом.

§ 10. Прием, хранение и расходование топлива

Прием и хранение топлива на морских судах определяются Правилами [10]. В Правилах Регистра СССР предусмотрены особые требования, предъявляемые к устройству емкостей для хранения топлива.

Топливо на морских судах хранят в двойном дне, бортовых и центральных бункерах (цистернах), которые должны быть снабжены средствами вентиляции и мерительными трубками для определения уровня. Топливо поступает с береговых баз через шланги или стальные трубопроводы с шарнирными сочленениями и приемные фильтры с металлическими сетками. При большой вязкости и низкой температуре мазут подогревают.

Во время бункеровки следует периодически определять температуру и плотность мазута. Количество принятого мазута опре-

деляют по разнице уровней в резервуарах, из которых мазут подается на судно, либо путем обмера судовых емкостей (для контроля лучше всего пользоваться обоими способами). В последнем случае судовые емкости обмеряют не ранее чем через 5 мин после окончания подачи топлива (после удаления пузырьков воздуха из толщи мазута). Междудонные цистерны заливают возможно полнее, но не заполняя вентиляционных и мерных труб, так как в противном случае топливная цистерна окажется под статическим давлением, создаваемым столбом в этих трубах.

Не следует допускать свободного уровня топлива в двух отсеках междудонного пространства с одного борта: свободный уровень любой жидкости в цистернах и отсеках отрицательно сказывается на остойчивости судна.

Хранение и расходование мазута на судне. При хранении мазута в двойном дне балластные отсеки по мере расхода заполняют водой (что может в дальнейшем вызвать обводнение топлива).

На всех судах обычно установлены две попеременно работающие расходные (отстойные) цистерны. Запас мазута в них должен быть достаточным на 12—24 ч хода судна. В этих цистернах, снабженных паровыми змеевиками для подогрева, топливо отстаивается и вода спускается через нижние краны (при сжигании в котлах дизельного топлива подогрева не требуется). Расходные цистерны имеют также нефтемерные стекла, поплавковые указатели уровня или специальные приборы для быстрого замера уровня (например, пневмеркаторы, действие которых основано на измерении давления, необходимого для проталкивания воздуха через трубку, погруженную до дна цистерны).

Газы, выделяющиеся из мазута, легко воспламеняются, поэтому надо строго соблюдать меры противопожарной безопасности. Кроме того, газы задерживаются в пустых цистернах, скапливаются под плитами котельного отделения и в других местах, где нет движения воздуха. Поэтому спуск людей разрешается после двухчасового непрерывного вентилирования цистерн и только с аккумуляторными фонарями. У открытых горловин мазутных цистерн, в которых работают люди, ставят дежурных.

Для того чтобы судно не потеряло остойчивость, мазут расходуют в строго установленном порядке. Если мазут поступает к форсункам котла из одной расходной цистерны, то в другой в это время подогревают топливо и отделяют воду. Затем питание форсунок переключают на цистерну с подогретым мазутом, а освободившуюся заполняют мазутом из бортовых (или центральных) цистерн по очереди. Мазут перекачивают из одной цистерны в другую с таким расчетом, чтобы обеспечить в них минимально свободные поверхности уровня топлива. Все эти перекачивания осуществляют обычно на одной вахте одни и те же лица с ведома старшего механика.

Особенно внимательно следует перекачивать мазут из одних цистерн в другие для выравнивания крена судна.

Расход мазута учитывают по показаниям нефтемерных приборов расходных цистерн каждую вахту и ежедневно проверяют по основной цистерне, делая записи в машинном журнале.

Отбор контрольных проб топлива. Если возникают сомнения в том, что качество принимаемого судном топлива соответствует указанному в документах, необходимо отобрать две пробы (лабораторную и контрольную) и отправить в лабораторию пароходства на анализ. Для того чтобы эти пробы отражали среднее количество всей принятой партии топлива, сначала отбирают генеральную пробу, из которой в дальнейшем получают контрольные пробы. Наличие в лаборатории двух проб позволяет избежать ошибок в оценке качества топлива.

Генеральную пробу мазута отбирают из резервуаров или цистерн специальными пробоотборниками емкостью 1 л. $\frac{1}{5}$ часть генеральной пробы отбирают из верхней части цистерны на глубине 10—20 см от поверхности, $\frac{3}{5}$ — из середины цистерны и $\frac{1}{5}$ — на самом нижнем уровне.

После тщательного перемешивания генеральной пробы мазута из нее отбирают лабораторную и контрольную пробы, каждую массой около 1 кг (1,5 л). Пробы помещают в герметически закрытые бутылки, указав на них дату отбора, наименование судна и фамилию лица, ответственного за отбор.

Точное соблюдение правил отбора пробы способствует устранению разногласий между администрацией судна и бункеровочной базой по вопросам качества топлива. Если характеристики топлива значительно отличаются от указанных в документах, корректируют нормы расхода топлива в соответствии с его фактическими характеристиками, полученными при техническом анализе в лаборатории.

Глава IV. ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА

§ 11. Основные реакции горения

Горением называется химический процесс соединения топлива с окислителем, происходящий с интенсивным выделением тепла, которое вызывает резкое повышение температуры продуктов горения.

Процесс горения весьма сложен. Теоретические и экспериментальные работы отечественных химиков, физиков и теплотехников позволили уточнить картину этого процесса. Например, если в начале текущего столетия считали, что реакция соединения углерода с кислородом осуществляется непосредственно по схеме $C + O_2 = CO_2$, то более подробные исследования выявили условность такой схемы, являющейся только записью начала и конца реакции.

Наиболее дешевым и распространенным окислителем является кислород воздуха. Поэтому все расчеты процессов горения осно-

ываются на реакциях соединения компонентов, входящих в элементарный состав топлива, с кислородом.

Если в результате горения получены продукты, не способные к дальнейшей реакции с кислородом воздуха при обычных температурах газов на выходе из топки ($800\text{--}1200^\circ\text{C}$), то такое горение называется полным. При недостаточном количестве кислорода или низкой температуре в месте реакции могут быть получены продукты неполного горения.

Рациональное ведение процесса горения состоит в том, чтобы добиться сгорания топлива, близкого к полному. При этом выделение тепла в топке будет наибольшим, а уходящие газы не будут содержать заметного количества продуктов неполного горения типа CO , H_2 и др.

Первым условием правильной организации процесса горения является подача в топку нужного количества воздуха. Как недостаточное, так и чрезмерное количество введенного воздуха вызывает падение экономичности работы котла.

Чтобы получить представление о требуемом количестве воздуха, необходимо определить минимальную теоретическую его величину, приходящуюся на 1 кг топлива, а затем сравнить ее с фактическим поступлением воздуха в топку котла. Аналогично, для суждения об экономичности работы котла, в значительной степени зависящей от полноты процесса горения топлива в топке, необходимо знать теоретические величины объемов продуктов горения и сравнить их с действительными.

Процесс горения рассчитывают применительно к 1 кг топлива, элементарный состав которого выражен в килограммах на 1 кг топлива (например, С кг углерода/кг топлива: Н кг водорода/кг топлива и т. д.). При расчетах определяют (исходя из известных реакций горения этих элементов) теоретически необходимые количества кислорода и воздуха для полного горения 1 кг топлива и количество образовавшихся при этом газообразных продуктов сгорания, рассчитывая эти количества в нормальных кубических метрах¹ (н. м³).

Определим количество воздуха, необходимое для полного сгорания 1 кг топлива.

Из реакции $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ видно, что 12 кг углерода, соединясь с 32 кг кислорода, дадут 44 кг углекислоты, так как молекулярные массы углерода, кислорода и углекислоты соответственно равны 12, 32 и 44, т. е. для полного сгорания 1 кг углерода необходимо $\frac{32}{12} = \frac{8}{3}$ кг кислорода.

Из реакции горения водорода $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ находим, что 4 кг водорода, соединясь с 32 кг кислорода, образуют 36 кг воды, т. е. на 1 кг водорода необходимо 8 кг кислорода.

Из реакции горения серы (входящей в состав летучих) получим соответственно, что на 1 кг серы необходим 1 кг кислорода.

¹ Нормальным кубическим метром называется количество какого-либо газа, занимающего объем 1 м³ при нормальных физических условиях (температуре 0°C , давлении 760 мм рт. ст.).

Кроме С, Н и S_л в топливе нет горючих элементов. Поэтому, учитывая, что в элементарном составе топлива уже есть некоторое количество кислорода, можно записать расход кислорода на 1 кг рабочей массы топлива в виде:

$$O_0 = \frac{8}{3} C^P + 8H^P + S_{л}^P - O^P \text{ кг/кг}^1. \quad (11)$$

Зная массовое содержание кислорода в воздухе (23%), можно установить теоретический массовый расход воздуха на 1 кг топлива:

$$L_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C^P + 8H^P + S_{л}^P - O^P \right) \text{ кг/кг}. \quad (12)$$

Определим также объем воздуха, необходимого для горения. Принимая плотность воздуха $\gamma_{в} = 1,293 \text{ кг/н. м}^3$, получим:

$$V_0 = \frac{L_0}{\gamma_{в}} = \frac{1}{0,23 \times 1,293} \left(\frac{8}{3} C^P + 8H^P + S_{л}^P - O^P \right) \text{ н. м}^3/\text{кг} \quad (13)$$

или, принимая C^P, H^P, O^P, S_л^P в процентах, получим

$$V_0 = 0,0889C^P + 0,267 \left(H^P - \frac{O^P}{8} \right) + 0,033S_{л}^P \text{ н. м}^3/\text{кг}. \quad (14)$$

Фактически для полного сгорания приходится подавать в топку больше воздуха, чем теоретически необходимо, учитывая несовершенство процесса горения в топке.

Коэффициентом избытка воздуха называется отношение количества фактически поступившего в топку воздуха V_{α} к теоретически необходимому:

$$\alpha = \frac{V_{\alpha}}{V_0}. \quad (15)$$

Для расчета продуктов горения 1 кг топлива вернемся к уравнениям горения.

Полный объем продуктов горения 1 кг топлива можно представить как сумму объемов сухих газов $V_{с.г}$ и водяных паров V_{H_2O} :

$$V_{г} = V_{с.г} + V_{H_2O}. \quad (16)$$

Объем водяных паров, получающихся при сгорании 1 кг топлива, при их плотности $\gamma_{лар} = 0,804 \text{ кг/н. м}^3$, равен

$$V_{H_2O} = \frac{1}{0,804} (9H^P + W^P + W_{в}), \quad (17)$$

где $9H^P$ — количество влаги, образующейся при горении водорода топлива, кг/кг;

$W_{в}$ — влага, вносимая в топку воздухом, кг/кг.

$$W_{в} = 0,001dV_{\alpha}, \quad (18)$$

где d — удельное влагосодержание воздуха, величину которого обычно принимают равной 10 г/н. м^3 (коэффициент 0,001 необходим для перевода влажности, выраженной в г/н. м^3 , кг/н. м^3).

¹ В кг/кг (или в м³/кг) подразумевается в числителе — килограммы (или кубические метры) газа, воздуха и т. д., в знаменателе — килограммы топлива.

При N^p , W^p в процентах, получим:

$$V_{H_2O} = 0,0124 (9N^p + W^p + 0,1dV_a). \quad (19)$$

Объем сухих продуктов горения:

$$V_{c, r} = V_{RO_2} + V_{R_2}; \quad (20)$$

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}; \quad (21)$$

где V_{RO_2} — объем трехатомных газов,

V_{R_2} — объем двухатомных газов.

$$V_{R_2} = V_{N_2} + V_{O_2}. \quad (22)$$

Из уравнения горения $C + O_2 = CO_2$ получим на 1 кг С:

$$\frac{44}{12} = \frac{11}{3} \text{ кг } CO_2.$$

Объем CO_2 , полученного при сгорании 1 кг топлива, будет (при $\gamma_{CO_2} = 1,977$ н. м³/кг):

$$V_{CO_2} = \frac{1}{1,977} \frac{11}{3} C^p = 1,855C^p \text{ н. м}^3/\text{кг}. \quad (23)$$

Соответственно объем SO_2 (при $\gamma_{CO_2} = 2,927$ кг/н. м³):

$$V_{SO_2} = \frac{2}{2,927} S_A^p = 0,683S_A^p \text{ н. м}^3/\text{кг}$$

или

$$V_{RO_2} = 1,855C^p + 0,683S_A^p = 1,855 (C^p + 0,368S_A^p) \text{ н. м}^3/\text{кг}. \quad (24)$$

Обычно величину $C^p + 0,368 S_A^p$ обозначают через K^p .

Тогда при содержании C^p и S_A^p в процентах, получим:

$$V_{RO_2} = 0,01855K^p. \quad (25)$$

При избытке воздуха $\alpha > 1$ часть его не будет принимать участия в процессе горения. Эта часть равна (н. м³/кг):

$$\Delta V = \alpha V_0 - V_0 = (\alpha - 1) V_0.$$

Это количество воздуха относится к двухатомным газам $O_2 + N_2$. Кроме того, неизменным остается азот воздуха $0,79 V_0$ и азот, входивший в элементарный состав топлива N^p . Полное количество двухатомных газов будет:

$$V_{R_2} = \Delta V + V_{N_2} = (\alpha - 1) V_0 + 0,79V_0 + \frac{1}{1,257} N^p$$

или

$$V_{R_2} = (\alpha - 0,21) V_0 + 0,8N^p, \quad (26)$$

где N^p — выражено в процентах.

§ 12. Оценка полноты сгорания топлива

Практически невозможно добиться полного сгорания топлива в топке котла. Реакции окисления горючих составляющих топлива частично идут не до конца, и в продуктах горения, выходящих из топки в газоходы котла, находятся еще газы, способные

к дальнейшему горению, например, окись углерода CO , водород H_2 , метан CH_4 и другие углеводороды. Возможность их догорания при сравнительно низких температурах в газоходах котла и малом содержании кислорода в дымовых газах исключена.

Наличие в газах, покидающих газоходы котла, продуктов неполного горения свидетельствует о потерях тепла, которые приводят к перерасходу топлива. Если для более полного сгорания топлива подавать в топку больше воздуха, то в результате охлаждения топки горение ухудшится и потери тепла с уходящими газами резко возрастут из-за увеличения объема газов, приходящихся на 1 кг топлива.

Следовательно, управляя горением, необходимо добиваться сгорания топлива в топке, возможно более близкого к полному при минимальном коэффициенте избытка воздуха.

О качестве процесса горения в топках паровых котлов судят по элементарному составу сжигаемого топлива и данным анализа дымовых газов.

При полном сгорании топлива продукты горения состоят из смеси углекислоты CO_2 , сернистого ангидрида SO_2 , кислорода O_2 , азота N_2 и водяных паров H_2O . При неполном сгорании к этому составу добавляются окись углерода CO , водород H_2 , метан CH_4 и различные углеводороды.

Наибольшее влияние на неполноту сгорания оказывают CO и H_2 . Остальными составляющими в большинстве случаев пренебрегают. Количество этих газов в продуктах сгорания определяют с помощью газового анализа, причем при точных анализах определяют содержание в уходящих газах CH_4 и сложных углеводородов типа C_nH_m . Следует отметить, что хотя содержание водорода и имеет большое значение для оценки неполноты сгорания мазутов, часто величину H_2 в уходящих газах не определяют, так как это требует сложных приборов.

Анализ газов производят периодически химическими газоанализаторами либо непрерывно автоматическими газоанализаторами различных типов. Пробу отбирают из уходящих газов за последней поверхностью нагрева котельного агрегата.

Наиболее часто применяют переносный газоанализатор Орса, который дает суммарное содержание CO_2 и SO_2 , обозначаемое условным символом RO_2 , и содержание O_2 , в процентах от объема сухих газов. По известному содержанию RO_2 и O_2 вычисляют содержание CO и величину фактического коэффициента избытка воздуха. По этим показателям судят о качестве процесса горения.

Для определения объема газов по данным газового анализа обозначим объемы газов (в н. м³/кг), полученных при сжигании 1 кг топлива, через V_{CO_2} , V_{SO_2} , V_{RO_2} , V_{CO} , V_{O_2} , V_{N_2} .

Тогда объем сухих газов (без водяных паров) будет:

$$V_{\text{с.г}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{CO}} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2}. \quad (27)$$

Как видно из уравнения (27), продукты неполного сгорания, кроме CO , здесь не учтены, хотя это и не совсем точно.

Процентный состав сухих газов по объему выразится уравнением

$$RO_2 + CO + O_2 + N_2 = 100, \quad (28)$$

где под RO_2 , CO , O_2 и N_2 подразумевается содержание соответствующих газов в процентах от всего объема сухих газов $V_{с.г.}$

При сгорании 1 моля (12 кг) углерода образуется 1 моль углекислоты (22,26 н. м³), а при неполном сгорании этого же количества углерода в окись углерода — 1 моль CO (22,4 н. м³). Предположим, что содержащийся в 1 кг топлива углерод $C^p\%$ сгорает, образуя углекислоту и окись углерода. Обозначим часть углерода, превратившегося при сгорании в CO_2 , через $C_{CO_2}^p\%$, а превратившегося в CO — через $C_{CO}^p\%$. Тогда объем газов, образовавшихся при сгорании $\frac{C^p}{100}$ кг углерода, будет равен

$$V_{CO_2} + V_{CO} = \frac{22,26}{12} \frac{C_{CO_2}^p}{100} + \frac{22,4}{12} \frac{C_{CO}^p}{100} \approx 1,86 \frac{C_{CO_2}^p + C_{CO}^p}{100} \quad (29)$$

или

$$V_{CO_2} + V_{CO} = 1,86 \frac{C^p}{100} \text{ н. м}^3/\text{кг}. \quad (30)$$

Аналогично при сгорании 1 моля (32 кг) серы образуется 1 моль (21,89 н. м³) сернистого ангидрида SO_2 . Тогда объем газов, образовавшихся при сгорании S_d^p кг серы, составит:

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32} \frac{S_d^p}{100} \approx 0,683 \frac{S_d^p}{100}. \quad (31)$$

Сложив левые и правые части уравнений (30) и (31), получим:

$$V_{CO_2} + V_{CO} + V_{SO_2} = 1,86 \left(\frac{C^p}{100} + 0,368 \frac{S_d^p}{100} \right) \text{ н. м}^3/\text{кг} \quad (32)$$

или

$$V_{RO_2} + V_{CO} = 1,86 \frac{C^p + 0,368 S_d^p}{100} \text{ н. м}^3/\text{кг}. \quad (33)$$

Обозначая $C^p + 0,368 S_d^p$ через K^p , получим:

$$V_{RO_2} + V_{CO} = 1,86 \frac{K^p}{100} \text{ н. м}^3/\text{кг}. \quad (34)$$

Процентное содержание RO_2 и CO в сухих газах:

$$RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{с.г.}} 100; \quad (35)$$

$$CO = \frac{V_{CO}}{V_{с.г.}} 100. \quad (36)$$

Складывая левые и правые части, получаем:

$$RO_2 + CO = \frac{100}{V_{с.г.}} (V_{RO_2} + V_{CO}). \quad (37)$$

Подставляя в это уравнение значение $V_{RO_2} + V_{CO}$ из уравнения (37), получаем:

$$RO_2 + CO = 1,86 \frac{K^P}{V_{с.г}}, \quad (38)$$

откуда можно определить объем сухих газов (н. м³/кг):

$$V_{с.г} = 1,86 \frac{K^P}{RO_2 + CO}. \quad (39)$$

Таким образом, для определения объема сухих газов при сгорании 1 кг топлива, нужно рассчитать по данным элементарного состава рабочей массы топлива величину K^P , определить по данным газового анализа содержание углекислоты в газах и вычислить содержание окиси углерода CO (см. ниже).

Для определения полного объема газообразных продуктов горения, покидающих котел (уходящих газов), к полученному значению объема сухих газов необходимо прибавить объем образовавшихся при сгорании 1 кг топлива водяных паров V_{H_2O} по уравнениям (17—19).

Содержание CO рассчитывают по данным элементарного состава топлива и по содержанию RO_2 и O_2 в уходящих газах, известных из газового анализа. Ввиду громоздкости вывода выражения для CO приводим только окончательный вид так называемого уравнения неполного горения, из которого определяют величину CO:

$$RO_2 + O_2 + (0,605 + \beta) CO = 21 - \beta RO_2,$$

т. е.

$$CO = \frac{21 - \beta RO_2 - (RO_2 + O_2)}{0,605 + \beta}, \quad (40)$$

где

$$\beta = 2,37 \frac{H^P - \frac{O^P}{8}}{K^P} + 0,005. \quad (41)$$

Величина β зависит только от элементарного состава рабочей массы топлива и может поэтому служить его характеристикой.

При полном горении окись углерода в газе отсутствует, т. е. $CO=0$. В этом случае получим так называемое уравнение полного горения (в процентах):

$$RO_2 + O_2 = 21 - \beta RO_2. \quad (42)$$

Из уравнения (42) видно, что сумма $RO_2 + O_2$ не может быть больше 21%, чем обычно и пользуются для ориентировочной проверки правильности газового анализа.

Как уже указывалось, в топку всегда подается воздуха несколько больше, чем требуется. Это объясняется неизбежной неравномерностью распределения воздуха в топке, при которой не все частицы кислорода соединяются с частицами топлива. В одних местах топки будет избыток воздуха, в других — недостаток, что приведет к неполному сгоранию.

Отличие действительных условий горения от теоретических характеризуется коэффициентом избытка воздуха α . Наименьших значений этого коэффициента можно достигнуть при хорошем смешении частиц топлива с воздухом. Например, мазут, распыливаемый форсункой на мельчайшие капельки, можно сжигать даже при $\alpha = 1,03$. Однако пока в практике эксплуатации судовых котлов чаще встречается работа топок со значительно большими избытками воздуха (1,1—1,15). При этом вследствие охлаждения топки возникает неполнота горения с образованием продуктов неполного сгорания. Кроме того, дополнительное количество воздуха, нагревающегося в топке, уносит с собой из котла тепло, ухудшая экономичность его работы, т. е. увеличивая потери тепла с уходящими газами.

Пользуясь связью между составом уходящих газов и коэффициентом избытка воздуха, можно найти действительный коэффициент избытка воздуха по данным газового анализа, сравнить его с рекомендуемым коэффициентом и принять меры к исправлению процесса горения (увеличить или уменьшить количество воздуха, подаваемого в топку, а также улучшить условия смесеобразования воздуха с топливом).

Для расчета величины α по данным газового анализа существует несколько выражений. Например, при неполном горении коэффициент избытка воздуха можно определить по формуле

$$\alpha = \frac{21}{21 - (O_2 - 0,5CO)} \quad (43)$$

Можно получить и другие зависимости для α . Так, формулу (15) можно написать в виде

$$\alpha = \frac{V_\alpha}{V_0} \approx \frac{O_2}{O_{2_0}},$$

где O_{2_0} — теоретическое количество O_2 для сжигания 1 кг топлива.

Учитывая, что полная концентрация кислорода в воздухе по объему составляет 21%, а при горении используется $(21 - O_2)$ %, получим:

$$\alpha \cong \frac{21}{21 - O_2} \quad (44)$$

Эта формула называется «кислородной»; она является приближенной, но обладает достаточной для практики точностью.

§ 13. Скорость и устойчивость процесса горения

Для правильной организации горения топлива в котле необходимо изучить физико-химическую картину этого сложного процесса.

Горение топлива в топке можно упрощенно представить себе состоящим из трех стадий, называемых фазами горения. Фазы горения могут протекать одновременно, но в разных местах топки — зонах горения.

Первая стадия — подготовительная. В это время подогревается топливо, образуется и воспламеняется горючая смесь паров топлива с воздухом.

Вторая стадия — это активное горение с продолжением смесеобразования и интенсивным выделением тепла.

Третья стадия заканчивается выжигом горючего с образованием продуктов горения (золы и газов).

Для начала реакции окисления любое топливо (как твердое, так и жидкое) должно подвергаться предварительной газификации, во время которой его горючие составляющие под действием высокой температуры проходят стадию испарения и термического разложения, превращаясь в горючие газы. Эти газы затем смешиваются с воздухом, образуя горючую смесь.

Процесс предварительной газификации и горения топлива ускоряется не только с повышением температуры, но и с увеличением активной поверхности горения, что достигается дроблением твердого или распыливанием жидкого топлива. Большое значение имеет скорость воздуха, обдувающего частицы топлива, т. е. скорость поступления кислорода к активной поверхности горения топлива и удаления с нее газообразных продуктов горения.

Температура воспламенения у различных компонентов рабочей массы топлива неодинакова. Для углерода она составляет около 700° , для летучих — от 300 до 600° в зависимости от их состава. Для нагрева до температуры воспламенения топливу необходимо сообщить тепло, которое расходуется на испарение влаги, нагрев топлива, предварительную его газификацию и нарушение химических связей между отдельными составляющими.

Для улучшения зажигания топлива в мазутных топках у устья топочного устройства выкладывают кольцо (форму) из огнеупорного кирпича (см. рис. 8). Это кольцо воспринимает лучистую энергию факела и отдает ее корню мазутного факела, способствуя подогреву топлива. Для быстреего прогрева и лучшего смешивания топлива с воздухом устанавливают диффузор (см. рис. 6). Он препятствует поступлению к корню факела больших масс относительно холодного воздуха и отражает лучистое тепло факела на его корень.

Для улучшения смесеобразования и увеличения количества воздуха, подаваемого в активную зону, в топках устанавливают специальные воздухонаправляющие устройства (см. рис. 8, а), создающие вихревой поток. Длина факела пламени зависит от скорости

и направления потока воздуха и величины коэффициента избытка воздуха α . При больших величинах α наблюдается короткое яркое белое пламя, а при недостатке воздуха длина факела увеличивается и он становится красным. Устойчивость процесса горения топлива имеет большое значение для постоянства паропроизводительности котла и давления пара.

Для обеспечения устойчивости горения необходимы три главных условия:

осуществление так называемой поточной схемы, т. е. непрерывной подачи в топку потоков топлива и воздуха и отвода из топки продуктов сгорания;

соблюдение равновесия между выделением тепла в топке и его расходом из котла с паром;

поддержание высокой температуры в активной зоне, необходимой для быстрого протекания реакций окисления горючих элементов топлива.

Для компенсации возможных на практике нарушений первых двух условий необходимо в любом топочном устройстве предусмотреть возможность быстрого изменения подачи воздуха и топлива.

Глава V. ТОПОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА КОТЛОВ

§ 14. Основные схемы топочных процессов

Топкой называется устройство, предназначенное для обеспечения процесса устойчивого горения топлива — топочного процесса. Топочный процесс предусматривает создание очага горения, в котором должна поддерживаться высокая температура. К очагу горения должны бесперебойно, желательнo непрерывными потоками, поступать топливо и воздух.

В современных судовых котлах применяют два основных принципа организации топочного процесса: слоевой и факельный.

Слоевой процесс имеет весьма ограниченное распространение в топках судовых котлов малой мощности только при сжигании угля. В слоевых топках поток воздуха встречает на своем пути неподвижно лежащий слой топлива и в результате реакции превращается в поток газообразных продуктов горения.

При слоевом процессе непрерывное удаление золы и шлаков, т. е. поточность процесса, практически трудно осуществимо. Для слоевых топок характерна также неравномерность выделения тепла по времени вследствие накопления очаговых остатков (шлака и золы), затрудняющих доступ воздуха к горячим частицам топлива. Эти особенности явились основными причинами полного вытеснения на флоте слоевых топок факельными.

При факельном процессе частицы топлива непрерывно движутся в топочном объеме во взвешенном состоянии вместе

с потоками воздуха и газов. При этом частицы топлива находятся в топочном объеме всего 1—2 с. Для того чтобы за такое короткое время топливо успело полностью сгореть, оно распыляется, что значительно увеличивает активную поверхность, приходящуюся на 1 кг топлива.

К преимуществам факельного процесса относится возможность полной механизации обслуживания топки и автоматизации управления ею. Топки, в которых осуществляется факельный процесс, часто называют камерными, подразумевая под камерой топочное пространство котла.

§ 15. Организация факельного процесса

Как было сказано, при факельном процессе топливо сжигается во взвешенном состоянии непосредственно в топочном объеме (топочной камере). При этом сжигаемое топливо движется в топочном объеме вместе с потоками воздуха и газов. Таким образом, время пребывания топлива в топке ограничивается несколькими секундами, а чаще даже десятками долями секунды. Для того чтобы при таких условиях добиться экономичного горения, необходима высокая скорость сгорания топлива. Прежде всего надо увеличить активную реагирующую поверхность топлива, т. е. предварительно мелко распылить его. Жидкое топливо распыливают при помощи форсунок.

Метод сжигания жидкого топлива распыливанием впервые был предложен и разработан русскими теплотехниками. А. И. Шпаковский в 1865 г. предложил первую форсунку. Известный русский инженер и изобретатель В. Г. Шухов сконструировал в конце прошлого века простую и надежную паровую форсунку, которую применяли на речных судах еще недавно.

Прежде чем перейти к описанию типов и конструкций форсунок и топочных устройств для сжигания жидкого топлива, необходимо рассмотреть основные особенности факельного процесса сжигания мазута в топках судовых котлов.

Предварительное распыливание жидкого топлива на мельчайшие капельки, обладающие в сумме громадной поверхностью, и возможность бесперебойной подачи к этой поверхности воздуха создают хорошие условия для достижения высокой скорости горения в ограниченном объеме факела. Это, в свою очередь, ведет к повышению температуры факела и обеспечивает необходимые условия для устойчивости горения, т. е. быстрого воспламенения топлива и высокой скорости его сжигания.

Отмеченные обстоятельства дают возможность достигнуть в сравнительно небольших топочных объемах высоких тепловых нагрузок (600 000—800 000, в некоторых котлах до 2 млн. ккал/м³·ч). Одновременно потери от химической неполноты горения могут быть доведены до нуля. Естественно, что эти чрезвычайно ценные для морских котлов особенности факельного процесса обеспечили ему распространение на морских судах.

Для камерных топок характерна большая чувствительность факельного процесса к внешним воздействиям. Например, устойчивость горения факела может быть почти мгновенно нарушена при попадании воды вместе с топливом, резкой перемене нагрузки топки, кратковременных перерывах в подаче горючего или воздуха и т. д. Эта особенность определяется небольшим запасом топлива и аккумулированного тепла в камерных топках, где в каждый данный момент находится очень малое количество топлива. Если, например, производительность форсунки равна 360 кг/ч, то в каждую секунду в топке находится всего 100 г топлива.

С другой стороны, такая высокая чувствительность факельного процесса дает большое преимущество, так как работа топки легко поддается регулированию. Котлы с камерными топками обладают хорошими маневренными качествами: изменяя подачу воздуха и топлива, можно быстро и в широких пределах регулировать нагрузку топки, а следовательно, и паропроизводительность котла.

Схема топочного устройства для сжигания мазута в топках паровых котлов представлена на рис. 6.

Мельчайшие капельки распыленного мазута вылетают в воздушную среду топки из форсунки 1, образуя конус распыливания с углом $60-90^\circ$. Горение капелек мазута не начинается сразу же по вылете из форсунок, так как их температура еще ниже температуры воспламенения. В этой начальной зоне, называемой часто *корнем факела*, происходят интенсивное нагревание, испарение и частичная газификация мазута под воздействием высокой температуры.

Для улучшения прогрева *корня факела* устанавливается диффузор 2, конус которого защищает *корень факела* от потока холодного воздуха и способствует созданию устойчивой зоны завихрений. Главным источником тепла для этой начальной зоны служит мощное излучение самого горящего факела и, в меньшей степени, футеровочного кольца 4, а также рециркуляция горящих частиц топлива с.

При газификации мазута сложные углеводороды, входящие в его состав, распадаются на простейшие горючие газы, вступающие в реакцию с кислородом воздуха.

Фронт горения $a-b$ устанавливается там, где образовавшаяся горючая смесь паров и продуктов газификации мазута с воздухом будет иметь температуру, достаточную для воспламенения.

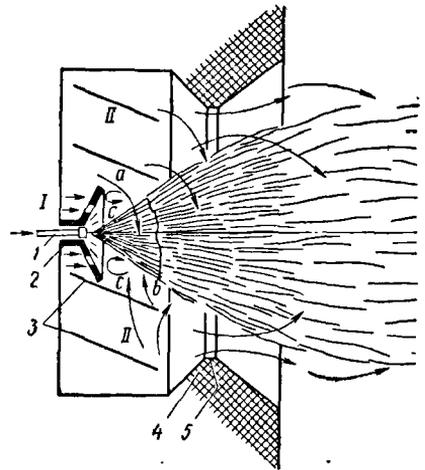


Рис. 6. Топочное устройство для сжигания мазута

Капелька мазута (или частичка газифицированного продукта) перемещается вместе с потоком воздуха, поэтому относительная скорость омывания ее воздухом будет невелика. При этих условиях горение будет затруднено, так как проникновению молекул кислорода к поверхности частицы будут мешать окружающие ее продукты горения.

Чтобы ускорить процесс горения, необходимо создать интенсивные перемешивающие газозвушные потоки внутри и по окружности факела. Для этого в диффузоре 2 сделаны щели, через которые первичный воздух *I* поступает к корню факела. Однако диффузор пропускает лишь небольшое количество воздуха, достаточное для охлаждения самого диффузора и начального смесеобразования топлива с воздухом.

Основное количество воздуха *II* подводится к активной зоне горения факела через воздухонаправляющие устройства с лопатками 3, которые обеспечивают устойчивое завихрение газозвушной смеси. Горло 5 топочной амбразуры способствует направлению струй воздуха внутрь факела и более тщательному перемешиванию его с горючими газами.

При полной нагрузке топки и установившемся режиме устойчивость горения факела обеспечивается как непрерывностью подачи топлива, воздуха и удаления продуктов горения, так и высокой температурой, развиваемой в самом факеле.

Следует отметить, что мазутный факел почти полностью непрозрачен для теплового излучения и обратная отдача тепла от огнеупорной кладки самой топки к факелу практического значения не имеет, особенно для внутренних зон факела. Поэтому продолжение огнеупорной кладки внутрь топочной камеры мало сказывается на устойчивости факельного процесса.

К значительно более важным условиям, определяющим устойчивость процесса горения топлива в факеле, относятся правильная организация начальной формы факела и хорошее смесеобразование в начальной и активной зонах. При этом, как показала практика, факел будет устойчивым даже при полном отсутствии огнеупорной кладки в топочной камере и окружении его относительно холодными поверхностями нагрева котла.

Таким образом, для организации устойчивого факельного процесса необходимы:

подача в топку подогретого и мелкораспыленного мазута;

защита корня факела от относительно холодного воздуха, который должен подаваться в эту зону в минимальном количестве, необходимом для начала смесеобразования;

интенсивный прогрев начальной зоны факела за счет излучения его активной зоны и теплового излучения диффузора 2 и футеровочного кольца 4 (см. рис. 6);

интенсивное перемешивание продуктов испарения и газификации мазута с воздухом по всей толщине активной зоны горения факела;

бесперебойная подача воздуха и топлива к факелу и удаление продуктов горения.

Этими условиями обеспечиваются топочные устройства для сжигания мазута, рассматриваемые ниже.

§ 16. Мазутные форсунки и топочные устройства

Топочное устройство для сжигания жидкого топлива состоит из двух основных узлов: форсунки и воздухонаправляющего устройства (см. рис. 7). Обычно форсунку устанавливают внутри воздухонаправляющего устройства, которое монтируют в свою очередь на фронтальной топочной раме котла.

Труба, подводящая к форсунке мазут, имеет специальное съемное соединение для замены форсунки без разборки трубопровода (это ускоряет ремонтные работы во время эксплуатации судовой котельной установки).

Качество распыливания, а следовательно, и полнота сгорания мазута в значительной мере зависят от типа и конструкции форсунки.

Условия эксплуатации морских котлов предъявляют к форсункам следующие требования:

простота устройства и надежность работы на всех марках топочного мазута, вплоть до высоковязких;

высокое качество (тонкость) распыливания, обеспечивающее достаточную полноту горения;

большой диапазон регулирования при сохранении постоянного качества распыливания на всем диапазоне;

минимальный расход энергии;

возможность управления работой на расстоянии при автоматическом регулировании нагрузки котла.

Помимо этих основных требований, имеют значение также форма и длина факела форсунки. На стенах топки обычно расположены поверхности нагрева, называемые радиационными, так как основное количество тепла они воспринимают от излучения (радиации) факела. Это количество тепла зависит от формы, величины и расположения факела в топке. Факел должен по возможности равномерно заполнять топочное пространство, в противном случае одна часть радиационной поверхности будет получать больше тепла, чем другая, что может вызвать неполадки в работе котла.

Из сказанного следует, что тип и количество форсунок в топке должны соответствовать форме топочного пространства и расположенным в нем радиационным поверхностям нагрева котла. Одновременно следует учитывать, что исходя из удобства обслуживания котла желательно иметь минимальное количество форсунок.

Все форсунки можно разделить на три основные группы: паровые, воздушные и механические. Кроме того, на морском флоте применяют также комбинированные форсунки, например, парово-воздушно-механические.

Паровые форсунки, встречающиеся на речных судах, обеспечивают хорошее качество распыливания, отличаются простотой устройства и обслуживания, легко регулируются. Однако безвозвратный расход пара на распыливание мазута, составляющий 0,3—0,5 кг/кг, исключает применение паровых форсунок на морских судах из-за большой и невосполнимой потери конденсата.

Воздушные форсунки, или, точнее, форсунки с воздушным распыливанием, требуют значительного расхода сжатого воздуха с избыточным давлением 0,8—2,2 кгс/см². Поэтому их используют иногда для вспомогательных паровых котлов, установленных на теплоходах, где всегда имеется сжатый воздух.

Механические форсунки делятся на нерегулируемые и регулируемые. Название это несколько условно, так как можно изменять производительность и тех и других форсунок, но у нерегулируемой форсунки это изменение связано с ее выключением, выемкой из топочного устройства и заменой вихревой камеры и сопла (распыливающей шайбы), а у регулируемой форсунки изменение производительности не требует ее выключения из работы.

Одна из наиболее распространенных на судах механических нерегулируемых форсунок представлена на рис. 7, а.

Корпус 5 форсунки представляет собой толстостенную стальную трубу, на передний конец которой навинчивается корпус сопла 4. Мазут подается через канал в рукоятке 6 и корпус форсунки к отверстиям 1 сопла и поступает в тангенциальные канавки распыливающей шайбы 2. Шайба, изготовленная из хромоникелевой или хромовольфрамовой стали, крепится к соплу гайкой 3. Для плотного прилегания поверхности шайбы 2 и сопла 4 тщательно обрабатывают и полируют. В нижней части рисунка показан общий вид форсунки в сборе.

Распыливающая шайба (рис. 7, б) имеет вихревую камеру, к которой подводится мазут по четырем тангенциальным каналам 6. Проходя под давлением через каналы 6, топливо приобретает в камере а интенсивное вращательное движение и выбрасывается с большой скоростью из отверстия сопла с.

Производительность механических форсунок можно изменить путем замены распыливающих шайб (с различными размерами соплового отверстия и тангенциальных каналов). Индекс шайбы обычно выбит на ее лицевой стороне и указывает величину отношения сечения сопла к суммарному сечению тангенциальных каналов. В инструкциях для обслуживающего персонала указывается соответствующая производительность для распыливающей шайбы данного индекса. Количество тангенциальных каналов в распыливающей шайбе может быть 2, 3, 4 или 6.

Чистота поверхности шайб, тангенциальных каналов и сопла имеет важное значение для работы форсунок, и ее следует проверять по крайней мере ежедневно. Царапины на поверхности шайб или сопла, вызывающие неполное горение (темные полосы на конусе факела), должны быть устранены притиркой. Изношенные

шайбы во избежание перерасхода топлива надо своевременно заменять.

Общий вид топочного устройства с механической центробежной форсункой со стороны фронта и топочной камеры представлен на рис. 8, а.

Для эффективной работы топочных устройств с механическими центробежными форсунками рекомендуется держать вязкость ма-

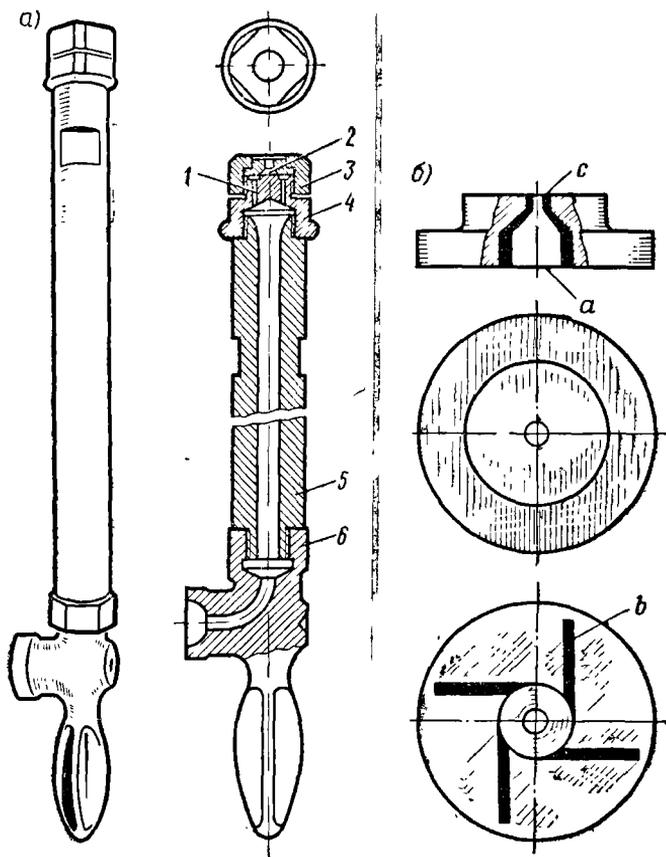


Рис. 7. Механическая форсунка и ее распыливающая шайба

зута в пределах 2—5° ВУ путем подогрева мазута до 70—100° С. Давление мазута перед форсункой должно быть не ниже 8—10 кгс/см² (составляет обычно 16—22 кгс/см²).

При увеличении давления от 10 до 20 кгс/см² производительность форсунки увеличивается примерно в 1,5 раза (при одной и той же распыливающей шайбе). При необходимости более глубокого регулирования (например, при переходе к стояночному режиму с режима полного хода) распыливающие шайбы должны быть заменены.

На рис. 8, б показана конструкция топочного устройства с механической центробежной форсункой 1 и двухзонным воздухонаправляющим устройством 5. Сопло форсунки (а следовательно, и корень факела) в данном случае значительно удалено от выходного сечения А топочной фурмы, что приводит к образованию нагара на внутреннем кольце воздухонаправляющего устройства. Для удаления нагара предусмотрено специальное кольцо 3 с рукояткой. Для удаления нагара предусмотрено специальное кольцо 3 с рукояткой.

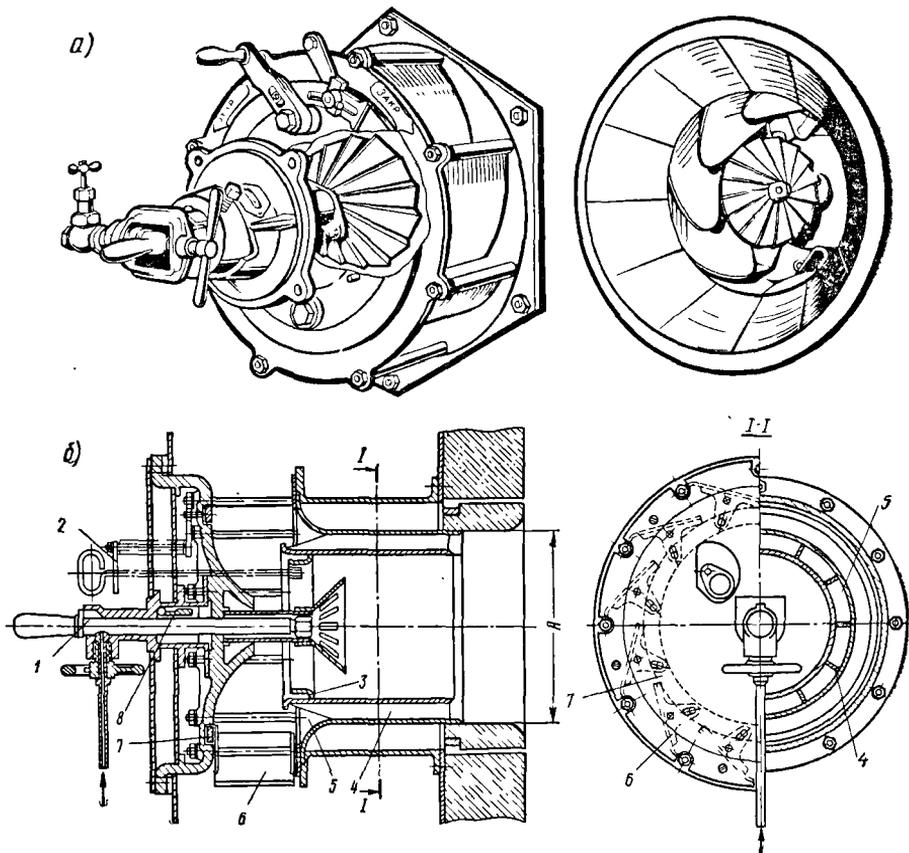


Рис. 8. Топочные устройства с однозонным и двухзонным подводом воздуха

Первичное завихрение воздуха осуществляется лопатками 6, которые поворачивают рукояткой 2, соединенной с кольцом 7.

В периферийной зоне воздухонаправляющего устройства степень завихрения воздуха снижается лопатками 4, и струи воздуха в этой зоне отжимают факел от стен фурмы, а затем поступают к основной зоне факела.

Клапан (захлопка) 8 предназначен для того, чтобы газы из топки не поступали в котельное отделение при удаленной форсунке.

К серьезным недостаткам механических центробежных форсунок относится небольшая степень регулирования. Производительность форсунки можно изменить только за счет напора, причем с учетом существующей квадратичной зависимости между ними. Таким образом, если необходимо изменить производительность в 4 раза, то напор надо увеличить в $4^2=16$ раз, т. е. при минимально допустимом (по условиям качества распыла) давлении 10 кгс/см² верхний его предел должен быть 160 кгс/см². Помимо

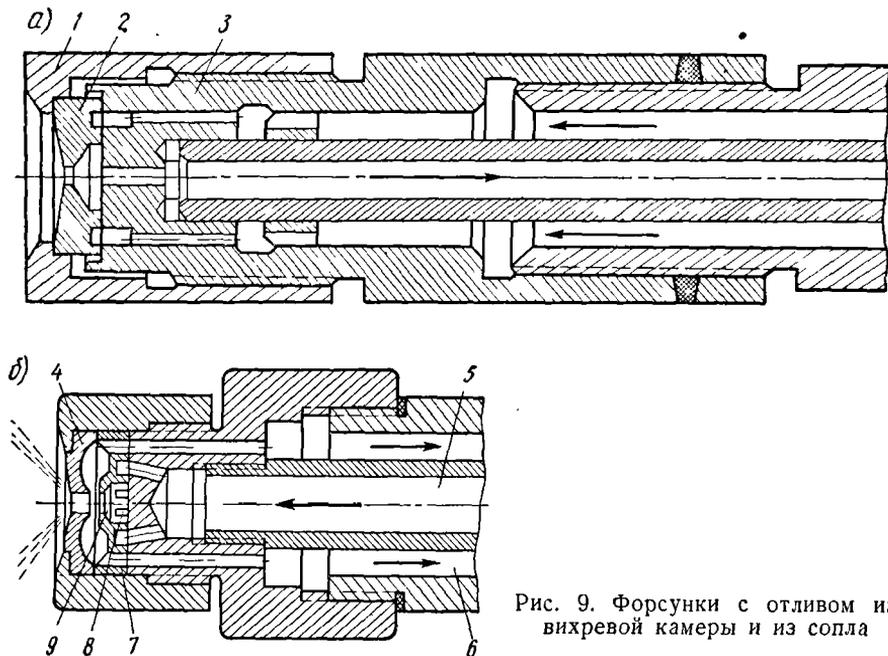


Рис. 9. Форсунки с отливом из вихревой камеры и из сопла

большого расхода энергии на распыливание мазута, такое давление будет способствовать усиленному износу вихревых камер и сопел распылителей.

За истекшее время было предложено много конструкций регулируемых механических форсунок. На отечественных котлах КВГ устанавливали форсунки с отливом мазута. Схема форсунки с центральным отливом из вихревой камеры представлена на рис. 9, а.

Мазут поступает через отверстия в сопле 3 в вихревую камеру распылителя 2, крепящегося гайкой 1 к корпусу сопла. Часть мазута из вихревой камеры может быть удалена по центральному каналу в сливную магистраль. Количество мазута обратного отлива зависит от величины открытия клапана на отливной магистрали: при полном закрытии клапана производительность форсунки будет максимальной, и наоборот.

Таким образом, качество распыливания, зависящее от давления в вихревой камере, сравнительно мало изменяется при различной

производительности форсунки. Практически глубина регулирования форсунок с отливом из вихревой камеры составляет 5—6. На снижение нагрузки такая форсунка реагирует резким увеличением отлива горячего мазута. Мазут отводится в специальную емкость.

Большое количество отлива горячего мазута не только увеличивает расход энергии на работу форсуночных насосов и расход на дополнительные трубопроводы и их арматуру, но также увеличивает пожарную опасность и вызывает необходимость в регулярном наблюдении за отливными трубопроводами и емкостями хранения горячего мазута.

На рис. 9, б представлена механическая центробежная форсунка с отливом из сопла. Мазут поступает по центральному каналу 5 и тангенциальным каналам 8 в вихревую камеру 9 распылителя 7. Часть мазута удаляется из полости сопла, образованной между распыливающей шайбой 4 и распылителем 7, по каналу 6. Количество отводимого мазута зависит от давления в канале 6.

Из рис. 9, а и б видно, что конструкции форсунок с отливом достаточно сложны. К этому можно добавить, что уменьшение осевой составляющей скорости мазута на выходе из сопла у форсунок с отливом из сопла ведет к ухудшению распыла на пониженных нагрузках, на которых увеличивается коэффициент избытка воздуха.

В связи с недостатками механических форсунок в последнее время широко применяют комбинированные паромеханические форсунки, обладающие значительно лучшими эксплуатационными характеристиками. Такие форсунки могут работать как чисто механические при нагрузках, близких к полной, и как комбинированные при малых нагрузках (обычно ниже 50—60%). Расход пара у них весьма мал. Эти форсунки почти полностью вытеснили на новых судах все другие системы.

Одна из конструкций комбинированных форсунок представлена на рис. 10. Мазут поступает по центральному каналу 5 и тангенциальным каналам 3 в вихревую камеру 2, откуда через сопло 1 — в камеру 7 смешения, расположенную в специальной сопловой насадке. В эту же камеру 7 пар подается по каналу 6 и кольцевой канал 4 в стволе форсунки. Паромазутная смесь выходит в топку через сопла 8.

Глубина регулирования у форсунки составляет до 10, расход пара на распыливание — 0,75—1% паропроизводительности котла. Такие характеристики являются типичными для форсунок этого типа. Расход пара составляет 0,03—0,045 кг/кг топлива, т. е. примерно в 10—15 раз ниже, чем у чисто паровых форсунок.

В последнее время паромеханические форсунки устанавливаются на всех главных котлах больших океанских судов (например, на котлах танкеров серии «София» и др.). Производительность одной форсунки доходит до 1250 кг/ч. К преимуществам этих форсунок следует отнести также меньшую коксуемость выходных сопел, которые продуваются паром. Паромеханические форсунки достаточно надежны в эксплуатации и просты по устройству.

Стремление полностью устранить применение пара или сжатого воздуха для распыливания мазута и обеспечить удовлетворительное качество распыла практически при всех диапазонах нагрузки привело к появлению вращающихся (ротационных) форсунок. Эти форсунки отвечают поставленным условиям в полной мере, но имеют относительно сложную конструкцию.

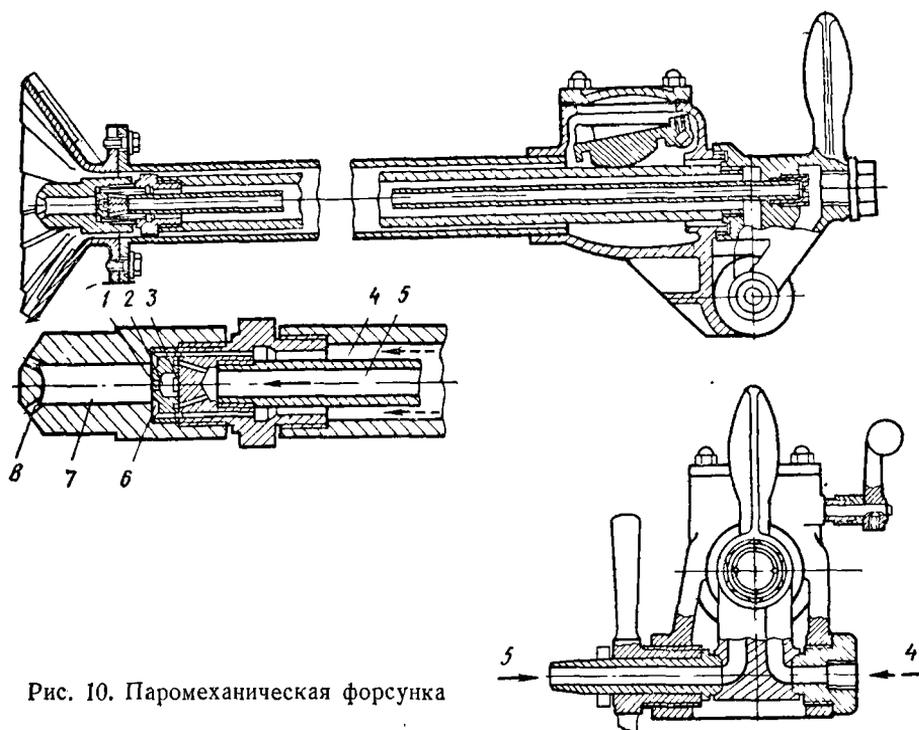


Рис. 10. Паромеханическая форсунка

Основной частью ротационных форсунок является распыливающий стакан, вращающийся с большой скоростью. На рис. 11 показана одна из конструкций ротационных форсунок с индивидуальным электроприводом стакана.

Топливо при температуре $70-90^{\circ}\text{C}$ и избыточном давлении $0,7-1,5 \text{ кгс/см}^2$ поступает во внутренний канал 5 ротора 6 форсунки и далее через отверстия 2 — на внутренние стенки стакана 9, вращаемого электродвигателем 4 посредством клиноременной передачи со скоростью $4500-5000 \text{ об/мин}$. Первичный воздух, подающийся вентилятором 8, поступая через воздухопровод 3 к кольцевой щели 1, одновременно предохраняет стенки стакана 9 от перегрева. Вторичный воздух поступает через полость 7.

Давление первичного воздуха у этих форсунок $350-400 \text{ мм вод. ст.}$, вторичного — около $30-40 \text{ мм вод. ст.}$. Номинальная производительность $500-2000 \text{ кг/ч}$ при глубине регулирования до 10 и более, что обеспечивает все эксплуатационные режимы.

Форсунки с индивидуальным вентилятором первичного воздуха, насаженным на вал электродвигателя, выпускают некоторые зарубежные фирмы Японии, ФРГ под названием форсунок «Сааке».

Существуют и отечественные конструкции, установленные на котлах судов типа «Донбасс», и др.

Ротационные форсунки широко применяют на судах главным образом для вспомогательных котлов теплоходов.

На рис. 12 изображена компоновка топочного устройства с ротационной форсункой типа «Вахадаг» на вспомогательном водотрубном котле теплоходов серии «Иван Франко». Это устройство состоит из вращающихся форсунок — рабочей, работающей на тяжелом топливе, и растопочной, работающей на дизельном топливе.

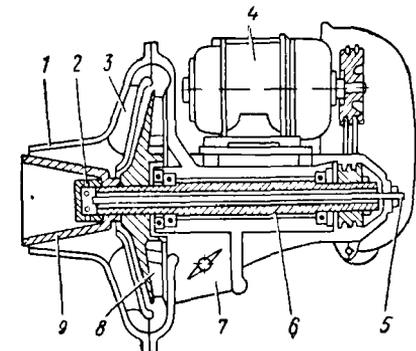


Рис. 11. Ротационная форсунка с электродвигателем

Широкое распространение топочных устройств этого типа объясняется не только отмеченными характеристиками, но и следующими преимуществами:

надежностью в эксплуатации (несмотря на сложность устройства);

меньшими требованиями к чистоте и вязкости мазута из-за отсутствия узких топливных каналов и сопел;

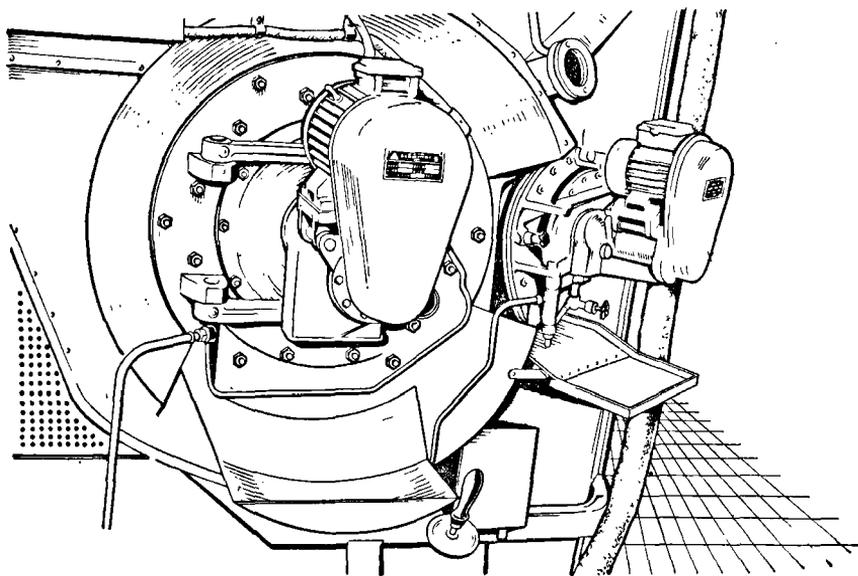


Рис. 12. Топочное устройство с ротационной форсункой

заменой высоконапорных форсуночных насосов электро- или паровоздушным приводом распыливающего стакана;

устранением высоконапорных трубопроводов горячего мазута, требующих особого внимания со стороны обслуживающего персонала;

значительной глубиной регулирования, перекрывающей все эксплуатационные режимы нагрузки вспомогательных котлоагрегатов, при удовлетворительном качестве распыливания мазута на всех режимах;

легкостью регулирования нагрузки форсунки изменением степени открытия клапана на подводящем топливопроводе, что особенно важно при автоматизированном управлении процессом горения, так как позволяет ротационным форсункам успешно работать с любыми системами автоматического регулирования.

Удовлетворительная работа форсунки во многом зависит также от конструкции и наладки воздухонаправляющего устройства.

Топочное устройство (см. рис. 8) для сжигания жидкого топлива состоит из форсунки и воздухонаправляющего устройства, в котором расположены направляющие лопатки и диффузор. Взаимное положение форсунки и диффузора устанавливают при испытаниях котла и фиксируют. В процессе эксплуатации котла это положение форсунки менять не рекомендуется, чтобы не ухудшить процесс горения.

Направляющие лопатки при наладке работы котла можно поворачивать, изменяя сечение для прохода воздуха и тем самым регулируя его скорость. При нормальной работе топки лопатки должны быть полностью открыты и поворачивать их нельзя.

Регистр (заслонки) воздухонаправляющего устройства обычно имеет два положения — «Открыто» и «Закрыто» и закрывается плотно автоматически (или вручную) при выводе форсунки из действия.

На небольших вспомогательных котлах совместно с топочным устройством монтируют топливоподогреватель, фильтр, топливный насос и дутьевой вентилятор, что возможно благодаря малому габариту последних (при малой производительности). Управление таким топочным устройством, как правило, полностью автоматизировано. Оно имеет обычно две форсунки, которые включаются и выключаются автоматически в зависимости от давления пара в котле.

Факт включения форсунки контролируется с помощью фотоэлемента, который при отсутствии факела прерывает цепь питания форсуночного мотора и отключает подачу топлива. Длительная работа форсуночного мотора при отсутствии факела приводит к наполнению топки топливом. Программное управление предусматривает повторное включение форсунки только после вентиляции топки в течение 20—25 с (во избежание взрыва).

На рис. 13 показан один из автоматизированных форсуночных агрегатов типа «Монарх». Подобные агрегаты часто встречаются на отечественных теплоходах.

Электродвигатель 2 вращает вентилятор 1 и топливный шестеренный насос 10. Между вентилятором и насосом установлена жесткая муфта, корпус форсунки может поворачиваться на оси фланца 4. В верхней части корпуса имеется съемная крышка. Топливный насос берет топливо из расходной цистерны через приемный патрубок 9 и трубу перелива. Перед каждым из двух сопел 6 имеются магнитные запорные клапаны 7 и 8 (3 — трансформатор зажигания; 5 — запальные электроды сопел),

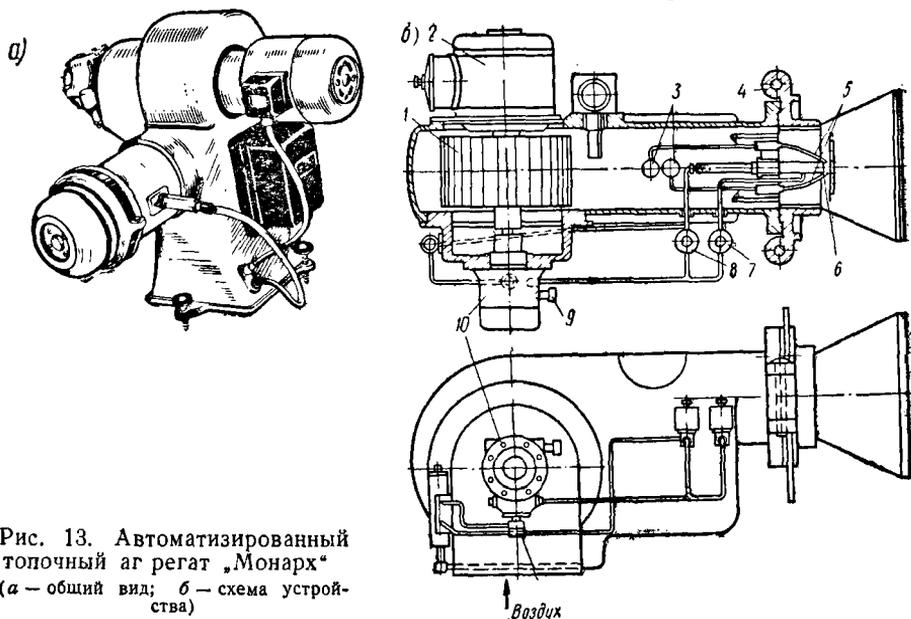


Рис. 13. Автоматизированный топочный агрегат „Монарх“ (а — общий вид; б — схема устройства)

Агрегат работает по заданной программе, которая выполняется последовательным включением реле с выдержкой времени. После нажатия кнопки включается вентилятор и топка проветривается. Затем подается топливо и зажигаются оба сопла. Если зажигания не произойдет (о чем даст сигнал фотоэлемент), топливо выключается и операция вентиляции топки и зажигания повторяется.

Производительность котла регулируется выключением одного или обоих сопел по датчикам давления, связанным с электромагнитными клапанами. При небольших расходах пара для поддержания полного давления пара достаточно одного сопла. Если расход пара увеличивается, то давление падает и в работу включается второе сопло. При падении расхода оно выключается.

Если сопла во время работы котла потухнут, то повторится вентиляция топки и зажигание, либо, при повторной подаче, может быть дан сигнал. Такое автоматическое «позиционное» регулирование, позволяющее надолго оставлять котел без присмотра, весьма удобно для теплоходов, вспомогательные котлы которых

работают с относительно малой, но сильно изменяющейся паропроизводительностью. Оно пригодно, однако, только для котлов с достаточно высоким относительным содержанием воды.

§ 17. Обслуживание мазутных топок

Под обслуживанием топки понимают систему мероприятий, выполняемых вахтенным персоналом и направленных на обеспечение надежной и экономичной работы топки во время эксплуатации судового котла.

К таким мероприятиям относятся обеспечение бесперебойной подачи требуемых количеств воздуха и топлива, регулирование теплоотдачи топки, поддержание всех ее узлов и деталей в исправном состоянии и обеспечение возможно более полного и экономичного горения топлива.

Технически грамотное обслуживание топок судовых котлов имеет важное значение для экономичной работы всей силовой установки судна. Регулирование работы топки, т. е. изменение выделяемого в ней количества тепла, необходимо выполнять в соответствии с нагрузкой котла — той паропроизводительностью, которая необходима для заданного режима работы главных двигателей и вспомогательных механизмов. Иными словами, в любой момент времени подача в топку топлива и воздуха должна соответствовать паровой нагрузке котла.

Регулирование подачи топлива и воздуха в топку может быть ручным и автоматическим. В обоих случаях необходимо знать приемы обслуживания топки, так как различные автоматические устройства настраивают в зависимости от основных показателей работы топки: коэффициента избытка воздуха, потерь тепла от неполноты горения топлива и т. д.

Рассмотрим основные операции по обслуживанию топки, начиная с пуска котла.

Огонь в мазутных топках обычно разводят вручную. Все автоматы при этом должны быть выключены (кроме котлов специальной конструкции, описанных ниже).

Перед пуском котла необходимо спустить воду из расходной топливной цистерны, тщательно проветрить топку, открыв воздушные регистры. Рекомендуется проверить на плотность топливный подогреватель под наибольшим давлением мазута, не включая пар для подогрева. После этого нужно слегка приоткрыть паровой клапан, открыть клапан продувания парового пространства подогревателя, собрать конденсат, убедившись в том, что в нем нет мазута.

Бывает, что котельная установка судна не имеет пара, необходимого для работы мазутного насоса. В этом случае применяют один из двух способов разводки огня.

При первом способе котел отапливают дровами до тех пор, пока в нем не поднимется давление пара.

Вторым способом можно воспользоваться, если на судне имеются специальная цистерна пускового моторного топлива и ручной или электроприводной насос, подающий это топливо в форсуночный трубопровод. Для растопки готовят обычно одну центральную форсунку и устанавливают в нее сопло с минимальным отверстием. Затем ручным (или электроприводным) насосом промывают форсуночный трубопровод, удаляя из него мазут через трубу обратного слива, и создают перед форсункой давление моторного топлива около 7 кг/см^2 . Мазут, который находится в трубах, идущих к растопочной форсунке котла, спускают в ведро.

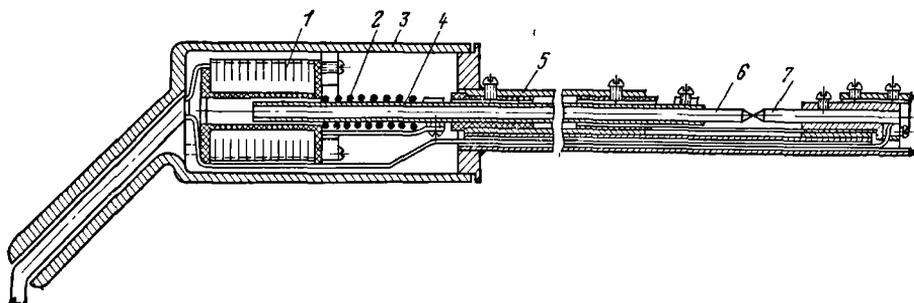


Рис. 14. Электровоспламенитель для форсунки

После того, как подводящий к форсунке трубопровод будет заполнен моторным топливом, специальным факелом, смоченным в керосине или соляре, зажигают форсунку. Когда в котле появится давление, включают пар на обогрев расходной цистерны к топливоподогревателю и топливным насосам. Далее прокачивают мазут через подогреватель и сливной трубопровод. Когда термометр, установленный на топливопроводе перед форсунками, покажет необходимую температуру, зажигают факелом остальные форсунки. При этом надо обязательно отойти в сторону от форсунки во избежание ожога при выбросе пламени из топки.

Форсунки на современных судах зажигают не факелом, а специальными запальными устройствами (электрическими или, реже, химическими патронами, дающими большое пламя в течение 10—15 с).

В одной из конструкций электровоспламенителя (рис. 14) к электромагнитной катушке 1 подведен один провод от источника тока напряжением 24—36 В; второй провод подсоединен к угольному электроду 7. При включении тока поле катушки 1 втягивает сердечник 4, связанный с электродом 6, сжимая пружину 2. Натяжение пружины 2 и сила электромагнитного поля катушки 1 отрегулированы так, чтобы поддерживать определенный зазор между электродами 6 и 7, необходимый для устойчивого горения дуги между ними. Защитный кожух 5 электродов прикреплен к корпусу воспламенителя 3.

Если в котельной установке имеется пар, то котел растапливают на подогретом мазуте после предварительного прогрева фор-

суточного трубопровода. Пустив вентилятор дутья, проветривают топку. Затем закрывают воздушные регистры всех форсунок, кроме зажигаемой, устанавливают необходимое давление дутья и зажигают форсунку. Если ее не удалось зажечь, закрывают топливный клапан, снова проветривают топку и лишь после этого повторно зажигают форсунку факелом. Остальные форсунки зажигают (от горящих) по мере подъема пара, последовательно от центра топки к ее сторонам.

Зажигать форсунки без запального факела и от раскаленной кладки категорически запрещается во избежание взрыва газов в топке.

В котлах с ротационными форсунками топку проветривают с помощью вентилятора вторичного воздуха, пускают мотор форсунки, зажигают запальный факел и вводят его в топку; открывают клапан этой форсунки и медленно включают подачу мазута.

После зажигания форсунок регулируют подачу воздуха и топлива так, чтобы получить устойчивый, не отрывающийся от форсунки факел.

При обслуживании мазутных топок следует помнить, что полнота процесса горения мазута зависит не столько от типа топочного устройства, сколько от правильной его эксплуатации. Поэтому необходимо регулярно следить за давлением и температурой мазута, поступающего к форсункам, подачей воздуха, положением форсунок и их диффузоров в воздухонаправляющем устройстве и исправностью самого устройства и форсунок. Все эти факторы влияют на экономичность горения, определяемую потерями тепла от химического недожога и коэффициентом избытка воздуха.

Приборов, определяющих быстро и точно коэффициент α избытка воздуха и потери тепла от химического недожога непосредственно во время работы топки и надежных в условиях эксплуатации морского судна, пока еще не создано. Поэтому о величинах α и степени полноты горения мазута судят косвенно по показаниям автоматических газоанализаторов, определяющих содержание O_2 , CO и H_2 или чаще только RO_2 , либо по виду пламени.

Более простым является контроль полноты горения с помощью газоанализаторов Орса. По величинам RO_2 и $RO_2 + O_2$, полученным в результате анализа уходящих газов, определяют коэффициент α и содержание CO .

Обычно рекомендуется поддерживать величины RO_2 в пределах 12—14% при практическом отсутствии CO . Такое регулирование производят при нескольких типовых нагрузках котла, например, при режиме полного хода и стояночном. Добиваясь наивыгоднейших значений α при минимальной потере от химического недожога, замечают при этом положение диффузора, форсунки, сопла, давление и температуру мазута и воздуха, подаваемых в топку, и в эксплуатации стараются придерживаться установленных положений и величин.

При наладке топочных устройств и работе котла особенно внимательно надо следить за тем, чтобы не было подсосов воздуха через неплотности в обмуровке и кожухе котла. Такие неорганизованные поступления воздуха снижают температуру в топке, ухудшают горение и уменьшают к. п. д. топки и котла. Перед наладкой топки все неплотности должны быть устранены.

О качестве горения можно судить также по отклонению температуры уходящих из котла газов от указанной в инструкциях: с увеличением количества сжигаемого топлива, т. е. с повышением нагрузки котла, температура уходящих газов растет.

Мазутные топки судовых котлов часто работают с чрезмерно высокими (до 1,5 и выше) величинами избытка воздуха, что приводит к резкому снижению к. п. д. котла.

Качество горения в значительной степени зависит от состояния распылителей. Их размеры не должны превышать установленных допусков. Распылители должны быть чистыми, хорошо отшлифованными и притертыми. Нагар удаляют отмачиванием сопел и шайб в керосине и прочисткой инструментами из цветных металлов или пластмасс.

Просачивание мазута между неплотно прилегающими поверхностями ухудшает распыливание. Шайбы следует притирать пастой по плите. Отверстие сопла можно шлифовать палочкой из твердых пород дерева, смазанной легким маслом и зажатой в ручную дрель. Если сопло разработалось и диаметр его превышает нормальный более чем на 0,1 мм, его следует заменить. Диаметр сопла проверяют по специальному калибру, один конец которого соответствует чертежному размеру, а другой — предельно допустимому.

Производительность сопла можно проверять, измеряя каким-либо сосудом количество мазута, поданное форсункой за определенное время, и сравнивая его с количеством, пропущенным через новое сопло при этом же давлении. При увеличении производительности на 15% сверх нормальной сопло следует заменить.

Качество распыливания можно оценить по виду образуемого конуса при отсутствии горения. В случае повреждения или загрязнения рабочих поверхностей распылителей на конусе распыливания видны продольные темные полосы.

О качестве горения можно приблизительно судить по цвету пламени и дыма. Пламя должно быть ярким, светло-желтым, с оранжевыми краями и легкими струйками дыма в конце факела. Рваное прозрачное пламя с искрами на краях свидетельствует о чрезмерном подогреве или избытке воздуха (из трубы выходит белый дым или он практически отсутствует). Потемнение и красный цвет пламени наблюдаются при недостатке воздуха (из трубы идет черный дым). Темно-красные полосы в пламени свидетельствуют о плохом распыливании в результате износа или загрязнения распылителей. Черные полосы у корня факела указывают на низкое давление мазута, а полосы в факеле далеко от форсунки — на низкую температуру подогрева топлива.

При нормальном горении из трубы должен выходить легкий коричневатый или светло-серый дым. Ровный черный дым, появляющийся при образовании сажи от неполного горения летучих, свидетельствует не только о недостатке воздуха. Он появляется и при плохом распыливании или низкой температуре и недостаточном давлении мазута, а также при слишком длинном факеле, ударяющемся о стенки топki. Струи черного дыма свидетельствуют о засорении форсунок.

Недостатки подвода воздуха также вызывают образование черного дыма. К ним относятся: неодинаковое открытие воздушных регистров форсунок и их коробление от нагрева, сломанные или загрязнившиеся лопатки и заслонки воздушных регистров.

Причинами появления черного дыма могут быть также повреждения кирпичной кладки топki, особенно футеровочного кольца, и образование на нем кокса.

Для контроля горения по цвету пламени и дыма необходим навык. Однако и при хорошем навыке иногда трудно определить, какая именно форсунка плохо работает. Поэтому прибегают к поочередному выключению форсунок, следя одновременно за дымом. Весьма полезны так называемые дымовые перископы, с помощью которых можно непосредственно из котельного отделения через систему зеркал наблюдать за выходящим из трубы дымом.

На некоторых судах установлены специальные дымомеры с фотоэлементом. Принцип их действия основан на ослаблении интенсивности освещения фотоэлемента при прохождении через дым луча света от электрической лампочки. Лампочку располагают в дымовой трубе напротив фотоэлемента. При изменении освещенности фотоэлемента резко возрастает его сопротивление, что регистрируется вторичным прибором, установленным в котельном отделении.

В последние годы появились специальные приборы, контролирующие степень полноты горения по ультрафиолетовому излучению пламени.

Количество поступающего в топку воздуха регулируют изменением частоты вращения вентилятора при полностью открытых воздушных регистрах.

Даже легкое касание факелом кирпичной кладки или относительно холодных водогрейных труб котла приводит к появлению дыма и образованию трудноудаляемых наростов кокса. Поэтому длина факела должна ограничиваться пределами топki.

Для уменьшения длины факела либо устанавливают распылитель с большим углом распыливания, т. е. с большим отношением сечения тангенциальных канавок к сечению сопла (см. § 16), либо изменяют установку лопаток воздухонаправляющего устройства, одновременно увеличивая давление дутья.

Для увеличения длины факела или уменьшения угла распыливания действуют в обратной последовательности. Угол распыливания должен быть подобран так, чтобы факел заполнял весь объем топki, но не касался кладки и труб. Тогда в смесеобразовании и горении будет участвовать весь воздух, поступающий

в топку. Если угол распыливания изменяется в процессе работы топки, надо отрегулировать давление мазута, так как при повышенном давлении угол распыливания увеличивается, и наоборот.

В заключение рассмотрим наиболее часто встречающиеся неполадки при работе мазутных топок:

пульсация и хлопок пламени вследствие слишком высокой температуры подогрева топлива, при которой часть выходящего из форсунки мазута мгновенно превращается в пар. Эти же явления могут быть вызваны слишком большой скоростью воздуха, колебаниями давления мазута, неправильной установкой диффузора по оси форсунки или самой форсунки по оси топки или попаданием в нее воды;

шипение и потухание факела при попадании в форсунку воды. В этом случае необходимо перейти на прием топлива из другой цистерны или из верхнего клапана той же цистерны и продуть паропровод, идущий к форсункам;

коксование форсунок при недостатке воздуха, неправильной установке диффузора или слишком далеко выдвинутой в топку форсунки; образующиеся при этом вихри подтягивают распыленный мазут обратно к форсунке;

коксование у входного футеровочного кольца фурмы топки при чрезмерном отодвигании форсунки назад, неправильной установке диффузора, недостаточном сечении или неправильной форме футеровочного кольца и неудовлетворительном состоянии воздухонаправляющих устройств;

коксование стенок и пода топки или испарительных труб вследствие удара о них факела (особенно заметно при сжигании высоковязких мазутов, так как содержащиеся в них тяжелые углеводороды разлагаются и сгорают относительно медленно). Для борьбы с коксованием необходимо выполнить мероприятия, описанные выше;

догорание летучих или горение сажи в газоходах с повышением температуры уходящих газов и появлением в некоторых случаях искр и пламени из дымовой трубы (наблюдается при чрезмерной форсировке, т. е. увеличении количества сжигаемого топлива, котла или скоплении сажи в газоходах);

сотрясения котла с выбрасыванием пламени из топки и дыма через неплотности обшивки при недостаточной подаче воздуха (бывает при неправильном пуске топки, когда в нее попадает мазут из форсунок) или при заносе газоходов отложениями.

При работе котла с малой нагрузкой необходимо принимать меры против чрезмерного повышения температуры подогрева мазута и следить за качеством его распыливания. Работа на стоянке при большом избытке воздуха значительно снижает температуру в топке, что способствует образованию сажи и загрязнению газоходов котла.

При увеличении нагрузки котла и ручном управлении горением следует сначала увеличить подачу воздуха, а затем подачу топлива и пара в подогреватель топлива. При снижении нагрузки

подачу воздуха надо уменьшить в последнюю очередь. Несоблюдение этого важного правила может привести к дымлению, образованию сажи и даже взрыву летучих в топке.

Для прекращения горения необходимо закрыть запорные мазутные клапаны и воздушные регистры форсунок, одновременно уменьшая подачу топливного насоса, частоту вращения вентиляторов и перекрывая подвод пара и топлива к подогревателям. После выключения последней форсунки останавливают топливный насос и через несколько минут вентиляторы. Все воздушные регистры плотно закрывают во избежание опасного для кладки и котла резкого охлаждения топки. Затем форсунки вынимают и погружают в керосин, а отверстия во фронтонах топок закрывают крышками.

В случае внезапного потухания форсунок (например, при падании воды или отказе топливного насоса) нужно немедленно закрыть запорные клапаны, снизить давление дутья и после проветривания топок снова зажечь форсунки запальным факелом.

§ 18. Обслуживание топливных систем

Система подачи жидкого топлива (топливная система) включает топливные насосы, подогреватели, фильтры, различные емкости (цистерны) и соединяющие их трубопроводы с арматурой и контрольно-измерительными приборами (манометры, термометры и иногда расходомеры).

Известно, что мазут, особенно подогретый до 80—90° С, представляет значительную опасность в пожарном отношении, поэтому Регистр СССР предусматривает требования, которые должны обязательно соблюдаться при постройке, ремонте и эксплуатации топливной системы и емкостей для хранения мазута. Топливо расходуется из цистерн основного запаса в строго установленном порядке для сохранения остойчивости судна.

При наличии только бортовых цистерн топливо забирают с одного борта, пока не остается $\frac{1}{4}$ его количества, а затем переходят на цистерны противоположного борта. При наличии только междудонных цистерн мазут забирают из них поочередно. Перекачка мазута без ведома старшего механика запрещается.

Все топливопроводы должны иметь уклон к спускным кранам для возможности полного осушения труб. Напорные топливопроводы разрешается изготавливать только из бесшовных труб; приемные топливопроводы могут быть изготовлены из сварных труб. Напорные топливопроводы горячего мазута должны быть возможно короче.

Вязкость мазута зависит от его марки и температуры. Перекачивание вязких мазутов, особенно парафинистых, без подогрева вообще невозможно. Для мазута 40 достаточно установить паровой обогревающий змеевик у приемной сетки топливопровода. Для более вязких мазутов или в том случае, если судно плавает

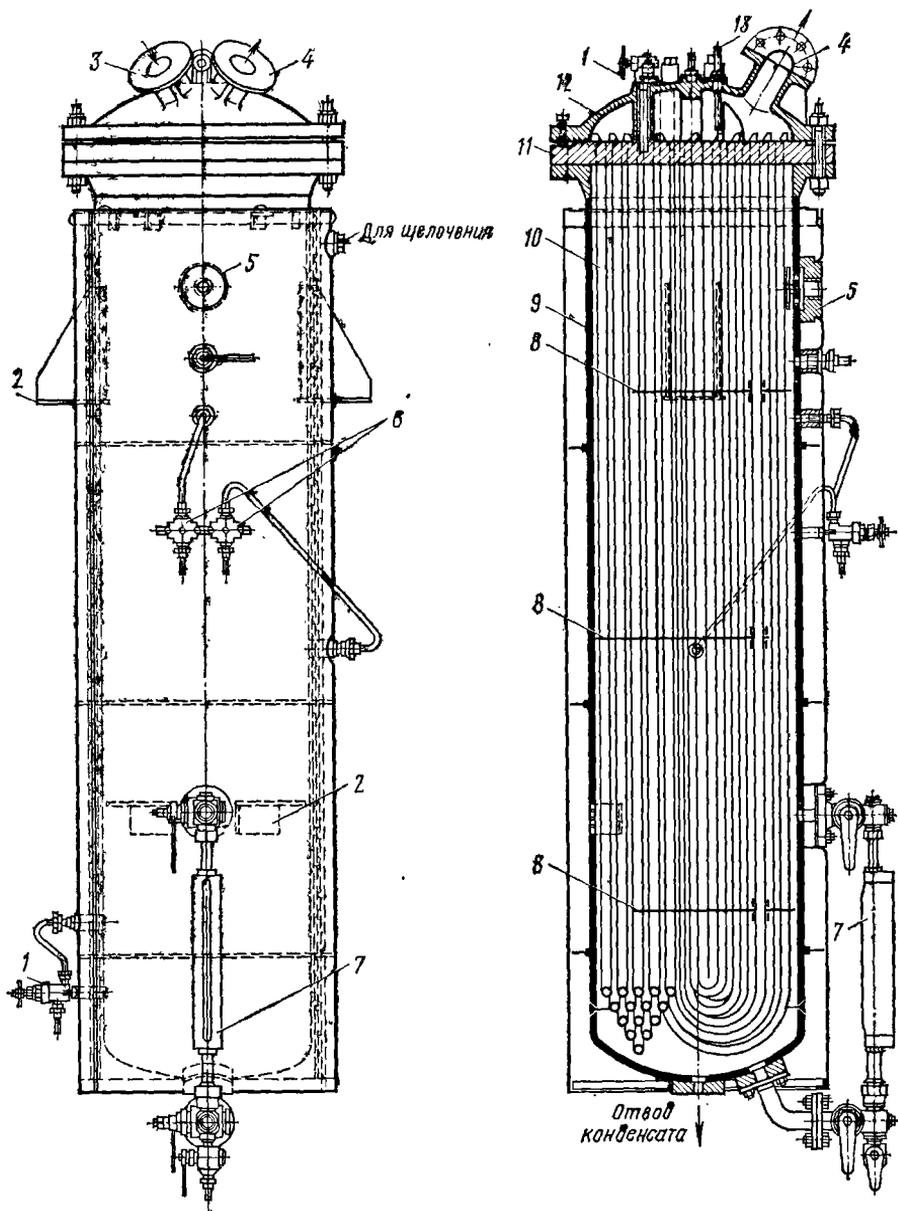


Рис. 15. Топливоподогреватель

в северных широтах, необходимо установить обогревающие змеевики по всей цистерне или танку.

Для подогрева мазута целесообразно использовать отработавший пар давлением 2—3 кгс/см². Для достижения большей экономичности рационально утилизировать тепло конденсации пара, т. е. устанавливать на выходных концах греющих трубопроводов конденсационные горшки — устройства, пропускающие только конденсат и задерживающие пар.

Все соединения паропроводов, расположенных в танках или цистернах, должны быть герметичными с нефтестойкими прокладками. Желательно, чтобы в танках и цистернах вообще не было фланцевых и других соединений паропроводов, за исключением сваренных встык. Это необходимо, чтобы мазут не мог проникнуть в подогреватели, когда давление топлива больше, чем давление при выключении греющего пара. Герметичность соединений позволяет также предотвратить обводнение мазута в танках греющим паром.

Мазут подогревают перед форсунками в герметичных подогревателях. Представленная на рис. 15 конструкция топливоподогревателя, широко применяющегося на судах морского флота, обладает большой надежностью в эксплуатации, так как допускает свободное удлинение труб при нагреве.

Позиции на рисунке означают: 1 — воздушный кран; 2 — опорные кницы; 3, 4 — приемный и выходной патрубки; 5 — наварыш для приемного паропровода; 6 — трубка к манометру; 7 — водоуказательный прибор для наблюдения за уровнем конденсата; 8 — полупереборки; 9 — корпус; 10 — U-образные стальные трубки; 11 — крышка; 12 — топливная камера; 13 — термометр.

Мазут содержит механические примеси, которые могут нарушить работу форсунок. Поэтому, помимо сеток, на приемных патрубках топливопроводов подогретого мазута устанавливают добавочные фильтры.

На рис. 16 показана одна из конструкций топливного фильтра, состоящего из двух одинаковых корпусов 5 и 10, которые можно включать попеременно рычагом 4, связанным зубчатыми секторами 7 и 8 с клапанами обоих фильтров.

Нагретый мазут поступает через трехходовой кран 9. Проходя через перфорированный цилиндр 1, обтянутый тонкой латунной сеткой с мелкими отверстиями, мазут фильтруется и выходит через трехходовой кран 6. Засорившийся фильтр отключают поворотом рычага 4 и, сняв крышку 2, закрепленную болтом со скобой 3, вынимают фильтрующую сетку и промывают ее в керосине или соляре. После сборки фильтр вновь готов к работе.

В качестве перекачивающих насосов применяют паровые прямодействующие центробежные (паровые и электроприводные) и шестеренные насосы. В качестве топливных насосов также могут быть использованы паровые или с электрическим приводом, прямодействующие или, чаще, шестеренные и винтовые. Напор перекачивающих насосов составляет обычно 4—5, а топливных 18—20 кгс/см² и более.

Периодичность очисток фильтров устанавливают по перепаду давлений до и после фильтра (обычно не более 1 кгс/см^2).

При паровых или ротационных форсунках топливный насос заменяют обычным низконапорным, создающим давление в напорной магистрали до 3 кгс/см^2 .

Так как в мазуте почти всегда имеется вода, то на всех расходных цистернах должны быть установлены спускные краны, а приемные сетки топливопроводов должны отстоять от дна цистерн на $400\text{--}500 \text{ мм}$. Чем больше это расстояние, тем меньше вероятность попадания воды в форсунки.

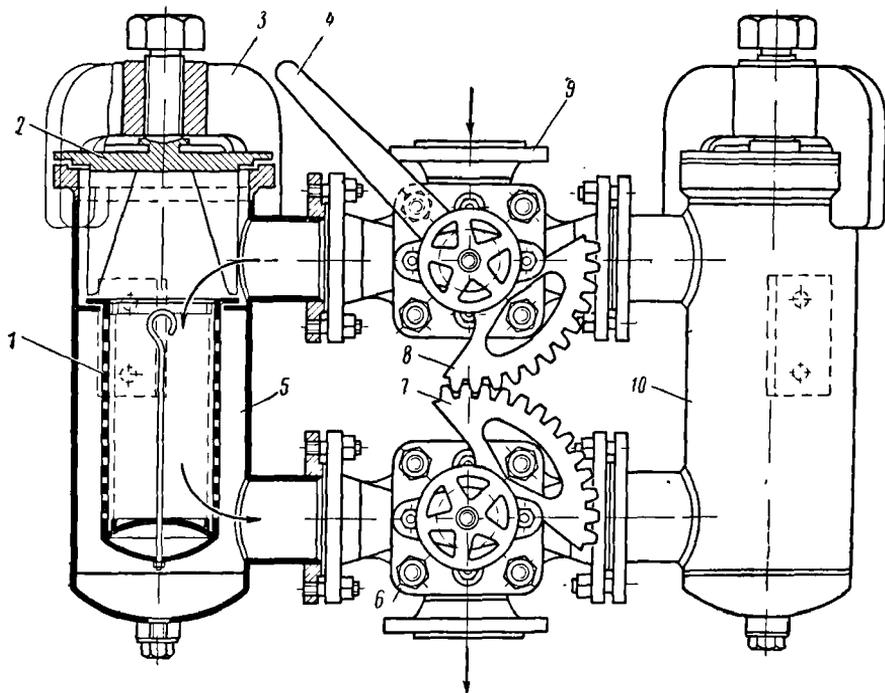


Рис. 16. Топливный фильтр

Для удаления остатков на дне цистерн размещают приемные патрубки зачистных насосов (при удалении остатков мощными перекачивающими насосами неизбежны срывы в их работе).

Напорные топливопроводы горячего мазута должны быть по всей длине расположены над пайолом котельного отделения, чтобы можно было постоянно наблюдать за их состоянием. Во избежание ожогов и для уменьшения потерь тепла топливопроводы изолируют.

Переключение клапанов, фильтров, подогревателей и насосов может быть автоматизировано для облегчения управления котлами, повышения надежности эксплуатации и предотвращения возможных ошибок при обслуживании котлов.

К основным неполадкам в работе системы подогрева и подачи топлива относятся обводнение мазута, попадание его в котлы и дефекты в работе топливных насосов.

Вода удаляется отстоем при подогреве. Для ускорения отстоя мазуты подогревают до 50—60° С, однако полный отстой обводненного мазута продолжается до 24 ч.

Обводнение мазута может привести к срыву работы топки, а следовательно, нарушению подачи пара к главным двигателям, что весьма опасно для судна, особенно в штормовую погоду, при проходе проливов и каналов. При обводнении может образоваться (во время качки) эмульсия мазута с водой, которая препятствует отставанию воды и срывает работу топливных насосов.

Для того чтобы не допустить обводнения мазута, необходимо строго следить за герметичностью танков и тщательно контролировать качество топлива, принимаемого с барж и других судов. Для борьбы с образованием эмульсий существуют противоэмульсионные смеси. В их состав входят вещества, способствующие выделению воды из эмульсии (например, сода) или превращающие эмульсию в однородную массу, которая поддается сжиганию.

Для уменьшения вязкости топливо подогревают перед форсунками: мазут марки 40 — до 110° С, мазут марки Ф-5 — до 70° С; дизельное топливо ДС обычно не подогревают. На новейших судах температура подогрева мазута регулируется автоматически для поддержания постоянства вязкости независимо от сжигаемого сорта мазута. При эксплуатации парового подогревателя следует регулировать температуру не только паровпускным клапаном, но и клапаном выпуска конденсата греющего пара так, чтобы в водомерном стекле подогревателя был виден уровень конденсата (см. рис. 15). С другой стороны, следует избегать излишнего скопления конденсата с паровой стороны подогревателя, так как при этом увеличивается расход пара на подогрев.

Современные подогреватели снабжены конденсационными горшками на выходе конденсата, которые позволяют почти полностью использовать для подогрева мазута теплоту пара. Конденсационные горшки следует содержать в исправности и периодически перебирать и регулировать. Выключение горшка с использованием обходного трубопровода для удаления конденсата вызывает перерасход пара.

При длительной эксплуатации подогреватели загрязняются смолистыми отложениями, в результате чего может образоваться кокс. Признаком загрязнения подогревателя, также вызывающего перерасход пара, является необходимость увеличения давления греющего пара для сохранения требуемой температуры. Отложения удаляют из подогревателей путем промывки растворителями (например, дизельным топливом, мазутом Ф-5) и моющим порошком или присадкой ВНИИ НП-12.

Особое внимание следует уделять предотвращению и устранению пропусков мазута в паровое пространство подогревателей и в паровые змеевики в танках. На современных морских судах

с паротурбинными установками имеются специальные испарители грязных конденсатов (ИГК). Применение ИГК позволяет практически избежать попадания мазута и масел в питательную систему котлов.

Водомерные или смотровые стекла подогревателей следует чаще продувать и при обнаружении следов мазута (в стекле) немедленно выключать подогреватель или временно, до устранения дефекта, спускать из него конденсат в льяла.

Рекомендуется раз в три месяца испытывать подогреватель на плотность в холодном состоянии, прокачивая мазут под давлением, и ежегодно подвергать подогреватель гидравлическому испытанию.

На некоторых судах в отводной трубопровод конденсата, идущего от всех устройств для подогрева мазута, включен небольшой бак с двумя стеклами в противоположных стенках. За баком помещена электрическая лампочка. Такой прибор позволяет следить за чистотой конденсата и вовремя обнаруживать следы мазута.

При выключении подогревателя сначала прекращают подачу пара, затем мазута и после снижения давления пара до атмосферного закрывают клапан выпуска конденсата.

Давление мазута перед форсунками должно быть постоянным.

При работе топливных винтовых насосов их производительность может резко упасть из-за неплотности сальников и фланцев приемных труб, неправильной установки пружины перепускного клапана и чрезмерной вязкости мазута. Иногда насос самопроизвольно останавливается вследствие засорения, чрезмерно высокой температуры мазута, ржавления деталей после длительного бездействия и дефектов в подшипниках. После самопроизвольной остановки насос необходимо проверить вручную в обратном направлении. Если это не даст положительных результатов, насос следует разобрать и устранить дефект.

Глава VI. КОНСТРУКЦИЯ КОТЛОВ

§ 19. Огнетрубные котлы

Огнетрубный котел впервые появился более 130 лет назад и с тех пор его конструкция принципиально не изменилась.

Огнетрубные оборотные котлы до сих пор используют в составе морских паросиловых установок. Такие котлы имеют значительный срок службы (до 40 лет), поэтому, несмотря на то, что в последнее время их постройка в качестве главных почти полностью прекратилась, они будут встречаться на морских судах еще многие годы. Кроме того, огнетрубные котлы установлены на некоторых судах в качестве вспомогательных.

На рис. 17 представлена схема трехтопочного оборотного котла, который еще часто встречается на морских судах. Все основные части оборотного котла сварены при помощи электросварки из листов специальной котельной стали.

Главные оборотные котлы имеют обычно три топки. Вспомогательные или главные котлы малой производительности имеют одну или две топки.

Барaban котла 9 сваривают из нескольких листов стали.

Передние 5 и задние 16 плоские днища изготавливают штамповкой из двух, а иногда из трех листов.

Жаровые трубы 8 присоединяют к отфланцовкам переднего днища 5 и к передним стенкам 11 огневых камер. Часть передней

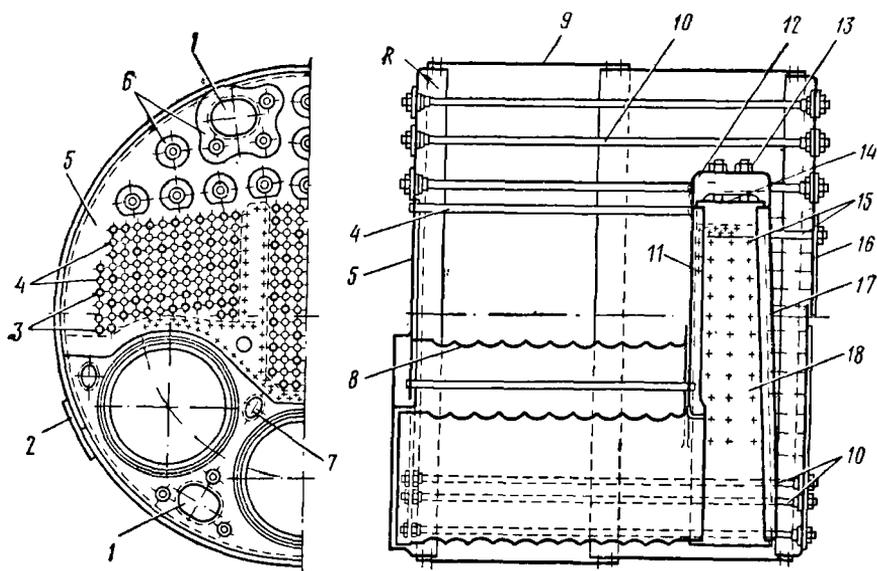


Рис. 17. Огнетрубный оборотный котел

стенки огневой камеры, в которой установлены дымогарные трубы 4, называется задней трубной решеткой. Соответствующая часть переднего днища котла называется передней трубной решеткой.

Огневая камера образуется передней 11 и задней 17 стенками, соединенными шинельным листом 18, образующим нижнюю и боковые стенки камеры. Верхняя часть огневой камеры называется потолком 14.

Все плоские стенки котла, подверженные внутреннему давлению, во избежание деформации укрепляют связями. Длинные связи 10 соединяют днища котла, короткие 15 — заднее днище котла и задние стенки огневых камер, а также шинельные листы огневых камер между собой и с бочкой котла.

Потолок огневой камеры крепится при помощи потолочных (или анкерных) скоб 12 с болтами 13. Накладки 2, установленные в днищах, и шайбы 6, служат для увеличения местной прочности.

Часть дымогарных труб изготовляют с утолщенными стенками 3. Такие трубы называются связными, так как служат для связи трубных решеток котла. Остальные дымогарные трубы называются простыми.

Для доступа внутрь котла имеются горловины и лазы 1 и 7.

Для изготовления всех деталей огнетрубного котла применяют малоуглеродистую сталь.

В большинстве огнетрубных котлов устанавливают волнистые жаровые трубы. Изменение их длины при нагреве или охлаждении компенсируется сжатием или растяжением волн, в результате чего также усиливается радиальная жесткость труб.

При правильной технической эксплуатации жаровые трубы работают десятки лет. Преждевременный их износ обычно связан с нарушением правил обслуживания. Особенно быстро жаровые трубы выходят из строя при прорывах холодного воздуха в топку, резких подъемах или падениях давления, вызывающих значительные продольные деформации. Отложение накипи, масла или мазута на поверхности жаровых труб вызывает перегрев металла, ослабление прочности, образование выпучин внутри топки.

Из жаровых труб топочные газы поступают в огневые камеры, где догорают. У большинства огнетрубных котлов каждая топка имеет отдельную огневую камеру, форма которой зависит от числа топков. В двухтопочных котлах форма обеих огневых камер одинакова, а в трехтопочных средняя огневая камера отличается от крайних.

Глубина огневой камеры составляет 550—850 мм. В огнетрубных котлах, работающих на мазуте, заднюю стенку огневой камеры иногда выкладывают на высоту топки огнеупорным кирпичом, предохраняющим короткие связи от воздействия пламени. Кирпичом выкладывают также под огневой камеры.

Дымогарные трубы изготовлены цельнотянутыми, бесшовными из малоуглеродистой стали 10. Наружный диаметр простых и связных дымогарных труб одинаков. Наиболее употребительны трубы диаметром 83, 76 и 70 мм; трубы малого диаметра быстрее забиваются сажей.

В каждом котле (в верхней части барабана) устраивают один лаз. Лазы по основным осям имеют размеры не менее 300 × 400 мм. Лазы и горловины делают овальной формы, чтобы можно было ввести внутрь котла крышки, которые прижимаются давлением пара.

По размерам горловины меньше лазов. Одну или две горловины располагают в нижней части переднего днища. Они служат для осмотра внутренней поверхности котла, промывки его нижней части и удаления оседающего внизу шлама. Кроме того, в труднодоступных для очистки местах котла устраивают малые горловины для осмотра и облегчения ремонта котла (передача внутрь его инструмента, приспособлений, освещения и т. д.).

На рис. 18 показано крепление крышки 2 лаза на шпильках 1 и скобах 3. Шпильки должны быть ввинчены в крышку лаза и об-

варены. Соприкасающиеся поверхности крышки и корпуса котла должны быть чисто обработаны и снабжены концентрическими рисками. Между этими поверхностями ставят прокладку из прографиченной асбестовой (люковой) ленты.

Отверстия на барабане и днищах котла, необходимые для установки клапанов и другой арматуры, подкрепляют приваренными кольцами (наварышами), на которые ставят арматуру.

Рабочее давление у подавляющего большинства огнетрубных котлов не превышает 15—16 кгс/см². Барабан котла вследствие большого диаметра, достигающего до 5200 мм, приходится изготовлять из листов толщиной 40—42 мм. Для гибочных и штамповочных работ с такой толстолистовой сталью требуется дорогое оборудование, в результате чего стоимость котла значительно возрастает; увеличивается и его масса. Таким образом, наличие плоских стенок и большой диаметр барабана котла ограничивают величину рабочего давления пара.

Поверхность нагрева составляет от 15 м² для однотопочных до 280 м² для трехтопочных оборотных котлов. Ее определяют как сумму поверхностей всех дымогарных труб, огневых камер и жаровых труб со стороны газов.

Паропроизводительность трехтопочных оборотных котлов не превышает 5,5—6,5 т/ч при работе на мазуте. К. п. д. котла при этом обычно равен 70—75%.

Отметим несколько существенных недостатков оборотных котлов: практически невозможно построить котел на избыточное давление свыше 15—16 кгс/см² паропроизводительностью более 6,5 т/ч; поэтому на больших судах старой постройки устанавливали 10—12 котлов и более; -

оборотные котлы весьма тяжелы. Например, масса трехтопочного котла в рабочем состоянии доходит до 140—160 т, т. е. на 1 кг пара в час приходится 22—26 кг массы котла;

относительная жесткость конструкции котла не позволяет быстро поднимать и снижать давление пара. При быстром нагревании или охлаждении котла возникает течь, ослабляются соединения (дымогарные трубы и швы);

период подъема пара до рабочего давления при начальном холодном состоянии трехтопочного котла составляет не менее 24 ч. Это объясняется не только жесткостью конструкции, но и плохой теплопроводностью воды. При быстрой растопке вода нагревается сильнее над жаровыми трубами, и разность температур воды в нижней и верхней частях котла может достигнуть 50°. Это

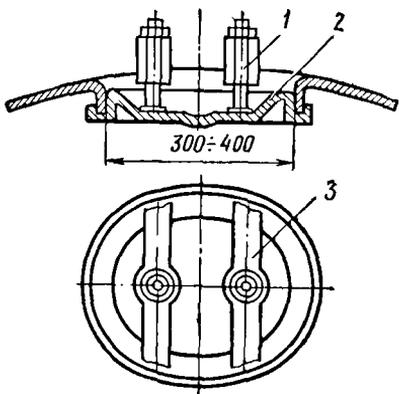


Рис. 18. Лаз с крышкой

приводит к неравномерному нагреву и удлинению разных частей котла, что также ослабляет соединения.

Вследствие указанных недостатков главные оборотные котлы не смогли конкурировать с более легкими и экономичными водотрубными котлами. Последние окончательно вытеснили главные огнетрубные котлы на всех морских судах.

§ 20. Водотрубные котлы

В водотрубных котлах с естественной циркуляцией вода и пароводяная смесь движутся внутри труб, образующих поверхность нагрева котла, без помощи каких-либо посторонних источников энергии (механических насосов и т. д.), а только за счет разности плотности воды и ее смеси с образующимся паром.

Паровые котлы, в которых пароводяная смесь и вода движутся преимущественно под действием насосов, называются котлами с принудительной циркуляцией (см. § 23).

Начало широкого применения водотрубных котлов на судах можно отнести к 1895—1898 гг. Русские кораблестроители явились пионерами внедрения этих котлов сначала на военных, а впоследствии и на торговых судах (Балтийский завод в Петербурге).

За истекшее время водотрубные котлы значительно усовершенствованы. Многие конструкции котлов удовлетворяют условиям эксплуатации самых разнообразных по типу и мощности морских судов.

Ниже указаны конструктивные отличия, которые были положены в основу классификации морских водотрубных котлов с естественной циркуляцией:

наклон испарительных труб к горизонту. По этому признаку различали горизонтальные котлы (наклон труб не превышает 30°) и вертикальные (наклон труб более 30°);

количество барабанов (коллекторов). На морских судах устанавливают одно-, двух- и трехбарабанные (в единичных случаях четырехбарабанные) котлы;

количество поворотов (ходов) потока дымовых газов внутри пучка испарительных труб (на морских судах встречаются одно- и трехходовые котлы);

количество протоков дымовых газов (на морских судах встречаются преимущественно однопроточные котлы);

симметрия относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось верхнего барабана котла (симметричные и асимметричные котлы);

степень экранирования топки. Современные котлы часто имеют полностью экранированную топку, т. е. на всех ее стенах, кроме пода, размещаются экраны, образованные из рядов водогрейных (экранных) труб;

параметры производимого пара;

особые конструктивные различия, вносимые заводом-изготови-

телем, фирмой или проектирующей организацией (тип котла определяется по названию фирмы или завода-изготовителя).

Поверхность нагрева всех водотрубных котлов образуется испарительными трубами, омываемыми снаружи дымовыми газами.

Испарительные трубы изготовляют из малоуглеродистой стали (обычно сталь марки 10 или 20), а для котлов высокого давления — из низколегированных сталей. Все трубки должны быть бесшовными, цельнотянутыми. Сварка труб не рекомендуется; в отдельных случаях допускается только сварка встык.

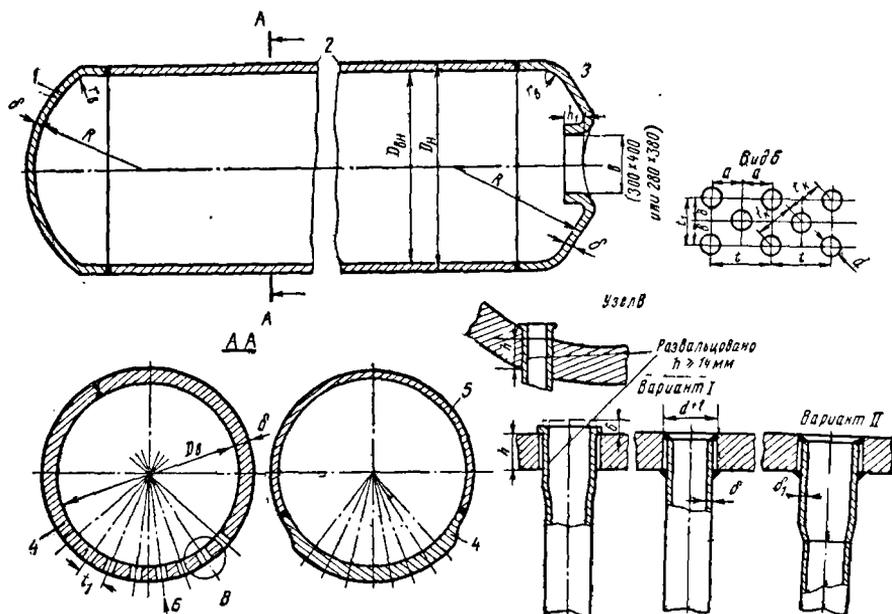


Рис. 19. Некоторые конструктивные элементы водотрубных котлов

В судовом котлостроении преимущественно распространены испарительные трубы с внешним диаметром $d_{вн}$, равным 44,5; 38; 32 и 29 мм. Толщину стенки труб определяют расчетом на прочность, однако по Правилам Регистра СССР она не должна быть менее 2,5 мм при внешнем диаметре более 28 мм.

На рис. 19 приведены основные конструктивные элементы барабанов и коллекторов сварных водотрубных котлов.

Испарительные трубы компонуют в пучки. Расстояние (в миллиметрах) между осями двух соседних труб в одном ряду, расположенном в плоскости, перпендикулярной направлению потока газов, называется поперечным шагом и обозначается обычно через S_1 (t на рис. 19, вид Б).

Продольным шагом S_2 (по отношению к потоку газов) называют расстояние между рядами труб по их центрам ($b = \frac{t_1}{2}$ на рис. 19).

Сохранение шаговых отношений S_1/d и S_2/d имеет большое значение для теплообмена, поэтому расчетные величины S_1 и S_2 должны быть строго выдержаны при эксплуатации котла.

Испарительные трубы присоединяют к барабанам (коллекторам). Нижние водяные коллекторы имеют цилиндрическое или прямоугольное сечение. Последние, как правило, являются коллекторами топочных экранов.

Испарительные трубы укрепляют в барабанах развальцовкой или на сварке. При развальцовке испарительные трубы протягивают внутрь барабана на 6 мм от внутренней стенки трубной решетки и развальцовывают в ней «на колокольчик». Трубы приваривают непосредственно к трубной решетке 2 барабана котла (вариант I) или к переходному штуцеру (вариант II). Последнюю конструкцию применяют преимущественно для котлов высокого давления, что позволяет упростить технологию смены труб и их приварки.

Коллекторы I изготовляют цельносварными, а их днища 3 — горячей штамповкой. Материалом для изготовления барабанов служит среднемарганцовистая или обычная малоуглеродистая сталь, а для котлов высокого давления — специальная легированная.

Для экономии металла стенки трубной решетки 4 и обертки (обечайки) 5 барабана делают разной толщины. Стенку трубной решетки делают толще для компенсации ее ослабления отверстиями и для плотности вальцовки. Небольшие барабаны, у которых разница в расходе металла и массе мала, делают одинаковой толщины по всей окружности (см. левую часть разреза А — А).

§ 21. Секционные котлы

Секционные котлы принадлежат к горизонтальным водотрубным котлам и являются единственными представителями этого типа котлов на морских судах. Монопольное право на изготовление таких котлов в свое время принадлежало зарубежной фирме «Бабкок и Вилькоккс», поэтому котлы иногда называют по наименованию фирмы.

Первые секционные котлы впервые были установлены на судах в конце прошлого века и теперь они еще распространены на старых судах отечественного и зарубежного флота (пароходы типа «Донбасс», «Либерти», «Виктори»). Большое количество секционных котлов было построено зарубежными фирмами в период 1943—1950 гг. В настоящее время их устанавливают изредка в качестве вспомогательных на танкерах.

Принципиальная схема водотрубного секционного котла показана на рис. 20, а (котел парохода типа «Либерти»).

К нижней части барабана 7 посредством патрубков 8 присоединен ряд камер. Передние 9 и задние 1 камеры соединяются между собой испарительными трубами 6.

Передняя и задняя камеры вместе с соединяющими их испарительными трубами образуют секцию, откуда и произошло название котла — секционный. Количество секций, установленных по длине барабана, определяется производительностью котла и ограничивается длиной барабанов или предельным габаритом котла.

Вода, поступающая из барабана 7 в камеры 9, расходится по испарительным трубам 6, где частично превращается в пар. Пароводяная смесь отводится по камерам 1 и пароводящим трубам 4 в барабан 7. Для облегчения выхода пароводяной смеси водогрейные трубы устанавливаются под углом не менее 15° к горизонту (обычно $15-18^\circ$).

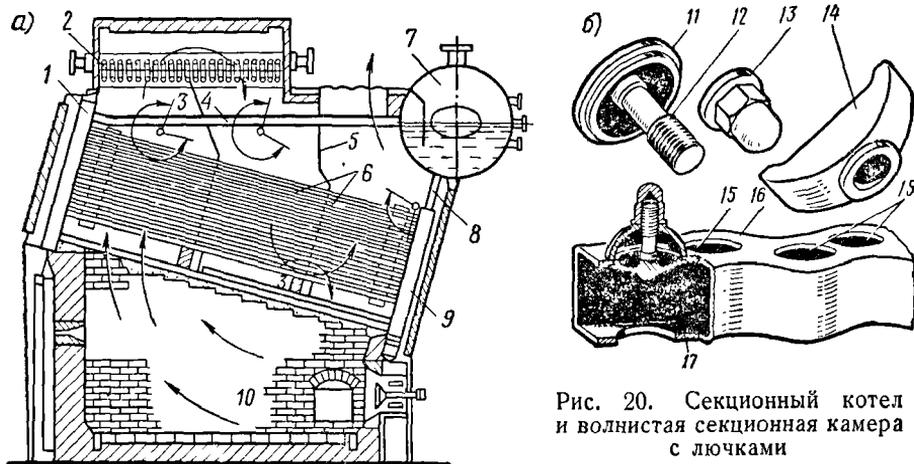


Рис. 20. Секционный котел и волнистая секционная камера с лючками

Продукты горения из топки 10 направляются в газоходы котла по пути, указанному стрелками, и дважды меняют свое направление из-за перегородок 5, поставленных внутри газоходов.

Такой секционный котел называют еще трехходовым в отличие от одноходового, не имеющего газовых перегородок внутри пучков труб поверхности нагрева котла.

Рассматриваемый котел имеет пароперегреватель 2, установленный между первым и вторым газоходами.

Для обдувки труб от загрязнений предусмотрены сажеобдувочные устройства 3.

Коэффициент теплоотдачи от газов к стенкам труб достигает наибольшей величины при шахматном расположении труб, поэтому камеры секций делают волнистыми (рис. 20, б). Испарительные трубы вставляют в камеры 16 через отверстия — лючки 15 и развальцовывают в стенке 17. На один лючок может приходиться от одной до девяти и более труб. Лючки 15 служат также для очистки и ремонта труб во время эксплуатации котла. Лючки закрывают крышками 11 эллиптической или квадратной формы. Крышка 11 при помощи скобы 14, шпильки 12 и гайки 13 плотно притягивается

к стенке камеры. Герметичности уплотнения способствует прокладка, укладываемая по выточке крышки 11.

Конструкция котлов, схема которых показана на рис. 20, относительно проста и они малоэкономичны в работе. Паропроизводи-

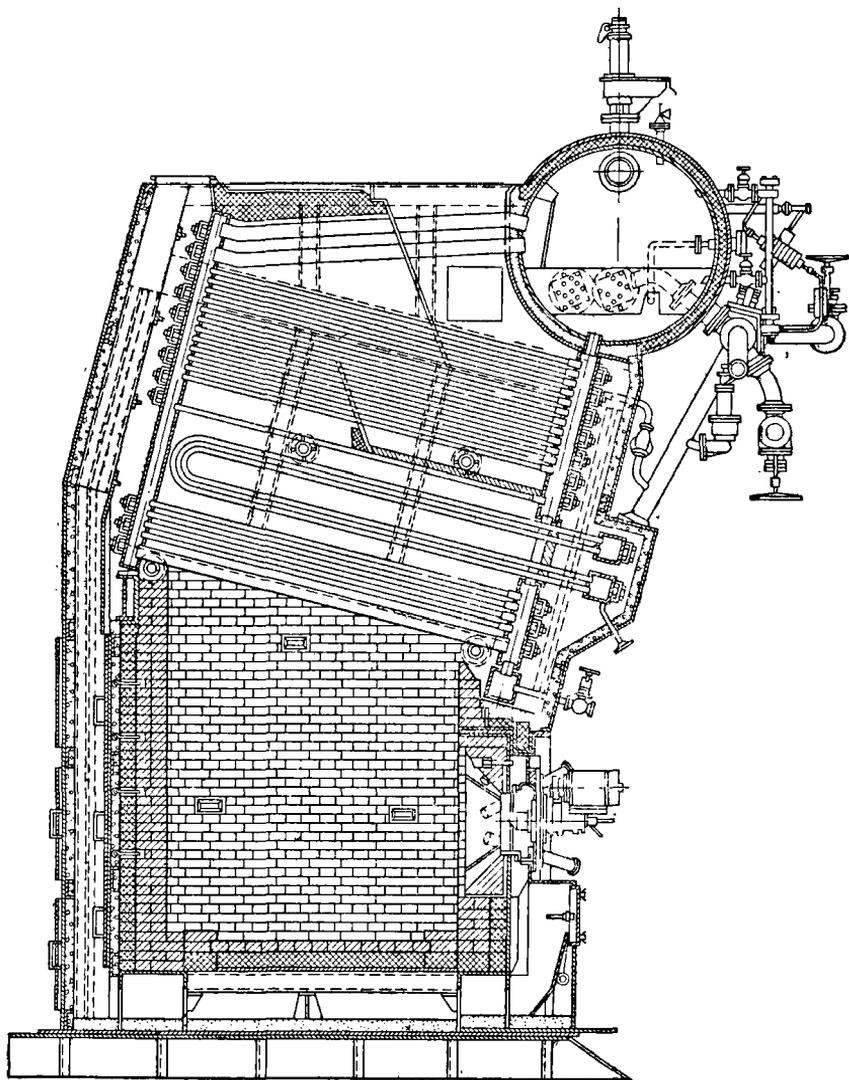


Рис. 21. Котел парохода „Донбасс“

тельность этих котлов составляет около 8,5 т/ч при давлении пара 16 кгс/см² и его температуре 230° С.

Более новые секционные котлы (рис. 21) постройки пятидеся-

были предназначены для работы на угле, но сейчас переведены на мазутное отопление. Паропроизводительность таких котлов составляет около 6 т/ч при давлении пара 16 кгс/см², температуре перегретого пара 280—300° С и к. п. д. 85—86%.

В настоящее время постройка секционных котлов прекращена вследствие дороговизны изготовления секционных камер на повышенное давление пара и трудности обеспечения плотности лючков для такого давления.

Секционным котлам свойственна значительная жесткость конструкции, увеличивающая время растопок или вывода котла из действия, длительность которых, во избежание расстройств соединений труб и камер, не может быть менее 4—6 ч. Кроме того, такие котлы имеют относительно большие массу и габарит. На строящихся в последние годы судах устанавливают более совершенные вертикальные водотрубные котлы.

§ 22. Вертикальные водотрубные котлы

Почти одновременно с секционными котлами на судах стали применять и вертикальные водотрубные котлы, в частности, так называемые симметричные трехбарабанные двухпроточные (рис. 22).

Такие котлы серии КВ постройки Киевского завода «Ленинская кузница» еще недавно были широко распространены на речном флоте и до сих пор встречаются на некоторых небольших вспомогательных речных судах и в качестве вспомогательных котлов — на теплоходах. Поверхность нагрева котла КВ-5 160 м², паропроизводительность 5 т/ч при параметрах пара 16/320. Модернизированные котлы КВ-5М имеют рабочее давление 28 кгс/см².

Пароперегреватель 5, охлаждающая газы, разделяет систему труб на зоны с более высокой и низкой температурами. В задних пучках парообразования практически не происходит, и их трубы являются опускными, т. е. по ним вода из барабана 3 опускается вниз в коллекторы 6. Питательная вода подается в верхний барабан котла.

Первые пучки образуют подъемные трубы. По ним поднимается вверх пароводяная смесь. Ниже пучков труб расположена топка 11. Обмуровка нижних стен и пода 10 топки выполнена из огнеупорного кирпича, поддерживаемого балками 9. Нижние барабаны котла установлены на опорах 7, лежащих на фундаментах 8.

Снаружи котел обшит съемными стальными листами 1, изолированными со стороны газоходов асбестом. Насыщенный пар из парового пространства барабана 3 через паросборную трубку 4 и разобщительный клапан поступает в коллектор пароперегревателя.

Пучки испарительных труб 2 соединяют пароводяной барабан 3 с водяными барабанами 6. Наружный диаметр испарительных труб трех передних рядов равен 44,5 мм, внутренний — 38 мм. Трубы остальных рядов имеют наружный диаметр 38 или 29 мм, а внутренний — соответственно 32 и 24 мм.

На рис. 23 показана схема котла К-81 Балтийского завода. Такие котлы установлены в качестве вспомогательных на серийных танкерах типа «Казбек». Котлы имеют поверхность нагрева 200 м²

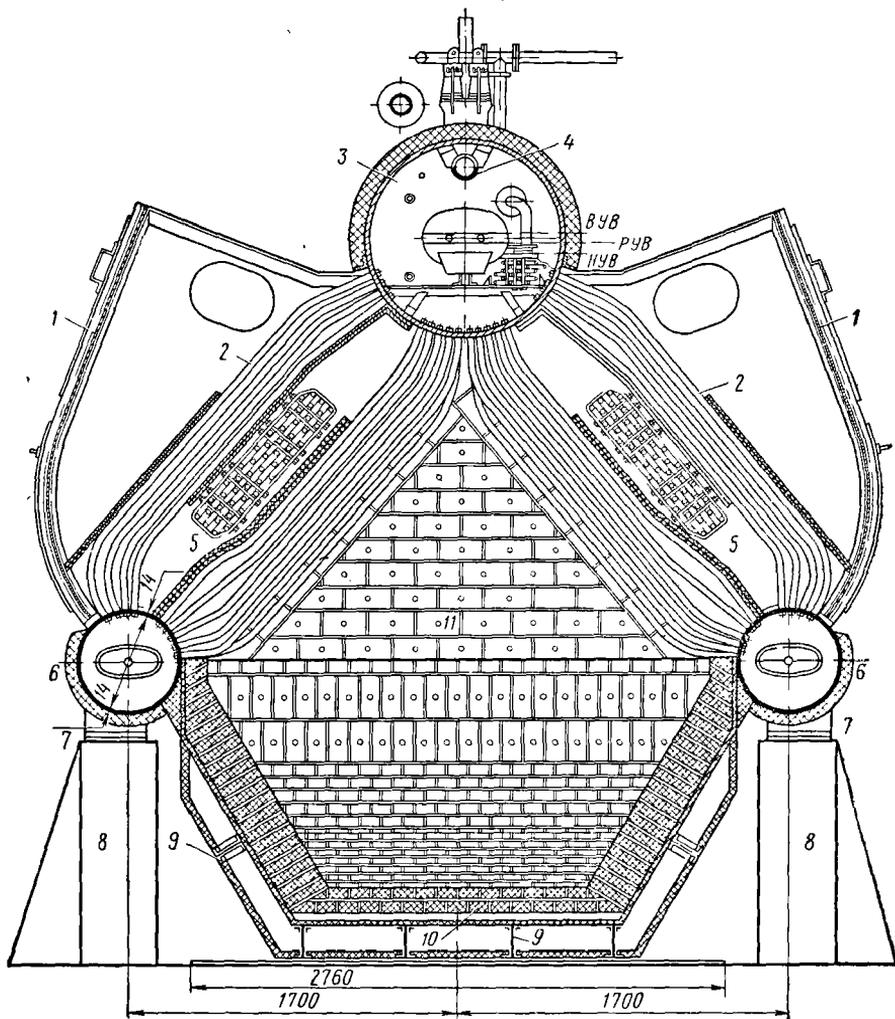


Рис. 22. Котел KB-5

и вырабатывают насыщенный пар давлением 15 кгс/см². Небольшая высота котла объясняется условиями его установки на судне.

Позиции на рисунке означают: 1, 14, 18 — клапаны соответственно питательный, предохранительный, стопорный; 2 — водоуказательный прибор; 3 — кран для манометра; 4 — клапан продувания водяного барабана; 5—7 — манометры; 8 — трехходовой кран у манометра; 9 — клапан топливного трубопровода; 10 — клапан управления форсункой; 11 — форсунка; 12 — быстрозапорный

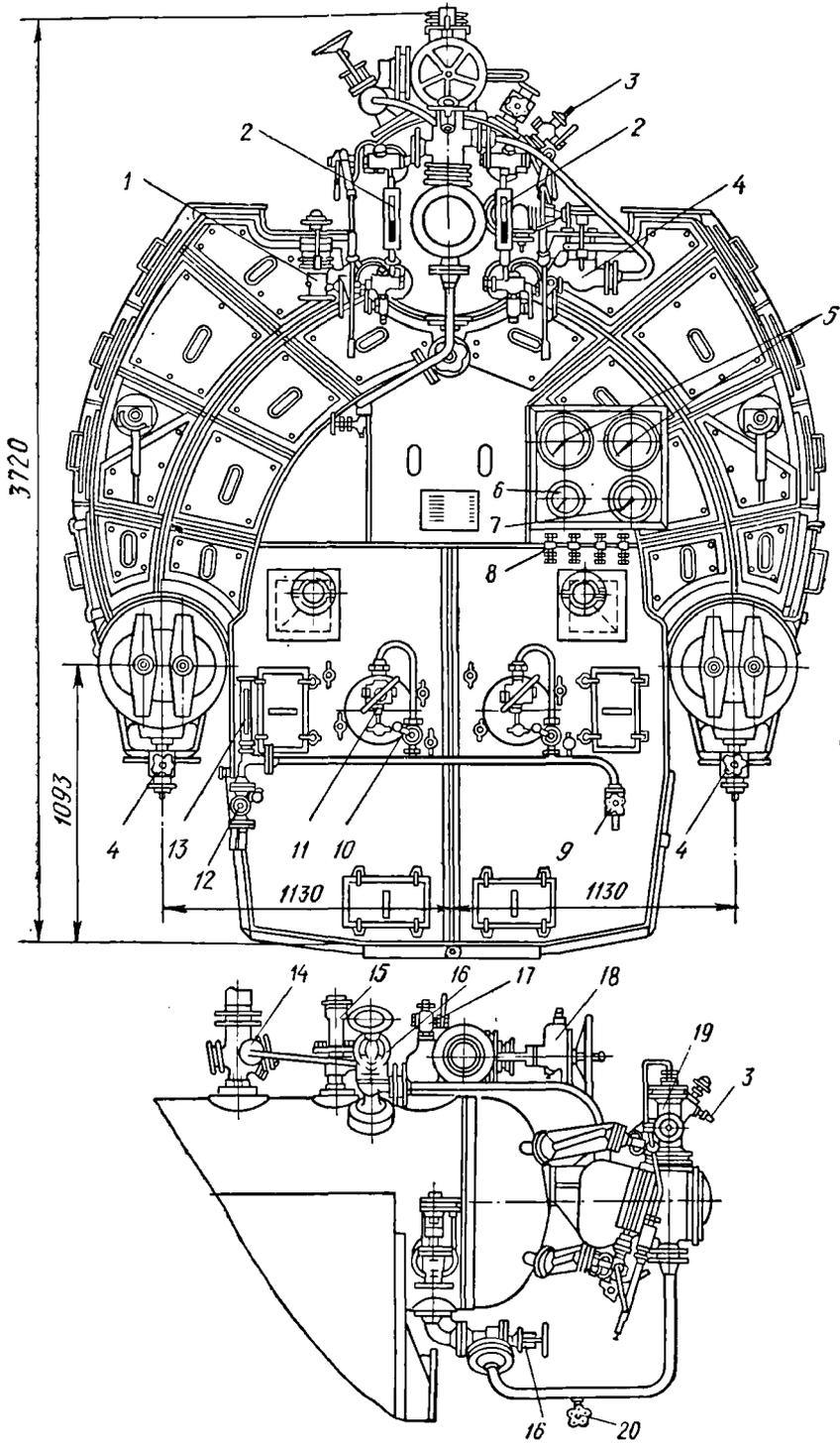


Рис. 23. Котел К-81

клапан (БЗК); 13 — термометр для измерения температуры топлива перед форсунками; 15 — контрольный клапан к предохранительному клапану; 16 — клапан, сообщающий систему питания с регулятором; 17 — воздушный кран; 19 — автоматический регулятор питания; 20 — клапан продувания трубы регулятора питания.

К преимуществам симметричных водотрубных котлов перед секционными относятся более высокие тепловые напряжения поверхности нагрева, т. е. меньшие размеры и масса, что объясняется также отсутствием тяжелых секционных камер и жестких прямых труб.

Однако интенсивность теплообмена в лучках испарительных труб трехбарабанных двухпроточных котлов все же относительно невысока. Потоки газов имеют малую скорость и плохо омывают части водогрейных труб, прилегающие к барабанам, вследствие чего около 20% поверхности нагрева полностью не используется.

Дальнейшее развитие водотрубных котлов привело к появлению и большому распространению на морских судах однопроточных вертикальных котлов, в которых удалось уменьшить недостатки двухпроточных.

Серийные котлы типов КВГ-25 и КВГ-34, разработанные СКБК и построенные Балтийским судостроительным заводом, являются однопроточными вертикальными главными водотрубными котлами. Они установлены на некоторых отечественных судах.

Общий вид котла КВГ-25К, установленного на судах серии «Ленинский комсомол», представлен на рис. 24.

Позиции на рисунке означают: 1 — пароводяной барабан; 2 — вспомогательный пароохладитель; 3 — защитные листы; 4 — каркас котла; 5 и 6 — подъемные и опускные трубы бокового экрана; 7 — опоры котла; 8 — коллектор экрана; 9 и 13 — первый и второй пучки труб; 10 — пароперегреватель; 11 — водяной барабан; 12 — обмуровка котла; 14 — сажеобдучочные устройства; 15 — водяной экономайзер; 16 — трехсекционный воздухоподогреватель.

В отличие от котла КВГ-25, на котле КВГ-34 установлен не газовый, а паровой воздухоподогреватель: кроме того, имеются и некоторые конструктивные различия (крепление пароперегревателя, число форсунок, кожух котла и т. д.).

Основные характеристики котлов КВГ-25 и КВГ-34 приведены в табл. 3.

Изменение основных характеристик котлов КВГ-25 при разной нагрузке показано на рис. 25. Обозначения на рисунке следующие:

$t_{п. п.}$, °С — температура перегретого пара;
 q_v , 10^3 ккал/м³·ч — видимое тепловое напряжение объема топки;
 $t_{ух}$, °С — температура уходящих газов;
 α — коэффициент избытка воздуха;
 η_k , % — к. п. д. котла;
 B , кг/ч — часовой расход топлива.

Из этих данных видно, что технические характеристики котлов КВГ вполне удовлетворительны и находятся на современном уровне.

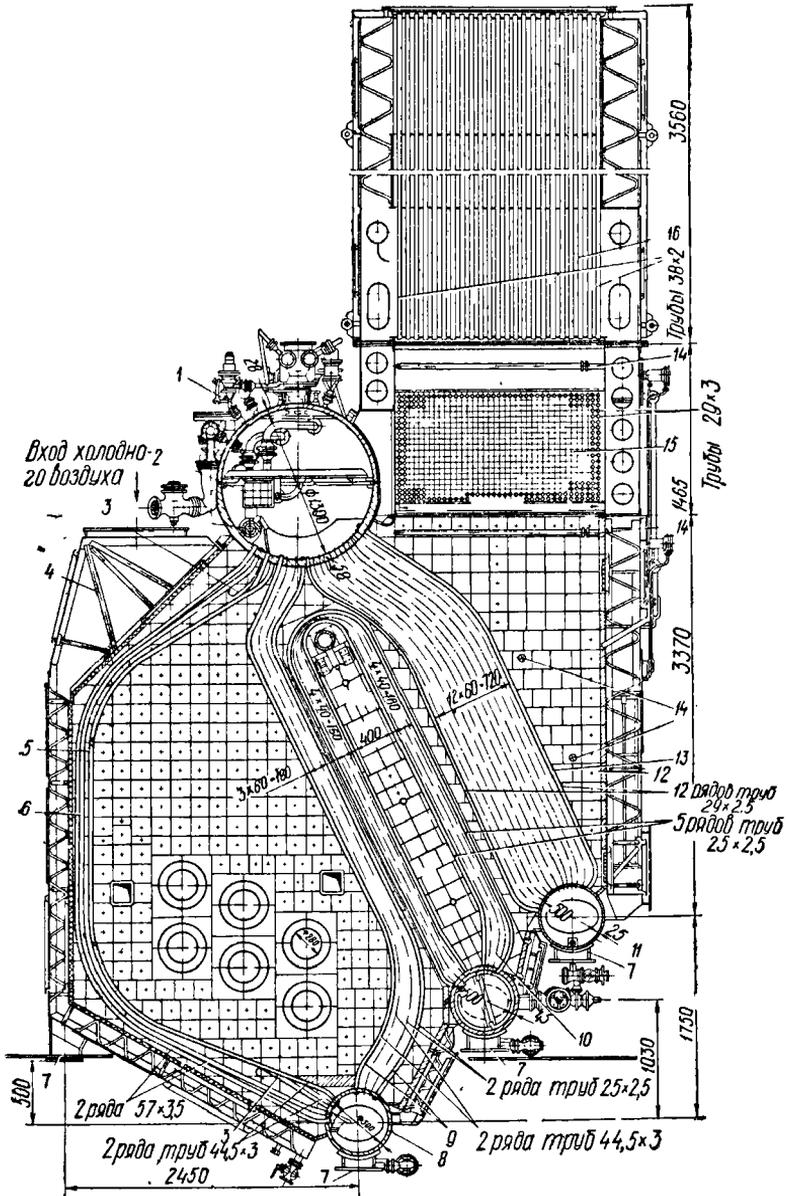


Рис. 24. Котел КВГ-25К

Характеристики котлов	Тип котла	
	КВГ-25	КВГ-34
Паропроизводительность пара, т/ч	25	34
в том числе перегретого	23, 25	31,7
Давление пара в барабане котла и за пароперегревателем, кгс/см ²	44/40	44/40
Расход топлива при $Q_H^P = 9500$ ккал, кг/ч	1800	2500
К. п. д., %	93	93
Температура, °С:		
перегретого пара	470	470
питательной воды	160	128
уходящих газов	167	175
подогретого воздуха	165	132
Поверхность нагрева, м ²		
воздухоподогревателя	600	466 (паровой)
экономайзера	243	535
пароперегревателя	192	234
Испарительная поверхность нагрева, м ²	350	610
Поверхность нагрева парохладителя, м ²	15,8	332
Масса котла с водой (без воды), т	84,7 (74,7)	96 (82)

Эксплуатация первых котлов серии КВГ на отечественных судах выявила недостатки, связанные с их конструкцией.

Фактическая температура перегретого пара оказалась ниже проектной (см. рис. 25) на 10—20° С, что снизило к. п. д. силовой установки. Вертикальный пароперегреватель, установленный на судах, имел значительное сопротивление по паровой стороне (4—5 кгс/см²), а применение его вместо обычных для морских котлоагрегатов горизонтальных пароперегревателей привело к увеличению габарита котла и его удорожанию за счет установки третьего кол-

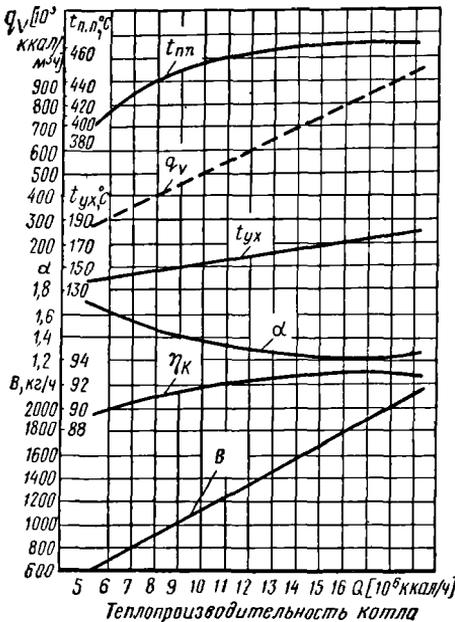


Рис. 25. Основные характеристики работы котла КВГ-25

лектора. Расположение пароперегревателя оказалось неудобным для эксплуатации как в отношении очистки труб, так и их ремонта.

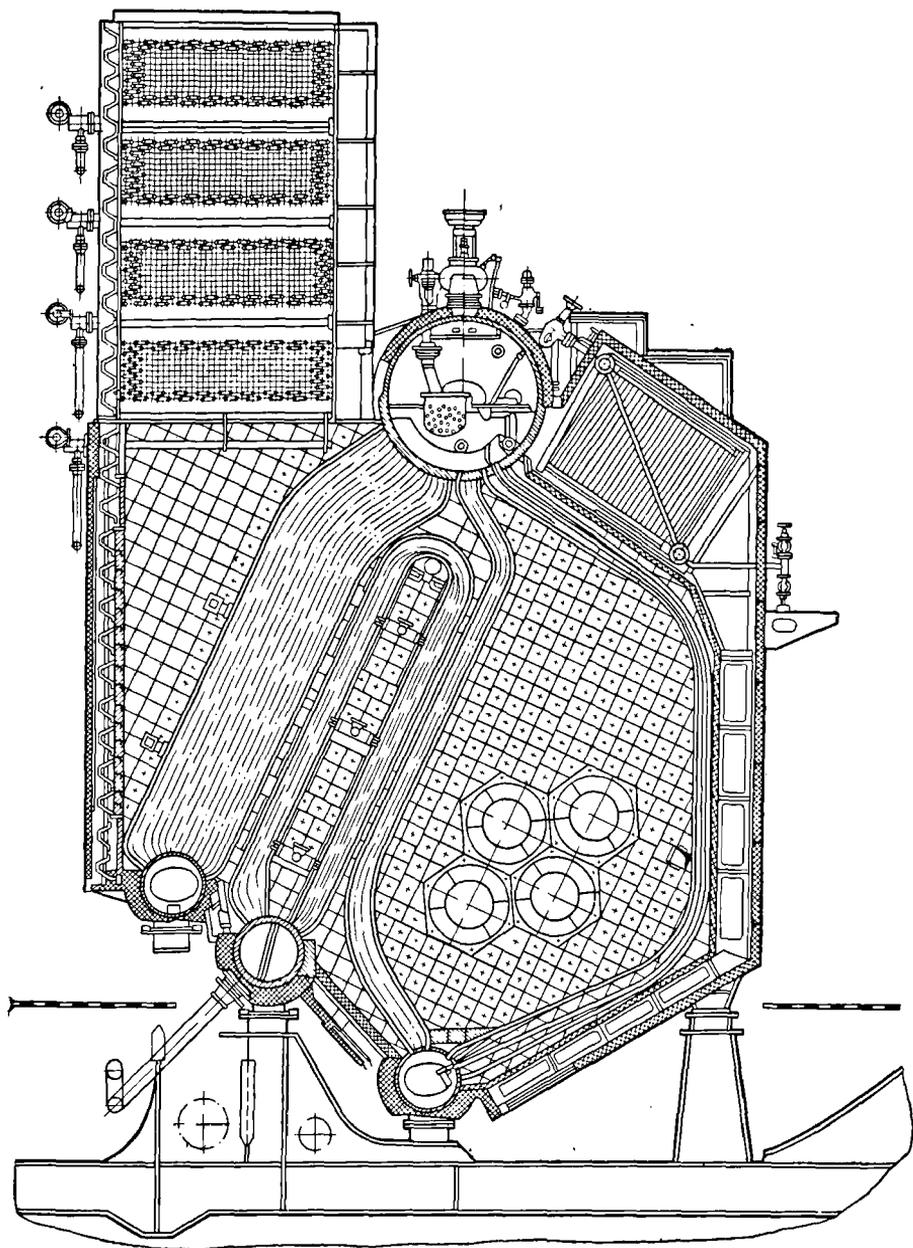


Рис. 26. Котел КВГ-34К (поперечное сечение)

На котлах первых выпусков было установлено недостаточное количество сажеобдувочных устройств, что приводило к повышенному загрязнению поверхностей нагрева и снижению эксплуатационного значения к. п. д. котла.

Внутрибарабанные устройства котлов КВГ не обеспечивали достаточной сепарации от влаги и солей, что вызывало значительный унос солей в пароперегреватель с выходом из строя его труб. Задняя стенка котла не экранирована: для ее футеровки необходимо применять высококачественные огнеупоры.

На судах более поздней постройки недостатки этих котлов были частично устранены.

На отечественных танкерах серии «София» установлены модернизированные котлы КВГ-34К (рис. 26). В них сохранены общие котлам этого типа конструкция и параметры пара, но введены некоторые усовершенствования.

Экономайзер котла для улучшения его обдувки разделен на четыре секции, между которыми установлены сажеобдуватели. Размеры пазухи внутри пароперегревателя значительно увеличены, что облегчает доступ к его петлям и позволяет установить внутри петель сажеобдуватели. В котлах установлены вместо механических паромеханические форсунки большой производительности, в результате чего количество топочных устройств и форсунок уменьшилось до четырех, а система регулирования горения значительно упростилась. Температура пара не регулируется, поэтому из пароводяного коллектора удален громоздкий пароохладитель.

Рассмотренные однопроточные четырех- и трехбарабанные котлы имеют достаточно высокие экономические и вполне приемлемые для морского судна характеристики массы, однако компоновка поверхностей нагрева не обеспечивает в полной мере требований эксплуатации.

При обслуживании котла важно иметь удобный доступ к любой поверхности нагрева и минимальное количество лазов, лючков и других затворов, требующих специальных прокладок и дополнительного внимания со стороны обслуживающего персонала. Котлоагрегат должен легко помещаться в котельном отделении, а компоновка его должна предусматривать преимущественное обслуживание всех элементов с фронта котла, где несет вахту обслуживающий персонал и имеется необходимое пространство для наблюдения или ремонта.

Таким условиям более полно удовлетворяют двухбарабанные вертикальные однопроточные котлы, за последние годы широко распространенные на судах морского флота. Конструкция котлов дает возможность удобной компоновки пароперегревателя и хвостовых поверхностей нагрева.

На рис. 27 представлена схема такого котла, установленного на серийных судах типа «Сергей Боткин». Паропроизводительность котла составляет 13 т/ч при параметрах пара 32/400. Испарительная поверхность нагрева составляет 440 м², поверхность нагрева экономайзера 160 м².

К недостаткам котлов этого типа можно отнести отсутствие экранов на задней стенке топки, что вызывает необходимость дополнительного ремонта футеровки и снижает эффективность использования радиационного теплообмена.

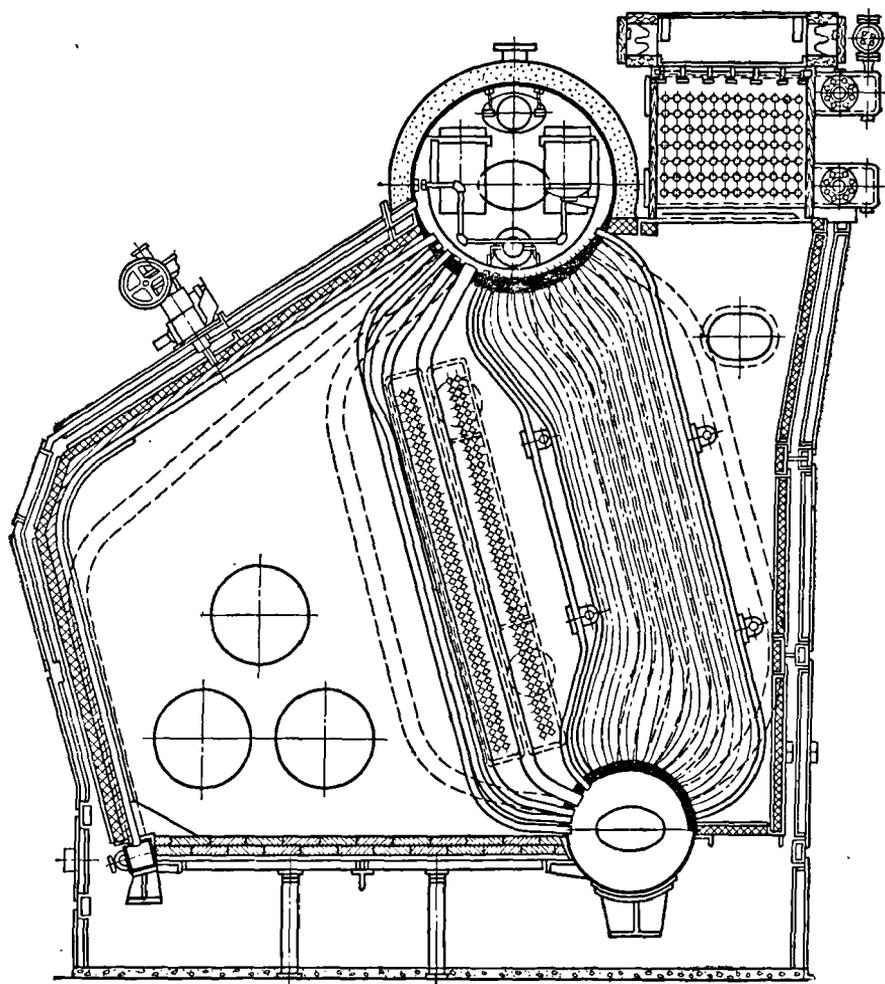


Рис. 27. Двухбарабанный вертикальный однопроходный котел

Более современные котлы такого типа установлены на танкерах «Дружба» (рис. 28) и «Мир».

Оба типа имеют паровые воздухоподогреватели, экономайзеры 6, 8 и пароперегреватели 10. Пароперегреватели укреплены на специальных трубах 11, включенных в контур циркуляции котла. Для защиты креплений петель пароперегревателя трубы первого пучка, расположенные против этих креплений, имеют

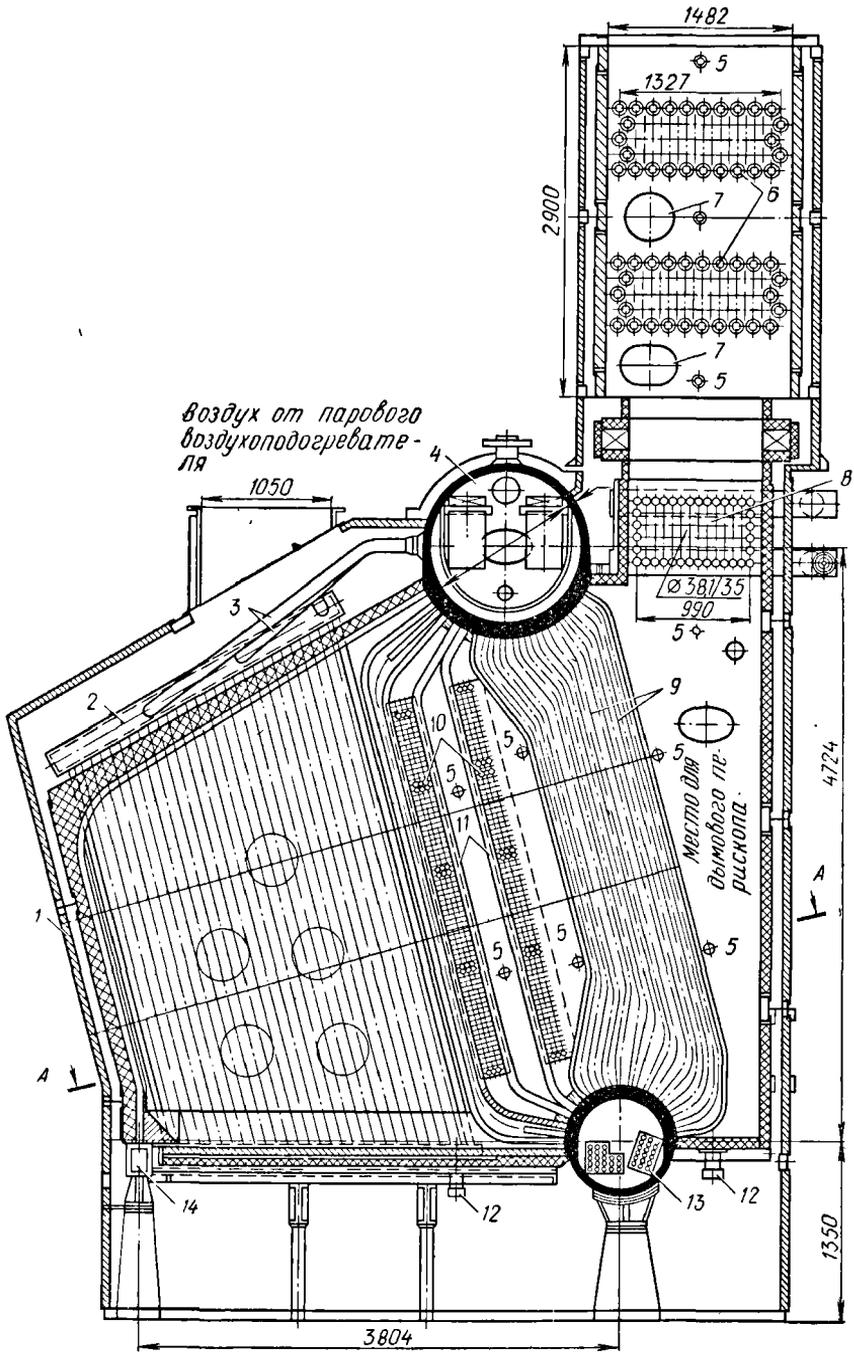


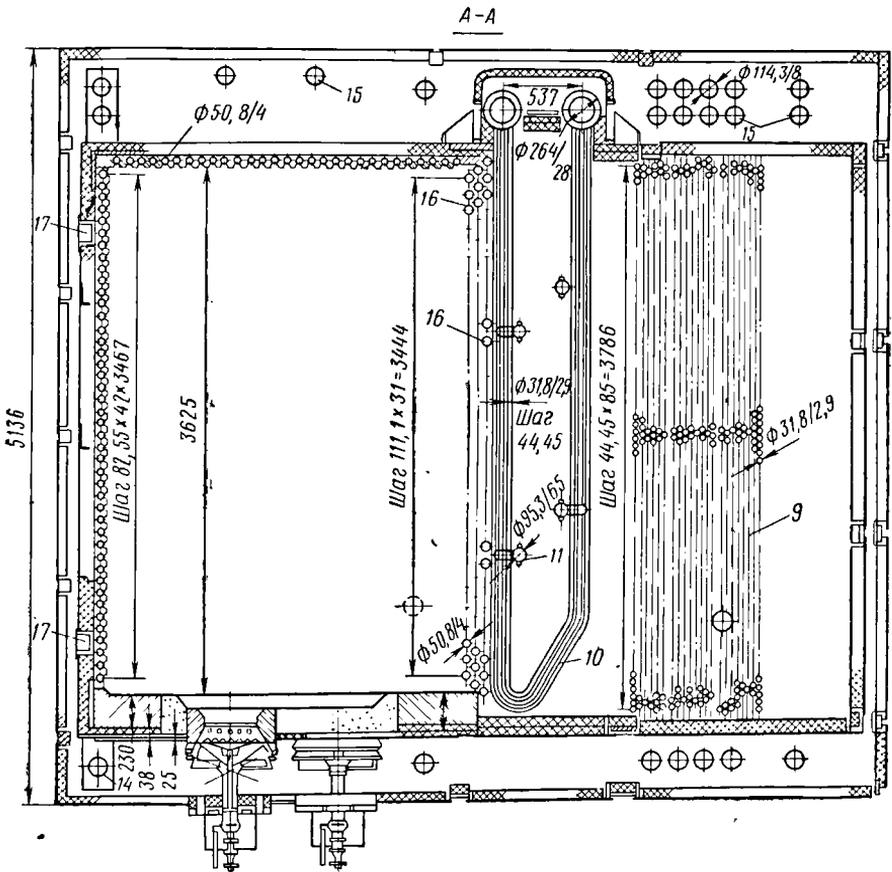
Рис. 28. Котел

огнеупорные перегородки 16. Такая компоновка пароперегревателей удобна для обслуживания и ремонта.

Для повышения надежности циркуляции воды в трубах 9 второго пучка котлы имеют необогреваемые опускные трубы 15, соединяющие пароводяной барабан 4 с водяным 13 и нижним 14 коллекторами топочных экранов. Пароотводящие трубы 3 коллекторов боковых экранов 2 подключены к барабану 4. Таким образом, каждый экран имеет независимый контур циркуляции, что повышает надежность его работы.

Нагретый воздух поступает к топочным устройствам под наружным кожухом 1.

Для облегчения обслуживания котла, наблюдения за состоянием его элементов и топки установлено значительное количество (17 на котле парохода «Дружба» и 12 на котле парохода «Мир») сажеобдувочных автоматизированных устройств 5; имеются смотровые окна 17 и горловины 7.



парохода „Дружба“

Для спуска воды при обмывке труб предусмотрены отверстия 12, закрываемые пробками.

Водяные коллекторы котлов имеют увеличенные диаметры (по сравнению с принятыми), что упрощает работы в них. Отчасти это объясняется установкой в коллекторе пароохладителя для регулирования температуры перегретого пара (на котле парохода «Дружба»).

Основные характеристики котлов представлены в табл. 4, из которой видно, что котлы парохода «Дружба» являются более легкими, но и более напряженными по сравнению с котлами парохода «Мир». Увеличение массы последних объясняется также большей поверхностью нагрева экономайзера, что затрудняет установку газовых воздухоподогревателей.

Таблица 4

Характеристики	Характеристики котлов пароходов	
	„Дружба“	„Мир“
Паропроизводительность нормальная (максимальная), т/ч	32,2 (45,5)	29,5 (39)
Давление пара в барабане котла и за пароперегревателем, кгс/см ²	45,5/42,5	45/42,2
Температура перегретого пара, °С	454	454
К. п. д., %	92,5	92,5
Расход топлива при $Q_H^P = 9700$ ккал/кг при нормальной нагрузке, кг/ч	2400	Около 2200
Температура, °С:		
питательной воды	120	120
подогретого воздуха	130	110
уходящих газов	155	—
Поверхность нагрева, м ² :		
экранов	25,5	44,3
полная испарительная	899,3	557,8
пароперегревателя	126	141
экономайзера	486	823,2
парового воздухоподогревателя	200	—
Число форсунок	5	4
Видимое теплонепряжение топочного объема, ккал/м ³ ·ч	Свыше 750×10 ³	Около 520×10 ³
Масса котлоагрегата с водой (без воды), т	131 (118,4)	150,7 (139,5)

Распространены на судах также вертикальные двухбарабанные так называемые D-образные котлы («Фостер — Уилер»). Поперечный горизонтальный пароперегреватель расположен обычно за вторым — четвертым рядом труб, что позволяет уменьшить его размеры. Экономайзер и воздухоподогреватель помещены в вертикальной шахте.

Рассмотренные двухбарабанные вертикальные однопроточные водотрубные котлы хорошо komponуются в котельном отделении судна. При развитой хвостовой поверхности нагрева таких котлов обеспечивается к. п. д. до 93—93,5%.

Паропроизводительность таких котлов обычно составляет 40—50 т/ч и доходит иногда до 100 т/ч при давлении пара до 100 кгс/см² и температуре 510—525°С. Такие параметры пара признаны наиболее рентабельными для современной паросиловой установки морского судна. Они позволяют использовать для постройки котлов преимущественно обычные перлитные стали.

§ 23. Котельные агрегаты «шахтного» типа

Дальнейшее совершенствование судовых котельных агрегатов связано с общим развитием судовых паросиловых установок. Как известно, главными достоинствами паровой техники являются возможность работы на дешевом топливе (мазуте) и большая агрегатная мощность (в одной турбине).

Мощность силовых установок современных быстроходных танкеров, контейнеровозов и других специализированных судов может составлять десятки тысяч лошадиных сил. Для такой мощности необходимы котельные агрегаты, способные производить пар до 100 т/ч. Обычные однопроточные двухбарабанные котлы с естественной циркуляцией вполне могут справиться с этой задачей (см. § 22).

Однако с развитием мощных установок специализированных судов приходится считаться также и со свойственными паровой технике недостатками. Паросиловая установка потребляет по массе и по объему бункера больше топлива, чем дизельная, что приводит к так называемому дефициту грузоподъемности. Современный танкер с дизельной установкой принимает больше груза, чем паровой с установкой той же мощности.

Для уменьшения расхода топлива на современных паровых судах применяют высокие параметры пара и промежуточный перегрев в котлах пара, частично уже отдавшего свою энергию в ступенях высокого давления главной турбины. После промежуточного перегрева пар возвращается в ступени низкого давления той же турбины.

Для повышения экономичности паросиловых установок (повышения параметров пара) конструкция обычного однопроточного двухбарабанного котла уже малоприменяема и должна быть изменена.

Недостатком паровой техники на судах до сих пор были также большие затраты времени на обслуживание и ремонт. Причина этого частично заключалась в меньшей надежности котельных агрегатов. До недавнего времени все классификационные организации требовали установки на судне по меньшей мере двух котлов. Велики были также расходы времени и средств на чистку котлов.

Очевидно, что для современного специализированного судна надежность автоматизированного оборудования имеет огромное значение, так как при коротких стоянках и небольшом экипаже времени и средств на обслуживание и ремонт очень мало. Для повышения надежности также требуются изменения конструкции котла.

Использование опыта постройки и эксплуатации береговых котлов привело к появлению принципиально новых конструкций вертикальных судовых котлов.

Рост параметров пара (давление, кгс/см² и температура, °С) судовых паросиловых установок следующий: 1955 г. — 46/460; 1965 — 70/510; 1980 г. (оρίζается) — 100/580.

Из табл. 5 видно, что при повышении параметров пара доля тепла на парообразование (r) уменьшается, а доля тепла жидкости (i') и тепла перегрева ($i - i''$) растет. Соответственно уменьшается относительная роль испарительной (парообразующей) поверхности нагрева котла и растет значение предварительного подогрева питательной воды и воздуха; увеличивается также значение поверхности нагрева пароперегревателя.

Таблица 5

Давление, температура пара и его энтальпия	i'		r		$i - i''$	
	ккал/кг	%	ккал/кг	%	ккал/кг	%
40 кгс/см ² ; 450° С; 795,4 ккал/кг	258,4	32,5	410,6	51,5	126,4	16
60 кгс/см ² ; 500° С; 817,5 ккал/кг	288,3	35,5	377,1	46	152,1	18,5
80 кгс/см ² ; 550° С; 841,1 ккал/кг	312,8	37	346,5	41	181,8	22
100 кгс/см ² ; 600° С; 865,3 ккал/кг	334,2	38,5	317,5	36,5	213,6	25

Примечание: i — энтальпия пара рабочих параметров;
 i' — энтальпия воды при температуре насыщения;
 i'' — энтальпия насыщенного пара при рабочем давлении;
 r — количество тепла на парообразование.

Вследствие уменьшения перепада температур Δt между газами и стенкой, температура которой при росте параметров повышается, количество тепла, передаваемого воде, пароводяной смеси и пару, уменьшается, растет температура уходящих газов и снижается к. п. д. котла. Для большей утилизации тепла уходящих газов необходимо увеличивать размеры конвективных хвостовых поверхностей нагрева и, в частности, воздухоподогревателя.

Сокращение парообразующей поверхности нагрева позволяет разместить ее полностью в топке и заменить экранами конвективные испарительные пучки.

Опыт эксплуатации показал также некоторые затруднения, связанные с повышением параметров и тепловых напряжений в однопроточных вертикальных котлах обычных типов. Например, повышение температуры пара и тепловых напряжений металла отражается на надежности и сроке службы пароперегревателей (коррозия и перегрев стали).

Внедрение более дешевых высоковязких сортов топлива приводит к увеличению заноса высокотемпературных участков поверхности нагрева трудноудаляемыми отложениями золы и сажи. С другой стороны наличие серы в топливе вызывает усиленную так называемую низкотемпературную коррозию (действие серной кислоты) металла хвостовых поверхностей нагрева. При повышении температуры и тепловых напряжений металла усиливается также его кислородная коррозия со стороны воды. Борьба с этими недостатками продолжалась в течение 50-х годов и также способствовала изменению конструкции котлов.

Новейшие принципы конструирования морских котельных агрегатов следующие.

Котельный агрегат (рис. 29) имеет вид буквы U и состоит из двух вертикальных шахт. В шахте 2, окруженной экранами, происходит горение топлива. Топочные устройства расположены в верхней части топочной шахты — потолочные форсунки 1. Продукты сгорания двигаются вниз, проходят через окно, в котором расположен небольшой пучок труб — фестон 3, и поднимаются вверх по шахте 4, в которой расположены трубные конвективные поверхности нагрева — пароперегреватель 5, экономайзер 6 и воздухоподогреватель 7.

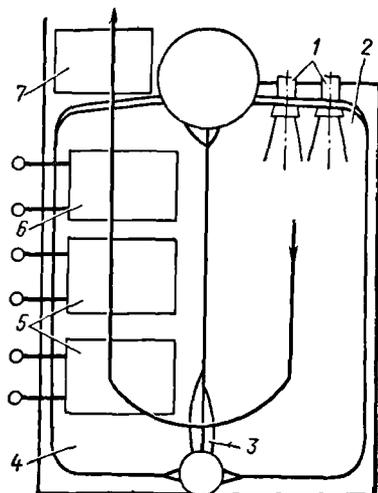


Рис. 29. Схема U-образного агрегата

Такая компоновка газоходов улучшает доступность котла для осмотра и обслуживания и позволяет собирать его из блоков, подвозимых к месту постройки судна. Потолочное расположение форсунок удлиняет факел и улучшает распределение газового потока по сечению топки. Это обстоятельство, вместе с применением паромеханического распыла, дает возможность уменьшить число форсунок, вести горение с низкими избытками воздуха и снизить загрязнение поверхности нагрева отложениями (что снижает величину потери с уходящими газами и уменьшает количество отложений на поверхности нагрева и коррозию металла).

Уменьшению отложений, кроме того, способствует секционная конструкция конвективных поверхностей нагрева (пароперегревателей, водяных экономайзеров и воздухоподогревателей) с размещением между секциями в пазухах газоходов большего числа сажеобдувщиков. Для этой же цели применяют увеличенные (до 100 мм) шаги труб и иногда коридорное их расположение.

Преимущества, связанные с некоторым увеличением коэффициента теплоотдачи α_c , при шахматном расположении труб

в эксплуатации часто не удается реализовать вследствие того, что при таком расположении трубы сильнее заносятся сажей и золой.

Для увеличения надежности котла также несколько снижают тепловое напряжение Q объема топки ($Q/V_T=0,5\div 0,6$ мккал/м³·ч против 0,8—1 у обычных однопроточных котлов). Связанное с этим и с некоторыми другими конструктивными изменениями (для улучшения доступа к поверхности нагрева) увеличение габарита и массы котла не играет для современных крупнотоннажных пароходов значительной роли.

В низкотемпературных элементах поверхности нагрева для улучшения теплоотдачи от газов к стенке применяют ребра на трубах экономайзера и 2—3 хода не только с воздушной, но и с газовой стороны воздухоподогревателя.

Особо следует остановиться на помещении пароперегревателя в отдельном газоходе за радиационной поверхностью. При этом поверхность нагрева пароперегревателя может быть увеличена, очистка и ремонт облегчены. Стоимость котла также уменьшается, так как из дорогой легированной (например, хромомолибденовой) стали изготавливают только трубы высокотемпературной секции пароперегревателя (наиболее уязвимой для износа части котла).

Для увеличения надежности и упрощения обслуживания котла также ликвидируют кирпичную обмуровку в полностью экранированной топке, помещают коллекторы вне газоходов, изгибают трубы высокочастотным нагревом, приваривают опускные трубы, применяют жароупорное стекло или защитные покрытия для труб воздухоподогревателей и т. п.

Новые конструкции котлов повышенной надежности позволяют перейти на так называемую полуторакотельную установку, имеющую в своем составе один главный и один вспомогательный котлы. Насыщенный пар, производимый вспомогательным котлом, используется для подогрева жидкого груза в танках, подогрева воды при мойке танков, для работы грузовых и зачистных насосов и т. п.

Стоимость постройки полуторакотельной установки меньше главным образом вследствие того, что она не нуждается в запасе паропроизводительности, который у обычной двухкотельной установки может достигать 30%. В случае необходимости запас пара обеспечивает вспомогательный котел.

Размеры машинно-котельного отделения (МКО) судна уменьшаются, а масса судовой силовой установки (ССУ) снижается приблизительно на 15%. Число отказов у полуторакотельной установки и затраты труда на обслуживание уменьшаются. Вспомогательный котел обычно рассчитывают таким образом, чтобы в случае выхода из строя главного котла обеспечить судну достаточную для управляемости скорость хода 7—8 узлов.

Ниже приводятся данные по котлам проекта 1551.

Котельная установка танкера «Крым» состоит из одного главного и одного вспомогательного котлов. Главный котел КВГ-80 шахтного типа с потолочным отоплением рассчитан на полную неограниченную по времени паропроизводительность до 90 т/ч

с параметрами пара 80 кгс/см^2 и температурой 515°C . Главный котел снабжает ССУ паром на ходовом режиме. Вспомогательный котел КВ 35/25 обычного вертикального типа с боковым отоплением рассчитан на паропроизводительность до 35 т/ч насыщенного пара. Он предназначен для покрытия увеличения расходов пара на обогрев груза, пропаривания и мойки танков на ходу и потребностей на стоянке без грузовых операций. На паре вспомогательного котла может работать и главная турбина в случае выхода из строя главного котла.

У котла КВГ-80 (рис. 30) топка 8 обслуживается четырьмя работающими на мазуте М-40 паромеханическими форсунками 7. Автоматическое регулирование горения рассчитано на диапазон паропроизводительности $10\text{—}90 \text{ т/ч}$. На режиме грузовых операций работают две форсунки. В экстренных случаях возможно снижение нагрузки до 5 т/ч с принудительным отключением одной из двух работающих форсунок.

Пар для паромеханических форсунок поступает с давлением на минимальной нагрузке $1\text{—}1,5 \text{ кгс/см}^2$. Давление топлива составляет $1\text{—}1,5 \text{ кгс/см}^2$ на нагрузке 5 т/ч и доходит до 22 кгс/см^2 на полной нагрузке объема топки. Напряжение топочного объема на нормальной нагрузке составляет до $670 \times 10^3 \text{ ккал/м}^3$. Коэффициент избытка воздуха предположен $\alpha = 1,05$.

Топка полностью экранирована и отделена от конвективного газохода 2 глухим экраном 9 из плотно сдвинутых гладких труб. Трубы фронтных экранов приварены к коллекторам. В конвективной шахте расположены две секции основного пароперегревателя 10, промежуточный пароперегреватель 11 и водяной экономайзер 12. Испарительная поверхность нагрева равна 658 м^2 , поверхность нагрева основного пароперегревателя — 662 м^2 , водяного экономайзера — 1010 м^2 . Промежуточный пароперегреватель состоит из трех пакетов труб с пазухами для сажеобдувки.

Воздухоподогреватель 4 имеет поверхность нагрева 3570 м^2 . Газы проходят внутри труб. Воздухоподогреватель по газам — трехходовой, по воздуху — одноходовой. Трубы третьего хода (с наиболее низкой температурой газов) защищены от низкотемпературной коррозии с газовой стороны фторопластовым покрытием. В качестве резервной защиты от коррозии на малых нагрузках с низкими температурами газов предусмотрен предварительный подогрев воздуха питательной водой в предвключенном воздухоподогревателе 3.

Котел имеет три независимых контура циркуляции. Два из них — фронтные экраны; третий контур — боковые и средние экраны. Все опускаемые трубы на сварке.

Масса сухого котла с автоматикой равна 205 т , масса воздухоподогревателя — $64,8 \text{ т}$, масса воды (включая экономайзер) — 15 т . Полная масса котла 284 т . Масса на 1 кг пара в час при 90 т паропроизводительности составляет $3,15 \text{ кг/кг}$. Давление пара за стопорным клапаном равно 80 кгс/см^2 , а температура $515 \pm 5^\circ \text{C}$. Котел снабжен вспомогательным парохладителем 5.

Температура уходящих газов должна составлять около 110°C , что соответствует к.п.д. $96\pm 1\%$. Количество пара, проходящего через промежуточный пароперегреватель, равно 65 т/ч. Давление

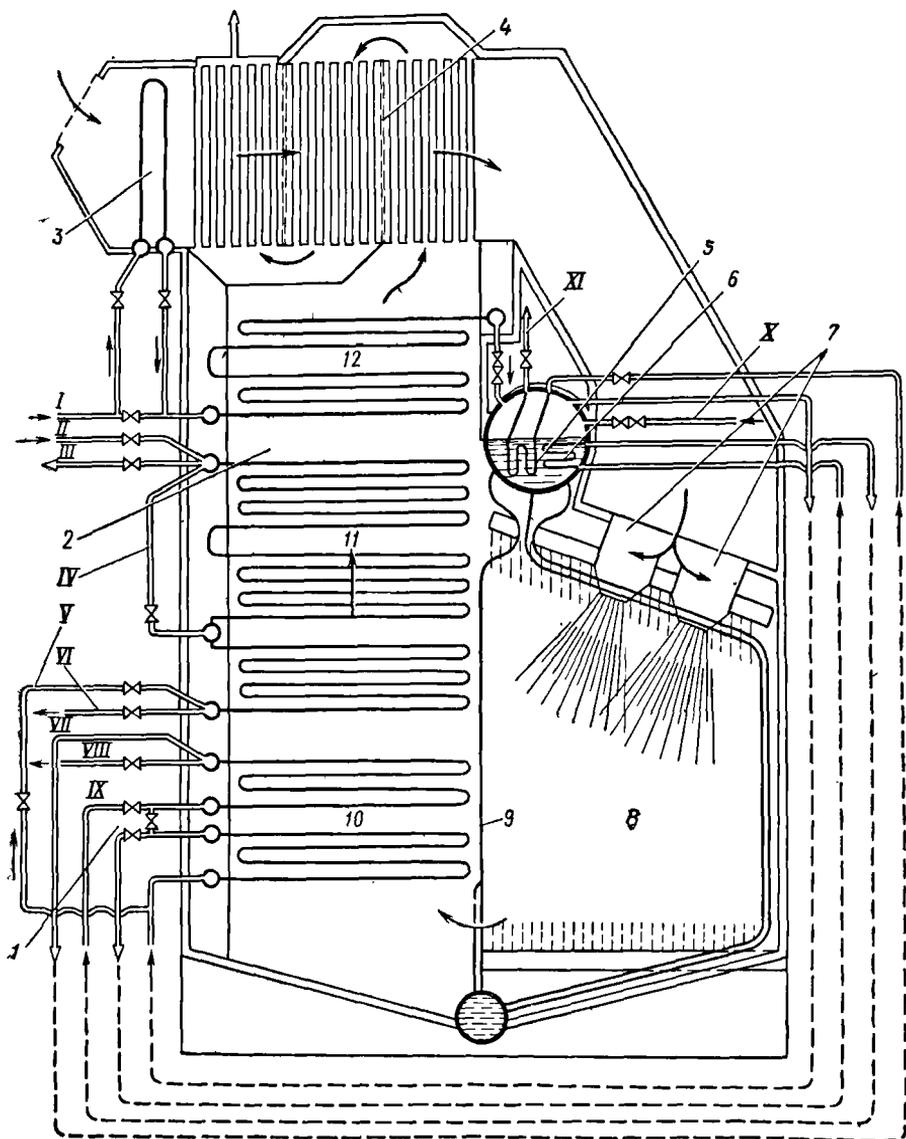


Рис. 30. Схема котла КВГ-80

пара на входе в промежуточный пароперегреватель равно $15,5 \text{ кгс/см}^2$, а температура 315°C . В промежуточном пароперегревателе температура пара повышается до начальной 515°C .

Температуру главного пара регулируют вручную на месте *I* или из ЦПУ изменением количества перегретого пара, проходящего через главный парохладитель *б*. Этот парохладитель включают между первой и второй секциями главного пароперегревателя. Температура горячего воздуха, поступающего в топку, составляет 217°C , сопротивление газовоздушного тракта около 550 мм вод ст. Температура питательной воды перед экономайзером 223°C .

Обшивка котла предусмотрена однослойная без воздушной рубашки. Изоляцию нижней части газохода выполняют огнеупорным кирпичом и изоляционным картоном, а верхней части — картоном.

Римскими цифрами на рисунке обозначены трубопроводы: *I* — питательной воды; *II* — вторичного пара из ГТЗА; *III* — в систему охлажденного пара; *IV* — регулирования вторичного пара; *V* — защиты промежуточного пароперегревателя; *VI* — вторичного пара в ГТЗА; *VII* — на вспомогательный парохладитель; *VIII* — основного пара в ГТЗА; *IX* — регулирования основного пара; *X* — холодной питательной воды; *XI* — охлажденного пара.

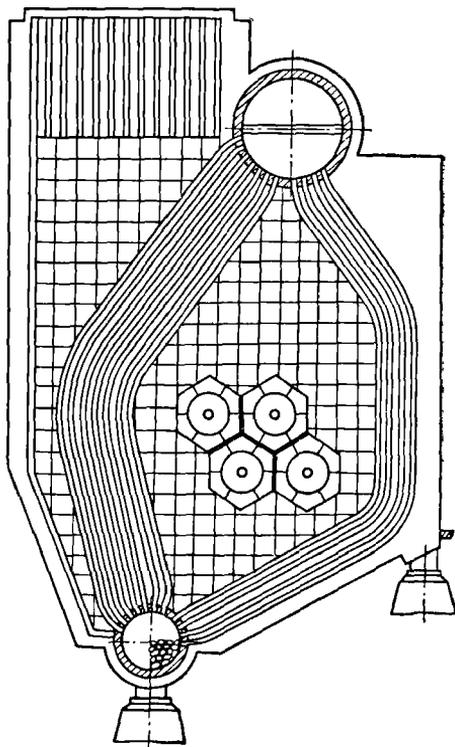


Рис. 31. Вспомогательный котел парохода „Крым“

В установке проекта 1551 предусмотрен также вспомогательный котел КВ 25/35 обычного вертикального типа с четырьмя боковыми паромеханическими форсунками (рис. 31). Паропроезводительность 3—35 т/ч (на двух форсунках), с расходом топлива соответственно 220—2640 кг/ч. Пароперегревателя и водяного экономайзера котел не имеет, но снабжен воздухоподогревателем. У котла один контур циркуляции с одним рядом экрана и 16 конвективными рядами труб. Поверхность нагрева воздухоподогревателя составляет 430 м^2 .

В пароводяном коллекторе вспомогательного котла помещен змеевик подогрева воды для возможности быстрого ввода котла в действие в аварийных случаях.

На некоторых паровых судах применяют так называемые высоконапорные парогенераторы, схема работы которых показана на рис. 32.

Компрессор *1*, вращаемый газовой турбиной *4*, берет воздух из атмосферы с давлением p_1 и температурой T_1 и подает его

в топку 2 с давлением p_2 . В процессе сжатия температура воздуха повышается до T_2 . Давление p_T в топке составляет около 3 кгс/см², а температура газов перед газовой турбиной — около 500° С.

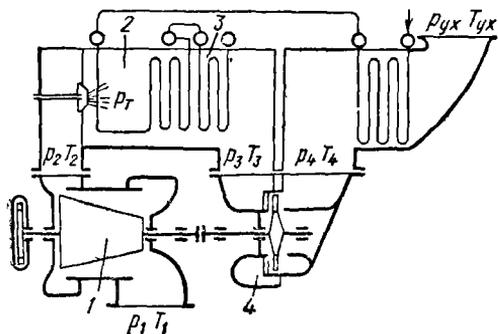


Рис. 32. Схема работы высоконапорного пароперегревателя

В результате увеличения давления увеличивается количество подаваемого в топку воздуха, что дает возможность увеличить тепловое напряжение топочного объема в десятки раз (против топок обычных котлов) без увеличения топочных потерь.

Горячие газы, омывая поверхность нагрева 3, отдают ей значительно больше тепла вследствие увеличения коэффициента теплоотдачи α_1 от газов к стенкам. Это увеличение достигается увеличением плотности газов и массовой скорости их движения w . После этого газы, охладившись до температуры T_3 , поступают в газовую турбину с давлением p_3 . Массовая скорость и коэффициент теплоотдачи увеличиваются примерно в 10 раз по сравнению с обычными водотрубными котлами. Из турбины газы с температурой T_4 и давлением p_4 поступают в водяной экономайзер и покидают последний с температурой $T_{ух}$ и давлением $p_{ух}$.

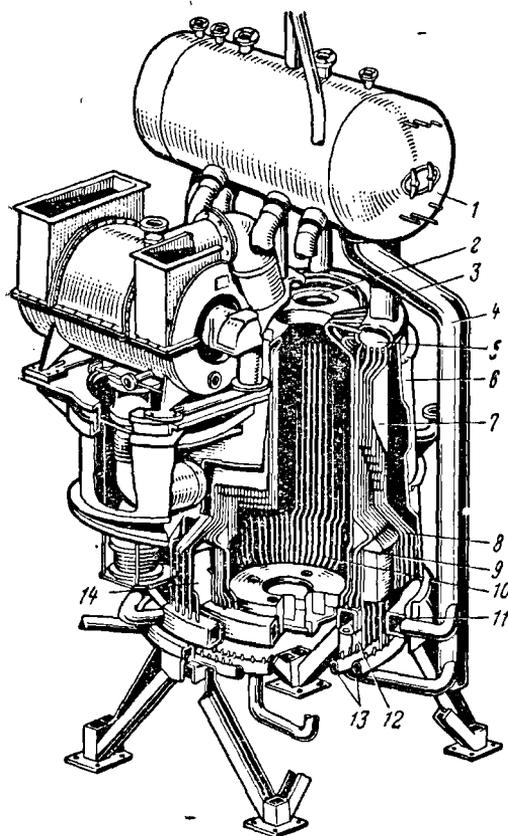


Рис. 33. Высоконапорный парогенератор

Роль турбокомпрессора в схеме высоконапорного парогенератора аналогична роли воздухоподогревателя в обычном котле. Тепло покидающих поверхность нагрева газов частично используется для подогрева воздуха и повышения температуры газов в топке и на поверхности нагрева.

На рис. 33 показана конструкция одного из высоконапорных парогенераторов.

Позиции на рисунке означают: 1 — паровой коллектор; 2 — фурма формунки; 3 и 4 — подъемная и опускная трубы; 5 — верхний сборный тороидальный коллектор; 6 — наружный кожух котла; 7 — отражательный щит; 8 и 9 — конвективный и экранный пучки труб; 10 — топка котла; 11 и 12 — коллекторы конвективного и экранного пучков; 13 — коллекторы пароперегревателя; 14 — змеевики пароперегревателя.

Экранные трубы, образующие цилиндрическую топку, внизу переходят в конвективный шахматный пучок.

Достоинствами высоконапорных генераторов являются малые габариты и масса (примерно в 4—5 раз меньше, чем у водотрубных котлов) и высокие маневренные качества. Пуск требует до 15 мин, вывод на полную нагрузку — около 20 с (при обязательном наличии добавочного пускового двигателя компрессора, кроме газовой турбины). К. п. д. таких парогенераторов не выше, чем у современных водотрубных котлов обычного типа.

Вследствие сложности конструкции и обслуживания, наличия шума и необходимости дорогих сортов топлива высоконапорные генераторы на торговом флоте распространения не получили.

§ 24. Вспомогательные и утилизационные котлы с естественной циркуляцией

На морских пароходах вспомогательные котлы до сих пор устанавливали редко. Обычно они вырабатывали насыщенный пар пониженного избыточного давления (5—10 кгс/см²), применявшийся для работы вспомогательных механизмов и бытовых нужд.

Эксплуатация на судне котлов разных типов с различными параметрами пара неудобна. Поэтому пар, необходимый для работы вспомогательных механизмов и хозяйственно-бытовых нужд, чаще отбирают от главных котлов через устройство, снижающее его параметры. На стоянке один из главных котлов работает с пониженными параметрами пара. Однако на новейших судах с так называемой «полуторакотельной установкой» вспомогательные котлы снова находят применение (см. § 23).

На теплоходах, особенно пассажирских, и танкерах установка вспомогательного котла (или котлов) неизбежна. Пар низких параметров нужен для различных паровых насосов, обогрева жидкого груза, парового отопления, опреснения воды, для работы бань, прачечных, камбуза.

Если потребности в паре низких параметров превышают 2—3 т/ч, то в качестве вспомогательного устанавливают небольшой огнетрубный или водотрубный котел. Например, на серийных танкерах типа «Казбек» установлены котлы К-81, вырабатывающие насыщенный пар (см. рис. 23).

Отработавшие газы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) теплоходов имеют высокую температуру (300—400°). Котлы,

в которых тепло выпускных газов используется для производства пара, получили название утилизац и о н н ы х. Они могут вырабатывать пар только тогда, когда работают главные двигатели. Иногда вспомогательный и утилизац и о н н ы й котлы объединяют в одной конструкции. Такие котлы называются в с п о м о г а т е л ь н о - у т и л и з а ц и о н н ы м и.

Количество различных типов вспомогательных, утилизац и о н н ы х и вспомогательно-утилизац и о н н ы х котлов в настоящее время исчисляется десятками. Среди них насчитывается немало вертикальных и горизонтальных огнетрубных котлов, преимущество которых является компактность и простота ухода.

На многих судах отечественного и зарубежного флота применяют двухбарабанные и однобарабанные водотрубные однопроходные котлы, сходные с главными. Такие котлы с достаточно высокой паропроизводительностью (20 т/ч и более), устанавливаемые на крупнотоннажных дизельных танкерах, имеют сложные схемы утилизации тепла.

На рис. 34 показан огнетрубный вертикальный котел типа «Кохран». Такие котлы используют в качестве вспомогательных утилизац и о н н ы х и комбинированных.

Для мазутного отопления служит установленная в отверстии 4 форсунка; топочные газы выходят через патрубок 3. При работе котла в качестве утилизац и о н н ы х (или комбинированного) выпускные газы дизеля входят в дымогарные трубы котла по патрубок у 1 и выходят в патрубок 2.

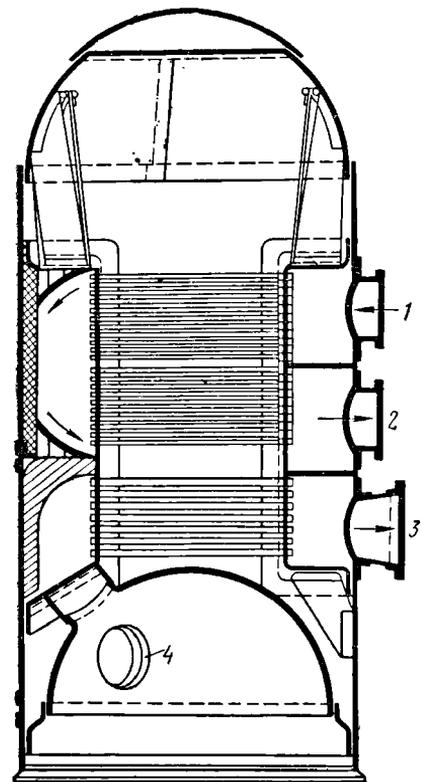


Рис. 34. Вспомогательный котел типа «Кохран»

Котлы этого типа обладают теми же достоинствами (большая аккумуляция) и недостатками (большая масса и низкая экономичность), что и главные огнетрубные котлы. У нас они установлены на теплоходах типа «Станиславский»; особенно широко их применяют на английских судах.

Некоторые фирмы изготовляют огнетрубные вспомогательные котлы в блоках, в которые, кроме котла с топочным устройством, входят вентилятор дутья, питательный насос, водяной экономайзер и средства автоматического управления.

На рис. 35 показан вертикальный водотрубный цилиндрический вспомогательный котел типа VX (ПНР), установленный на лесовозах польской постройки и учебно-производственных судах серии «Профессор Аничков».

Позиции на рисунке означают: 1 — трубный пучок; 2, 4 — соответственно паровое и водяное пространства; 5 — топочная камера; 3 — дымовая коробка; 6 — топочный агрегат «Монарх».

Выходящие вверх из сферо-конической топки газы омывают вертикальные испарительные трубы и выходят в дымоход.

Следует обратить внимание на то, что верхний коллектор котла свободно укреплен на трубах, что уменьшает опасность течи в вальцованных соединениях с трубными досками при термических удлинениях труб.

При работе такого котла с автоматизированным топочным устройством «Монарх» (см. рис. 13) паропроизводительность достигает 1800 кг/ч (максимальная 2400 кг/ч) при давлении пара 7 кгс/см²; к. п. д. 72—75% (при температуре питательной воды 70—90°С). Низкое значение к. п. д. объясняется отсутствием хвостовых поверхностей нагрева.

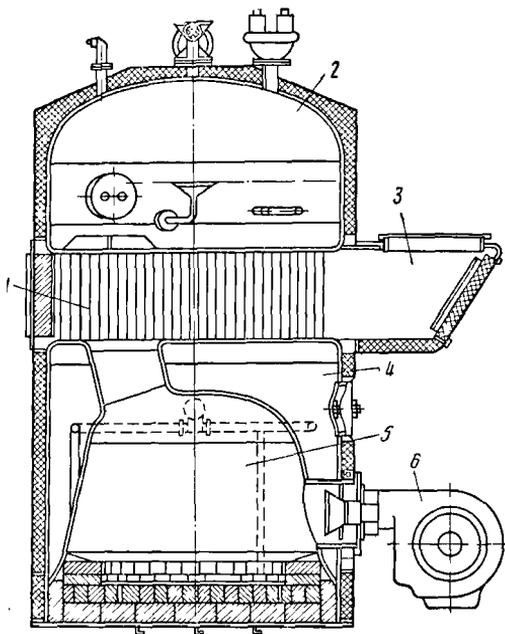


Рис. 35. Вспомогательный котел типа VX

На многих современных вспомогательных котлах для повышения их экономичности устанавливают воздухоподогреватели и водяные экономайзеры.

В последнее время на теплоходах и газотурбоходах отечественной постройки устанавливают вспомогательные водотрубные автоматизированные котлы (КВВА) (двухбарабанные однопроточные нормализованного ряда) с паропроизводительностью 1—12 т/ч, давлением пара 5—28 кгс/см² и температурой пара (при наличии пароперегревателя) до 345°С. Эти котлы оборудованы автоматикой горения и питания.

На рис. 36 показан вспомогательный вертикальный двухбарабанный котел типа КВВА 1,5/5. Паропроизводительность котла составляет около 1500 кг/ч при рабочем давлении пара 5 кгс/см². К. п. д. котла не превышает 80% из-за отсутствия воздухоподогревателя и водяного экономайзера. В газоходе котла имеется змеевик для подсушки пара. Котел отапливается одной паромеханической форсункой.

Более мощный и экономичный вспомогательный двухбарабанный котел производительностью 3,5 т/ч при давлении пара 6 кгс/см² представлен на рис. 37. Такие котлы установлены на теплоходах типа «Михаил Калинин» и других судах.

Котел снабжен двухпроточным (по воздуху) пластинчатым воздухоподогревателем, нагретый воздух от которого поступает к ротационным форсункам — основной 9 и растопочной 8. Некото-

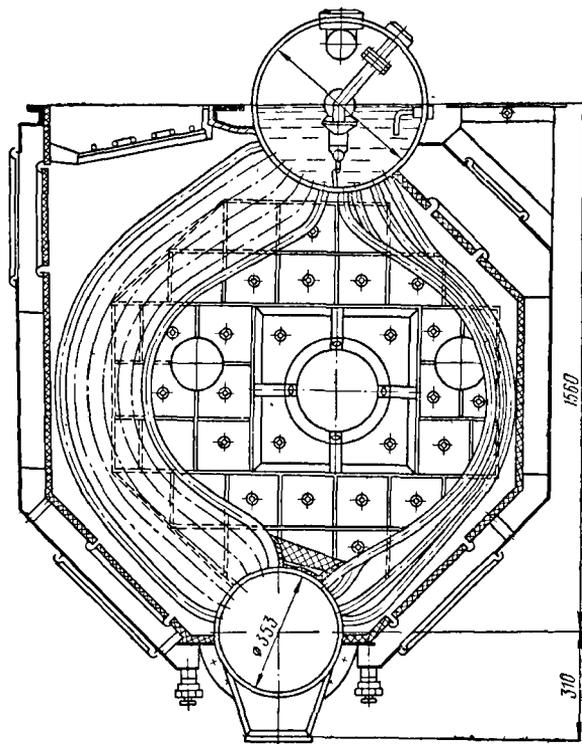


Рис. 36. Вспомогательный котел КВВА 1,5/5

рые из котлов снабжены топочным устройством «Монарх» и не имеют воздухоподогревателей.

После выхода из экранированной топки топочные газы поворачивают на 180° в горизонтальной плоскости и входят в конвективный пучок 12, поперечно омывая его трубы. В передней части этого пучка газы поворачивают на 90° вверх в воздухоподогреватель.

Для повышения надежности циркуляции котел снабжен опускаемыми трубами 14 диаметром 76/4 мм; дополнительно к ним установлены опускаемые трубы диаметром 96/4 мм (по три со стороны передней и задней стенок котла). К. п. д. котла достигает 78% при нормальной нагрузке.

Остальные позиции на рисунке означают: 1 и 4 — коллекторы; 2 — щит опускных труб; 3 и 13 — задний и боковые экраны; 5 — магнитный датчик системы питания; 6 — паросборная труба; 7 — воронка верхнего продувания; 10 — газонаправляющий щит; 11 — трубы и кран нижнего продувания.

Вспомогательный двухбарабанный вертикальный водотрубный котел с пластинчатым воздухоподогревателем и змеевиковым экономайзером, установленный на теплоходах типа «Углеуральск» показан на рис. 38.

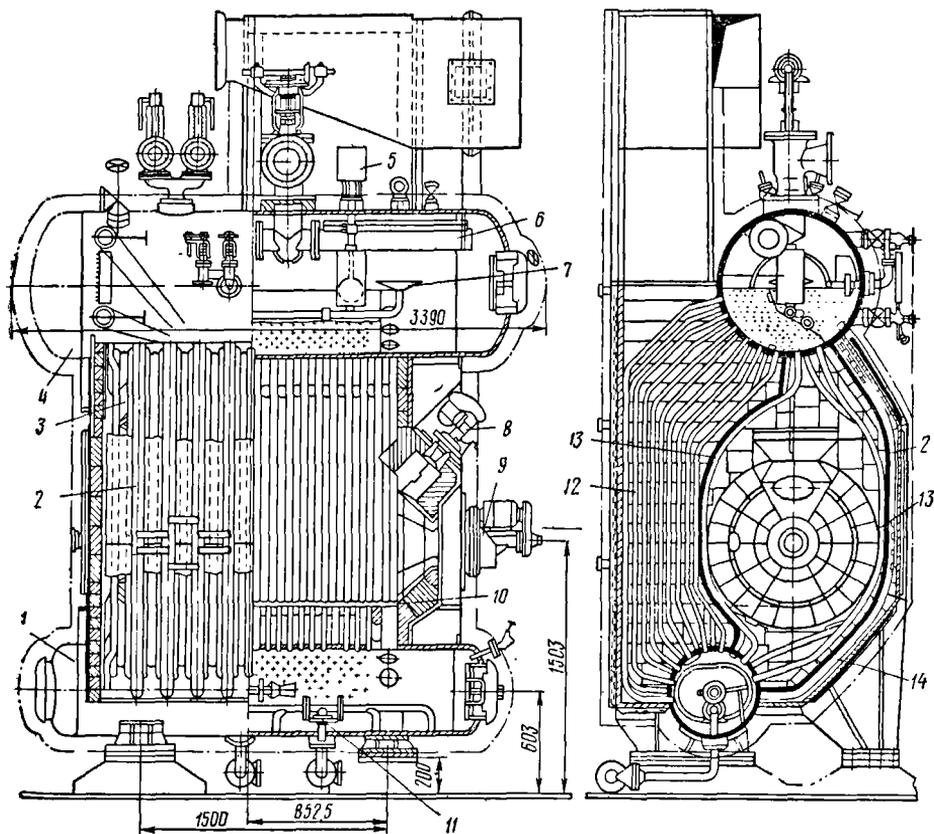


Рис. 37. Вспомогательный котел с воздухоподогревателем

Котел снабжен ротационной форсункой, обеспечивающей относительно низкие величины коэффициента избытка воздуха. Основные показатели работы данного вспомогательного котла приближаются к характеристикам главных водотрубных котлов, что свидетельствует о его высокой экономичности по сравнению с ранее рассмотренными конструкциями. Например, к. п. д. котла составляет 88% при производительности 2500 кг/ч и давлении пара 4 кгс/см².

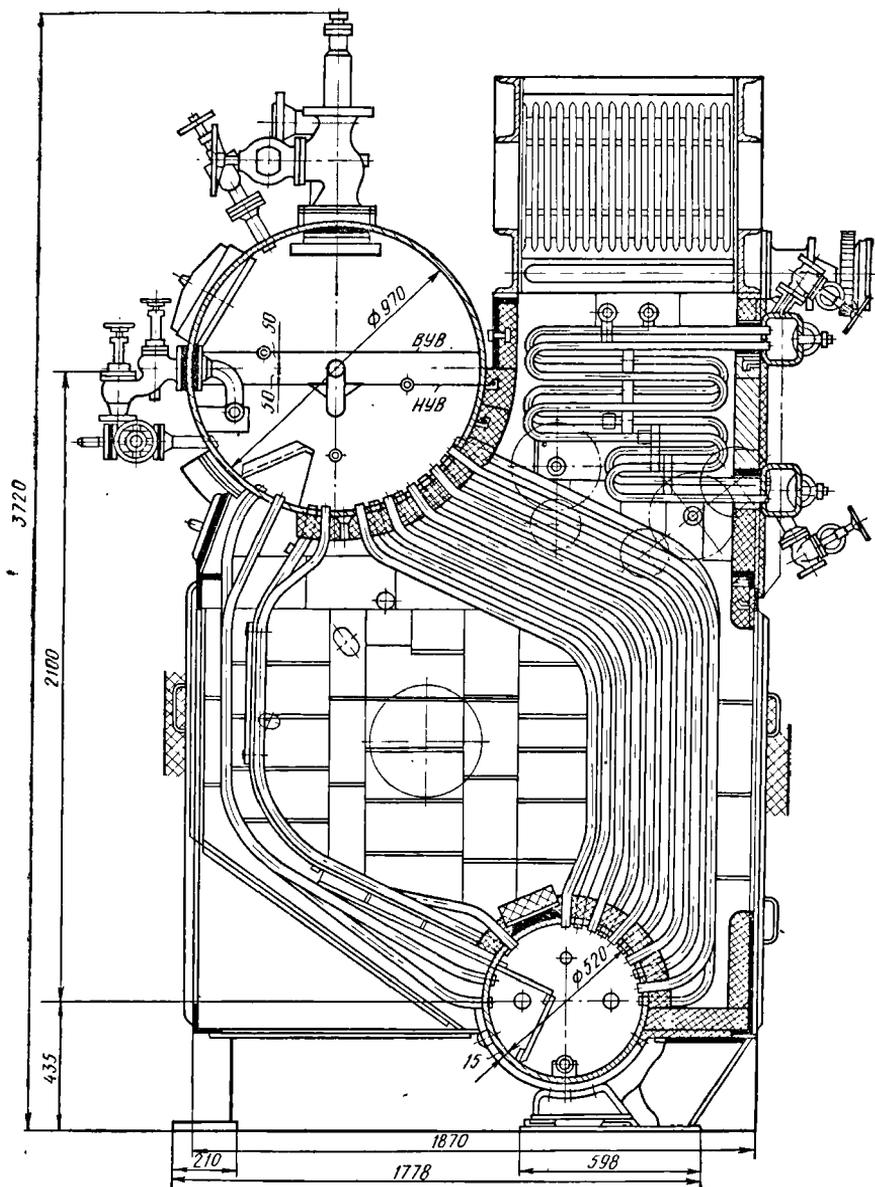


Рис. 38. Вспомогательный котел с водяным экономайзером и воздухоподогревателем

Для поддержания поверхностей нагрева экономайзера и воздухоподогревателя в чистом состоянии котел снабжен сажеобдучными устройствами.

§ 25. Котлы с принудительной циркуляцией

С развитием и усовершенствованием водотрубных котлов все более уменьшаются диаметр водогрейных турб и размеры самих котлов. Применение труб малого диаметра выгодно с точки зрения теплопередачи, но они оказывают большое сопротивление движению воды и пароводяной смеси, т. е. отрицательно влияют на надежность циркуляции; кроме того, очистка труб малого диаметра от накипи и отложений весьма затруднена.

Скорость естественной циркуляции воды в трубах зависит в основном от разности плотности воды и пароводяной смеси, высоты и диаметра испарительных труб. Чем выше давление пара в котле, тем меньше разность между плотностью воды и пара, т. е. надежность циркуляции воды в трубах снижается с увеличением давления пара. Например, при критическом давлении пара (225 кгс/см^2) естественная циркуляция вообще прекращается.

Таким образом, повышение давления пара для котлов с естественной циркуляцией и рост тепловых нагрузок их поверхностей затрудняют надежную циркуляцию воды. Стенки труб только тогда надежно выдерживают давление пара, когда они сохраняют температуру, близкую к температуре воды в них. Это условие соблюдается только при хорошем омывании стенок водой или пароводяной смесью, т. е. при надежной циркуляции воды в трубах котла. Чрезмерно малая скорость циркуляции или застой воды в трубах могут привести к быстрому перегреву их стенок, т. е. к аварии котла.

Эти обстоятельства привели к мысли о создании так называемой принудительной циркуляции воды в трубах. В этом случае надежность работы котла с точки зрения циркуляции уже не будет зависеть от угла наклона, диаметра и тепловой нагрузки труб, давления пара и т. д.

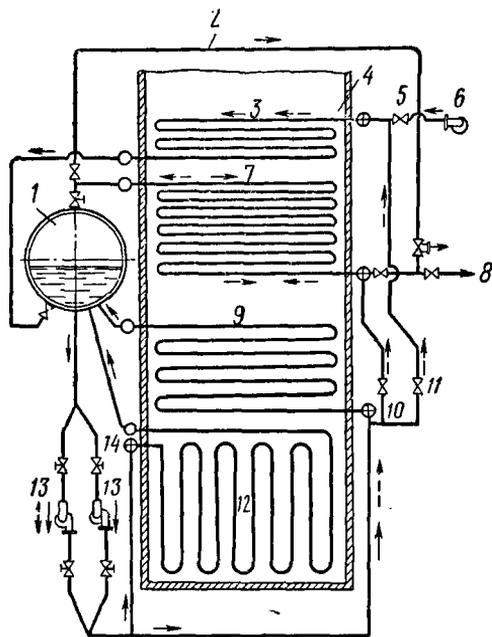
Первые котлы с принудительной циркуляцией появились более полувека назад. Освоение новых конструкций было связано с большими трудностями. Было много аварий из-за несовершенных методов обработки воды, некачественного металла, отсутствия надлежащей системы автоматического регулирования, арматуры и т. д.

Котлы с принудительной циркуляцией можно разделить на два основных типа: прямоточные (т. е. с кратностью циркуляции, равной единице) и с многократной принудительной циркуляцией. Кратностью циркуляции можно назвать количество оборотов по замкнутому контуру, которое должна сделать вода до полного ее испарения в этом контуре.

На морских судах получили некоторое распространение главные котлы системы «Ла Монт» с многократной принудительной циркуляцией (рис. 39).

Сравнительно небольшой пароводяной коллектор 1 вынесен за пределы газохода 4 и служит только для сбора пароводяной смеси и ее сепарации (отделение воды от пара), поэтому он не подвергается действию газов с высокой температурой.

Питательная вода подается в коллектор 1 питательным насосом 6 через экономайзер 3, помещенный в последнем газоходе, в зоне наиболее низкой температуры газов. Особые циркуляционные насосы 13 (один из них резервный) принимают воду из коллектора и подают ее через раздаточный коллектор 14 в параллельно включенные змеевики и 12 топочных экранов и в пакеты змеевиков 9 конвективной поверхности нагрева.



Коллекторы:

- ⊕ — распределяющий
- — сборный

Рис. 39. Схема котла „Ла Монт“

Насыщенный пар, из коллектора 1 поступает в пароперегреватель 7, помещенный в среднем газоходе, и далее в виде перегретого пара по трубопроводу 8 направляется к механизмам (направления потока пара и воды во время работы показаны сплошными, а при пуске — пунктирными стрелками).

При растопке котла во избежание пережога через трубы экономайзера и пароперегревателя циркулирует вода. При этом открывают клапаны 10 и 11 и закрывают клапан 5, предварительно наполнив котел водой до рабочего уровня. Когда давление пара превышает атмосферное, клапаны 10 и 11 переключают и включают пароперегреватель и экономайзер.

Насыщенный пар для хозяйственно-бытовых нужд может отбираться из барабана котла по трубопроводу 2.

Для равномерного распределения воды по параллельно включенным трубам в распределяющих коллекторах предусмотрены дроссельные шайбы или штуцеры. Это позволяет выравнивать расход воды через отдельные трубы и пакеты вне зависимости от их собственного гидравлического сопротивления и приводить его в соответствие с количеством тепла, получаемым трубами.

Кратность циркуляции в котлах «Ла Монт» составляет 6—8, т. е. количество воды, проходящее по контуру котла за 1 ч, в 6—8 раз превышает его часовую паропроизводительность.

Расход энергии на работу циркуляционного насоса определяется напором, необходимым для преодоления гидравлического сопротивления труб, и не превышает 2% теплопроизводительности котла.

Паропроизводительность главных судовых котлов типа «Ла Монт» достигает 45—60 т/ч и более, а параметры пара — до 100 кгс/см² и более при температуре перегретого пара до 500°С. Однако широкого распространения главные котлы не получили из-за высокой стоимости и сложности конструкции. Малые котлы с принудительной циркуляцией успешно применяют на теплоходах в качестве вспомогательных и утилизационных.

К очевидным преимуществам котлов типа «Ла Монт» следует отнести их малые габарит и массу, безопасность форсировки, высокие маневренные качества и быстрый подъем пара. Они могут быть полностью автоматизированы и не требуют постоянного присутствия.

Котлу с принудительной циркуляцией можно придать произвольную конструктивную форму в зависимости от предполагаемого места его установки (свобода компоновки). Наименьшая степень свободы компоновки у огнетрубного оборотного котла, так как его форма жестко ограничена цилиндрической бочкой. Водотрубные котлы с естественной циркуляцией обладают большей свободой компоновки, однако их форма ограничена необходимостью помещения пароводяного коллектора над поверхностью нагрева, определенным расположением испарительных труб, углом их наклона и т. д.

В котлах с принудительной циркуляцией место для пароводяного коллектора и компоновки пучка труб избирают произвольно. В таких котлах можно использовать трубы малого диаметра и располагать их, исходя только из условий рационального размещения поверхности нагрева. Так, испарительные трубы можно размещать горизонтально и гнуть под малыми углами.

Таким образом, можно придать трубной поверхности форму, наиболее выгодную для использования излучения топки и тепла газового потока. Это позволяет в этих котлах разместить большую поверхность нагрева с меньшей массой, так как толщина стенок труб малого диаметра, необходимая для прочности, меньше, чем у обычного котла.

Масса котла уменьшается также при устранении топочной футеровки. Единственный барабан может быть меньшего диаметра. Принудительная циркуляция позволяет использовать для образования поверхности нагрева меньше труб, причем более длинных и с меньшим диаметром, чем в котлах с естественной циркуляцией.

Высота котла также уменьшается, так как поверхность нагрева образуется из длинных труб, изогнутых в виде змеевиков или пакетов, и, кроме того, отпадает необходимость в верхнем расположении барабана. Эти преимущества наиболее ощутимы для вспомогательных и утилизационных котлов.

Утилизационные котлы типа «Ла Монт» удобно komponуются в любом месте выпускного коллектора (газохода), двигателя и, благодаря применению тесных пучков труб малого диаметра, имеют хорошие весовые и габаритные характеристики. Это же обстоятельство позволяет использовать поверхность нагрева утилизационного котла «Ла Монт» в качестве глушителя для дизеля.

С другой стороны, меньшая надежность котлов с принудительной циркуляцией, объясняющаяся наличием специальных циркуляционных насосов, а также некоторая сложность обслуживания заставили отказаться от их применения на судах в качестве главных котлов.

На рис. 40 показан вспомогательный котел «Ла Монт» V серии венгерской постройки, установленный на теплоходах типа «Тисса».

Позиции на рисунке означают: 1 — электрофорсуночный агрегат; 2 — распорные штанги; 3 — питательные клапаны; 4 — водомерная колонка; 5 — главный паровой невозвратный клапан; 6 — регулятор питания; 7 и 10 — дымоотводные камера и колпак; 8 — змеевики; 9 и 11 — верхний и нижний коллекторы; 12 — экраный змеевик.

Котел имеет автоматизированное управление горением в пределах 50—100% нагрузки по пару. При поверхности нагрева 18 м² котел производит пара до 650 кг/ч с давлением 5 кгс/см² и к. п. д. 74%.

В случае прекращения циркуляции воды в котле автоматическое защитное устройство прекращает горение.

На рис. 41 представлен отечественный утилизационный котел-глушитель с принудительной циркуляцией КУП 55/5, установленный на некоторых отечественных судах. Поверхность нагрева котла 53,2 м², производительность 550—600 кг/ч при давлении пара 5 кгс/см².

Позиции на рисунке означают: 1 — клапан продувания; 2 — обшивка котла; 3 и 8 — питательный и предохранительный клапаны; 4 — камера глушения; 5 — змеевики водогрейных труб; 6 — приемная газовая камера; 7 — опоры; 9 — клапан к сепаратору; 10 — манометр; 11 — раздающий коллектор с дроссельными шайбами; 12 — сборный коллектор; 13 — спускной кран; 14 — соединительные планки; 15 — распорные гребенки.

Другой котел КУП 15/5 имеет производительность 175 кг/ч при том же давлении пара, поверхность нагрева этого котла составляет 19 м².

Утилизационные котлы сходной конструкции с принудительной циркуляцией (производительностью 200 кг/ч) устанавливают на теплоходах типа «Эльва» и «Тарту» венгерской постройки (рис. 42).

Утилизационные котлы типа «Ла Монт» снабжены сепаратором пара и центробежным циркуляционным насосом. Диаметр труб змеевиков обычно составляет 29 или 25 мм при толщине стенки труб 2—2,5 мм.

Конструкция кожуха (обшивки) утилизационных котлов с принудительной циркуляцией предусматривает выемку змеевиков для

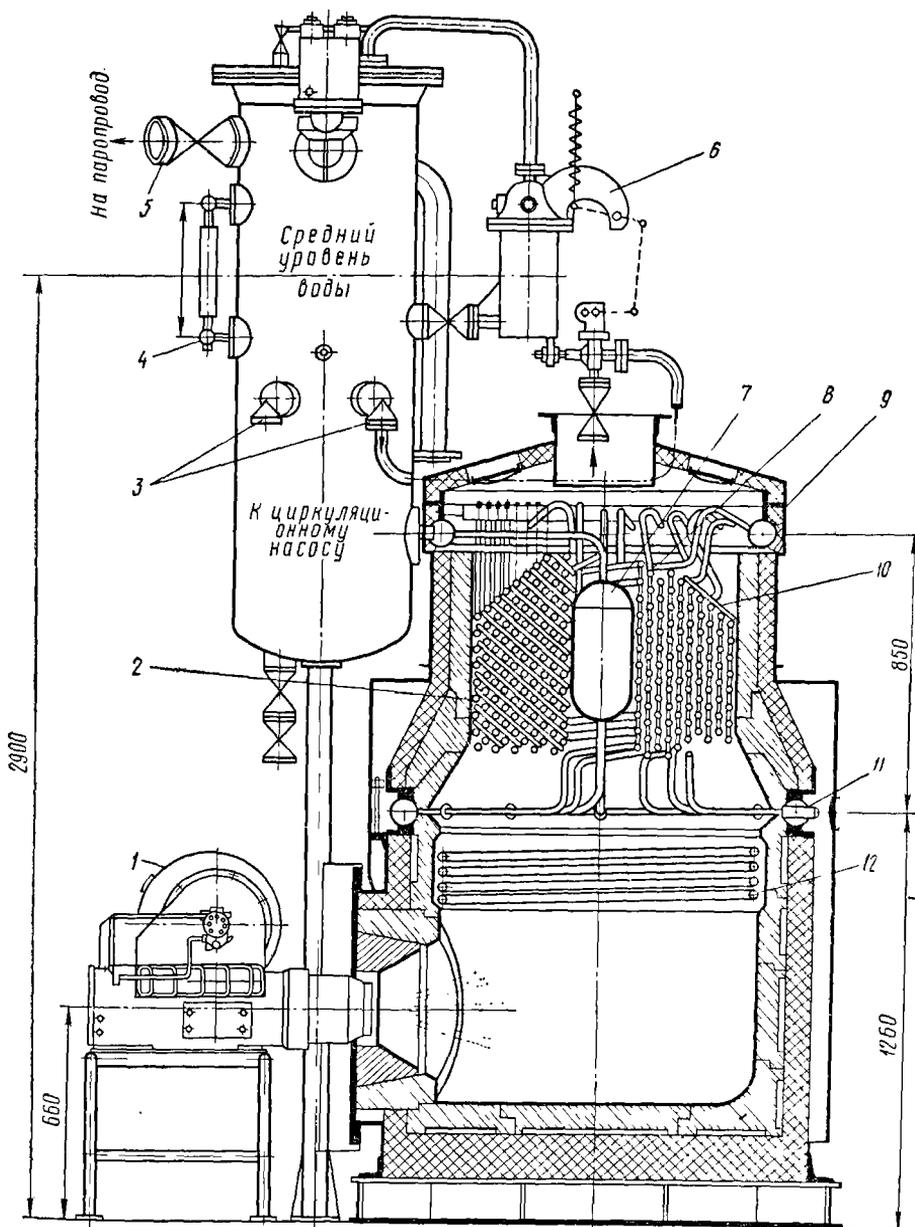


Рис. 40. Вспомогательный котел типа „Ла Монт“ тепловозов типа „Тисса“

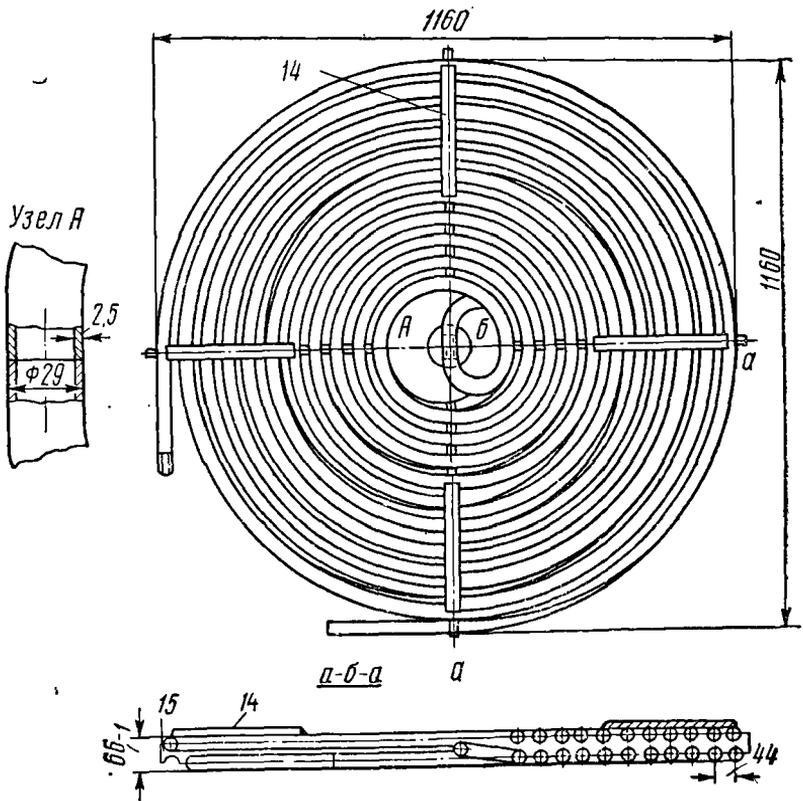
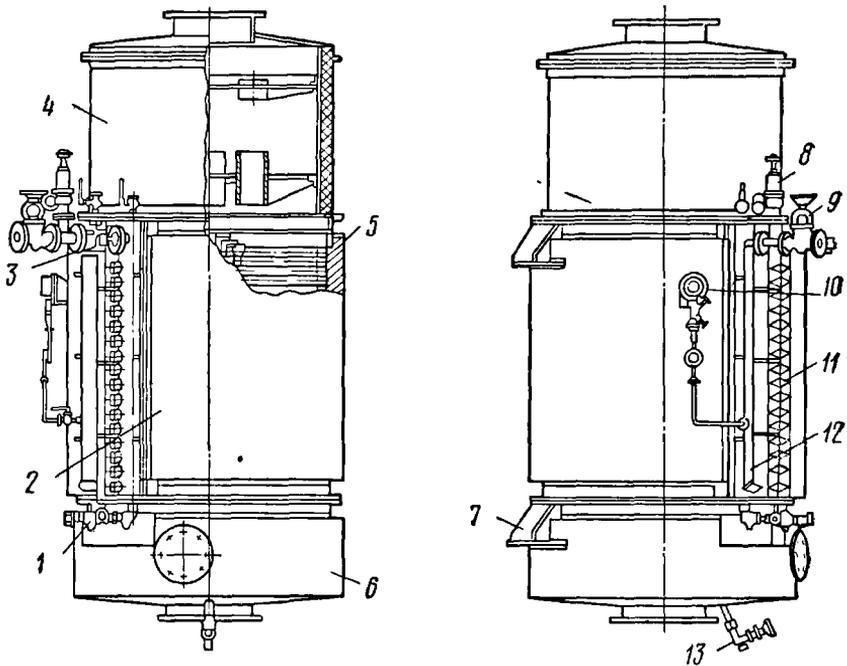
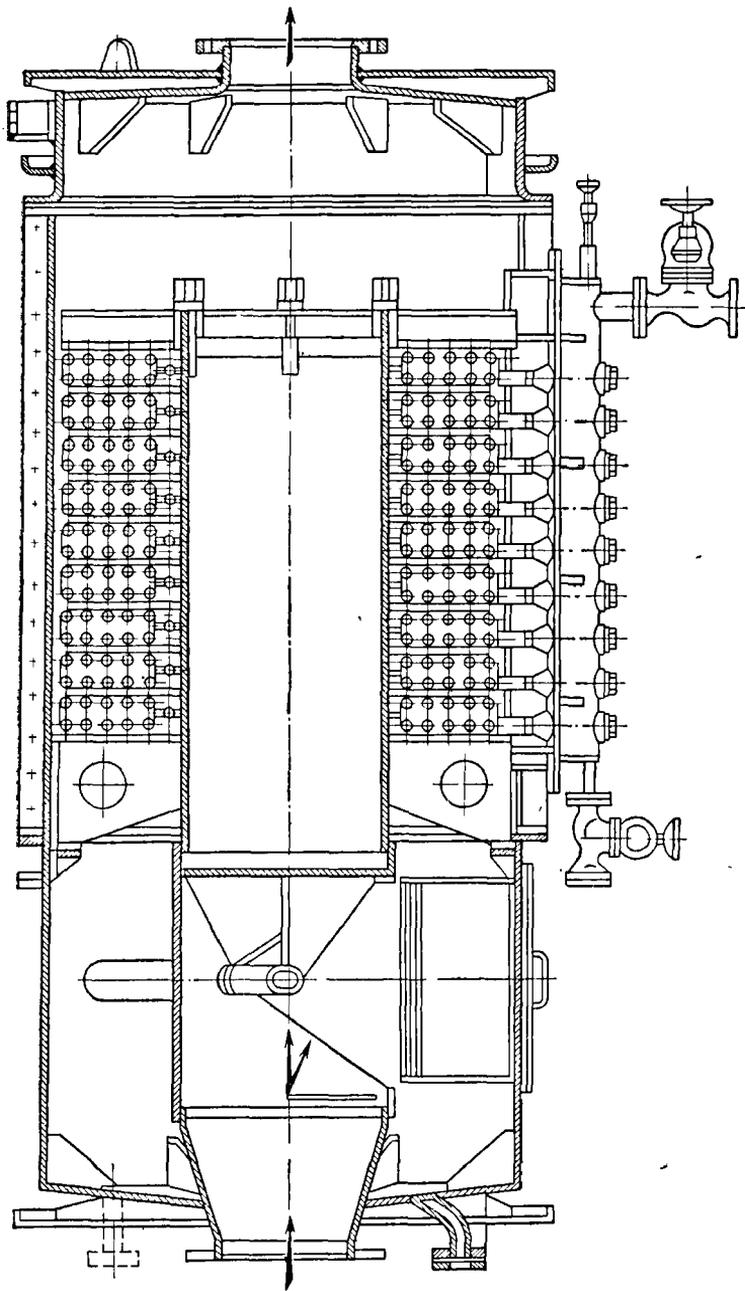


Рис. 41. Утилизационный котел КУП 55/5



Вход выпускных газов

Рис. 42. Утилизационный котел теплоходов типа „Эльва“ и „Тарту“

их очистки. В нижней части котлов имеется подвод пара для паротушения, так как не исключены случаи горения сажи внутри пучка труб. На некоторых котлах клапаны паротушения открываются термосигнализатором, который включает паротушение при резком возрастании температуры газов за котлом.

Утилизационные котлы «Ла Монт» работают на специальные паросепараторы, но чаще в качестве паросепараторов используют вспомогательные котлы (на теплоходах типа «Андижан», «Волголес» и др.).

Утилизация тепла выпускных газов способствует повышению экономичности дизелей. Утилизационные котлы на дизельных уста-

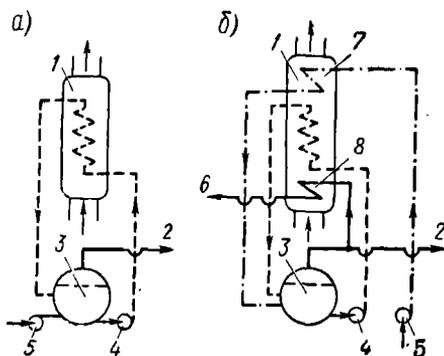


Рис. 43. Схемы утилизационных установок теплоходов

новках средней мощности производят насыщенный пар давлением 2—7 кгс/см² только для хозяйственно-бытовых нужд и подогрева топлива.

На теплоходах, где мощность главного дизеля составляет 8000 э. л. с. и более, количество тепла выпускных газов позволяет производить перегретый пар с давлением до 14 кгс/см² в достаточном для работы турбогенератора и хозяйственно-бытовых нужд количестве. В этом случае применяют комплексные теплоэнергоустановки с глубокой

утилизацией, дающие возможность более полно использовать тепло отработавших газов и получить до 10% экономии топлива.

В таких установках часто в качестве сепараторов для отделения пара от воды используют пароводяные коллекторы вспомогательных котлов.

Схема наиболее простой утилизационной установки показана на рис. 43, а. Питательный насос 5 подает конденсат, поступающий от потребителей пара, в коллектор-сепаратор 3. Воду из коллектора забирает циркуляционный насос 4 и подает ее в утилизационный котел 1, где образуется пароводяная смесь. Пароводяная смесь поступает в коллектор, и отделившийся пар направляется к потребителям по магистрали 2.

Для получения, кроме бытового, перегретого пара для питания турбогенератора служит установка, показанная на рис. 43, б. Здесь предусмотрен водяной экономайзер 7. Часть насыщенного пара отводится к бытовым потребителям по магистрали 2, а другая часть проходит через помещенный в утилизационном котле пароперегреватель 8 и по трубопроводу 6 поступает к турбогенератору.

На рис. 44 представлена более подробная схема вспомогательной энергетической установки крупного теплохода, где комплексно используют утилизационный и вспомогательный котлы, а пароводяной коллектор последнего служит сепаратором для утилизационного котла.

Отработавший пар турбогенератора 10 поступает в конденсатор 11. Конденсат забирает конденсатный насос 13 и подает его в теплый ящик 2, откуда электрический питательный насос 3 перекачивает конденсат через подогреватель 6 в экономайзер 8 утилизационного котла 7.

Подогретая в экономайзере вода поступает в пароводяной коллектор вспомогательного котла 1. Циркуляционный насос 15 подает воду из коллектора в испарительные трубы 9 утилизационного котла, из которых пароводяная смесь поступает в пароводяной коллектор (пунктиром показаны паровые линии).

С помощью понижающих давление клапанов 5 от установки можно получать насыщенный пар трех давлений. Атмосферный конденсатор 14 служит для сбора отработавшего пара хозяйственно-бытовых потребителей (12 — пароструйный эжектор конденсатора турбины, 4 — паровой питательный насос).

Эксплуатация вспомогательных котлов должна в основном соответствовать нормам, правилам и рекомендациям, установленным для главных паровых котлов. Паропроизводительность утилизационного котла регулируют посредством заслонок, перепускающих часть выпускных газов помимо котла. Заслонки приводят в действие вручную или, в последнее время, ими управляет автоматическое реле давления пара (прикрывает при росте давления и наоборот).

Главной задачей эксплуатации утилизационных котлов является поддержание чистоты их поверхности нагрева с газовой и водяной сторон. В выпускных газах дизелей содержатся маслянистые вещества, отложения которых на поверхности нагрева сильно снижают паропроизводительность котлов.

Поверхность нагрева необходимо регулярно и при первом удобном случае (стоянке в порту) очищать от наружных загрязнений щетками, смоченными в керосине, горячей мыльной водой или просто щетками с последующей промывкой струей горячей воды. Удаление отложений выжиганием на большинстве котлов недопустимо, так как это приводит к нарушению прочности металла труб и их последующей усиленной коррозии.

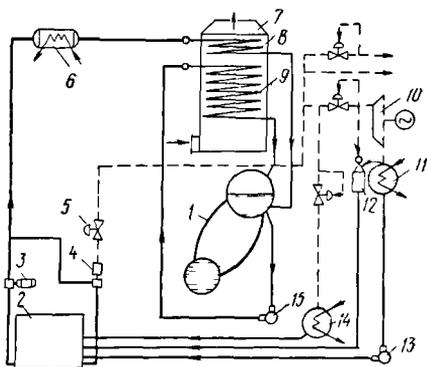


Рис. 44. Схема вспомогательной энергетической установки судов типа „Ленинакан“

Глава VII. ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛИ, ЭКОНОМАЙЗЕРЫ И ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛИ

§ 26. Пароперегреватели и парохладители

Пароперегреватели являются обязательной принадлежностью современного котельного агрегата. Развитие этих поверхностей нагрева позволяет значительно повысить к. п. д. котла и паросиловой установки судна.

Термический к. п. д. паросилового цикла во многом зависит от его начальных параметров, т. е. от давления и температуры пара, вырабатываемого котлом. Это обстоятельство заставляет непрерывно повышать параметры пара и строить новые, более совершенные котлы.

У морских паротурбинных установок температура перегретого пара составляет 400—470 и в последнее время 510—535° С. Высокий перегрев позволяет обеспечить 15—20% экономии топлива по сравнению с установками, работающими на насыщенном паре.

По назначению различают основные пароперегреватели, в которых перегревается пар перед паровой турбиной, и промежуточные, в которые возвращается для перегрева пар, частично отработавший в первых ступенях турбины.

В зависимости от способа передачи тепла газами поверхности нагрева различают конвективные и радиационно-конвективные пароперегреватели.

Конвективные пароперегреватели, получающие большую часть тепла за счет конвективного теплообмена, устанавливают между пучками водогрейных труб или непосредственно за поверхностью нагрева котла.

Радиационно-конвективные пароперегреватели воспринимают сопоставимые по величине количества тепла за счет радиационного и конвективного теплообмена (это характерно для пароперегревателей водотрубных котлов, установленных за двумя-тремя рядами разреженных водогрейных труб).

В огнетрубных котлах старой постройки петли пароперегревателя расположены обычно внутри дымогарных труб. Такие пароперегреватели обеспечивают относительно невысокую температуру перегретого пара (300—320° С) и загромождают дымогарные трубы.

В комбинированных котлах пароперегреватели располагают внутри дымогарных труб или в огневой камере.

По расположению труб различают горизонтальные и вертикальные пароперегреватели. Установка вертикальных и горизонтальных пароперегревателей в водотрубных котлах представлена на рис. 20, 22, 24, 26, 28.

При эксплуатации радиационно-конвективных пароперегревателей необходимо особенно внимательно следить за чистотой насы-

щенного пара и температурой перегретого пара, которая быстро возрастает до опасных значений при уменьшении количества пара, протекающего через перегреватели (например, при остановке главных турбин). Их труднее очищать от золы и сажи. Поэтому в новейших котлах применяют конвективные пароперегреватели, расположенные в отдельных газоходах за поверхностью нагрева котла («внешние» пароперегреватели).

Шахматное расположение труб имеет преимущество более интенсивного теплообмена, однако пучки труб быстро теряют эти преимущества, так как легче загрязняются и труднее поддаются обдувке. Поэтому в последнее время переходят на более удобное для очистки коридорное расположение труб.

Прежде чем перейти к рассмотрению типов и конструкций пароперегревателей, необходимо выяснить условия теплообмена для них, определяющие расположение пароперегревателя в котле и компоновку его труб в пучке. Вертикальный петлевой пароперегреватель во время стоянки котла можно осушать, вследствие чего его трубы подвергаются меньшей «стояночной» коррозии при эксплуатации. Однако вертикальные пароперегреватели плохо komponуются в пучке водогрейных труб и увеличивают общий габарит котла (см. рис. 24, 26).

Величина скорости пара в трубах пароперегревателя является важным условием его надежной эксплуатации. Прочность стенок труб зависит от их температуры, а последняя — от величины коэффициента теплоотдачи от стенки к пару (α_2 ккал/м²·ч·°С). В свою очередь величина α_2 в значительной степени зависит от скорости пара в трубах. Для надежной работы пароперегревателя необходимо, чтобы величина α_2 была не менее 500 ккал/м²·ч·°С. На самых малых нагрузках эти значения могут быть у пароперегревателя, размещенного в зоне газохода с температурой газов 500—600°С, большие — с температурой 800—900°С.

При давлении пара до 32—40 кгс/см² его скорость в трубах пароперегревателя должна быть 18—15 м/с, при давлении до 80 кгс/см² скорость 14—15 м/с. Некоторое уменьшение скорости пара с ростом давления объясняется увеличением коэффициента α_2 за счет повышения плотности пара.

Увеличение скорости пара в трубах пароперегревателя способствует уменьшению его габарита и массы за счет роста коэффициента теплоотдачи α_2 , а следовательно, и коэффициента теплопередачи k . Однако при увеличении скорости пара возрастают гидродинамические потери напора, т. е. перепад давлений до пароперегревателя и за ним, что снижает экономичность установки, понижая давление пара перед турбиной.

Вертикальный петлевой пароперегреватель для котла КВГ-25 показан на рис. 45 (его компоновку в котле см. на рис. 24).

Поверхность нагрева пароперегревателя, образованная из труб диаметром 25/2 мм, разделена на две секции поперечной перегородкой 4. Продольная перегородка, разделяющая поток пара по

петлям труб, установлена вдоль всего коллектора и для удобства монтажа состоит из отдельных листовых сегментов 2.

Насыщенный пар поступает в первую секцию пароперегревателя по патрубку 7 и выходит из патрубком 8. Между выходным патрубком 8 первой секции и входным патрубком 9 второй включен пароохладитель, предназначенный для регулирования температуры перегретого пара, который поступает к турбинам из выходного патрубком 10 второй секции. Для обеспечения максимально необходимой скорости пара в трубах в каждой секции коллектора 6 уста-

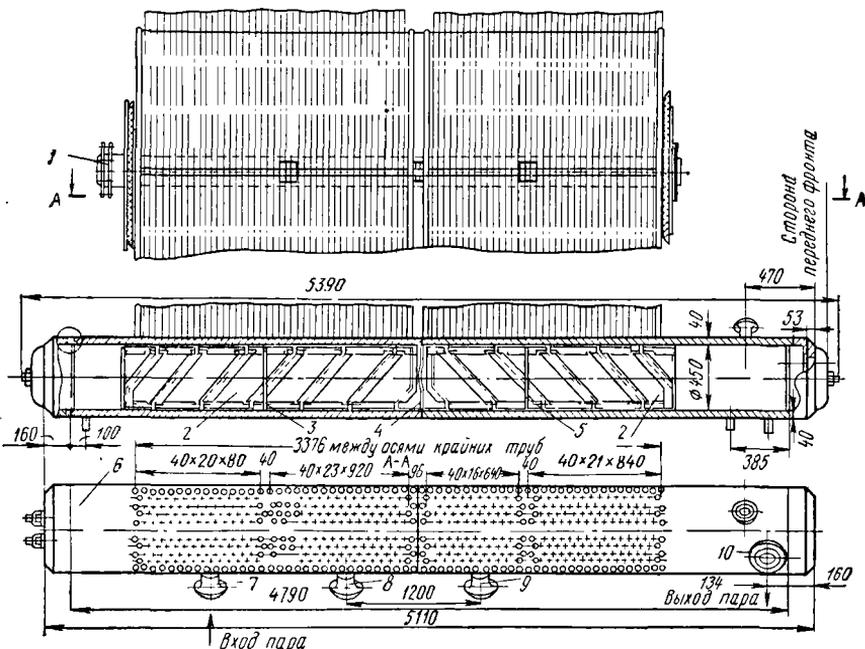


Рис. 45. Пароперегреватель котла КВГ-25

новлены поперечные полуперегородки 3 и 5. Поперечная опора 1 коробчатого сечения служит для крепления пучка труб пароперегревателя.

На современных водотрубных котлах преимущественно распространены горизонтальные петлевые или змеевиковые пароперегреватели, более удобные для очистки и ремонта и не увеличивающие размеров котла.

У горизонтальных пароперегревателей возможно провисание трубок в процессе эксплуатации котла. В этом случае не только ухудшается теплопередача (из-за нарушения шаговых отношений), но иногда пароперегреватель невозможно вынуть из котла без вырубки части труб. Чтобы избежать этого, трубы пароперегревателя устанавливают в специальных листах из жаростойкой стали, причем сами листы прикрепляют к испарительным трубам, включен-

ным в общий контур циркуляции котла (см. также рис. 27, 28). Количество фиксирующих листов зависит от длины трубы пароперегревателя и обычно не бывает больше 3—4.

На рис. 46 представлена схема установки петлевого пароперегревателя в пучке труб котла парохода «Мир». Поддерживающие листы 3, фиксирующие петли 6 пароперегревателя, прочно крепятся к усиленным испарительным трубам 4 диаметром 76 мм при толщине стенок 17,8 мм. Внутри петель размещено девять опорных труб 5 для сажеобдувателей. Между коллекторами 1 имеется съемный щит 2, облегчающий доступ к трубам пароперегревателя.

Такая конструкция обеспечивает постоянство шагов труб и дает возможность поддерживать их поверхность в чистом состоянии (на

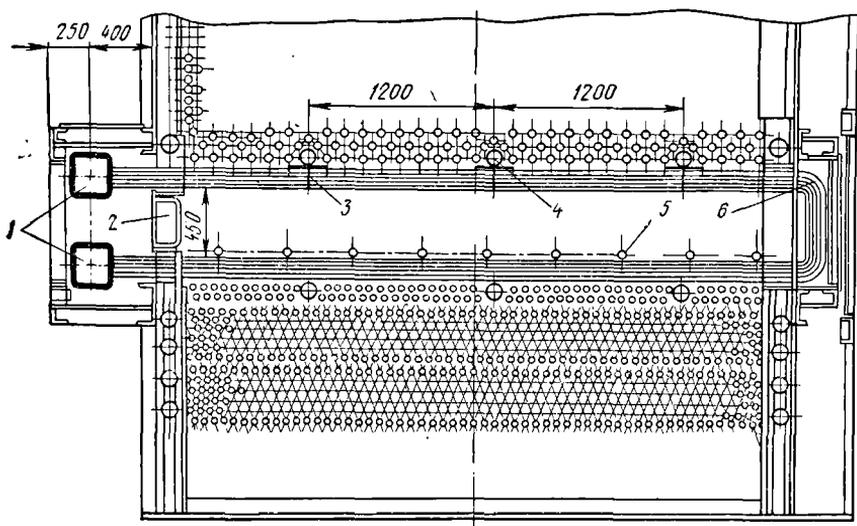


Рис. 46. Установка горизонтального петлевого пароперегревателя в пучке труб котла

данном судне предусмотрена автоматическая программная обдувка котла и пароперегревателя).

Обычно для конвективных пароперегревателей применяют трубы диаметром 32, 29 и 25 мм при толщине стенки 2—3 мм; для промежуточных пароперегревателей применяют трубы большего диаметра (например, 45 мм при толщине стенки 3 мм). Применение труб небольшого диаметра способствует уменьшению габарита пароперегревателя.

Петлевой пароперегреватель не может обеспечить высокого перегрева пара, так как количество рядов его труб, а следовательно, и поверхность нагрева ограничены конструктивными размерами коллекторов перегревателя.

Для получения пара практически любой температуры применяют горизонтальные змеевиковые пароперегреватели (рис. 47).

Применение петлевых и змеевиковых пароперегревателей исключает механическую очистку труб от накипи и требует поэтому пара высокой чистоты.

В пароперегревателях часто применяют параллельное включение больших групп петель. В этом случае пар по отдельным трубам распределяется не всегда равномерно, что может привести к пережогу тех труб, в которых скорость пара недостаточна. При высокой температуре пара для труб требуются более дорогие легированные стали, так как повышается рабочая температура их стенок.

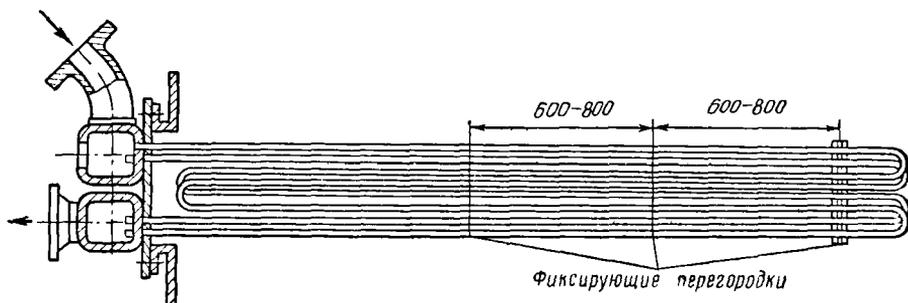


Рис. 47. Змеевиковый пароперегреватель

При температуре стенок до 430°C применяют трубы из малоуглеродистой стали 20, при температуре до 480°C — из легированной стали типа 15ХМ, а при более высокой температуре — из специальных жаростойких сталей, стоимость которых в несколько раз больше стоимости обычной малоуглеродистой стали. Однако общее повышение экономичности работы паросиловой установки, работающей на паре повышенной температуры, как правило, окупает все затраты на изготовление пароперегревателей и другого оборудования.

В современных водотрубных котлах основной пароперегреватель до сих пор размещали за вторым — четвертым рядом водогрейных труб. Температура газов перед таким пароперегревателем обычно равна $750\text{--}900^{\circ}\text{C}$. В новейших котлах почти все парообразование происходит на экранной поверхности нагрева, температура после нее и на входе в пароперегреватель может достигать 1200°C .

Для обеспечения большей надежности эксплуатации в новейших котлах пароперегреватель полностью выносят за водогрейные трубы и делают на секции. Такое расположение удобно для эксплуатации, снижает расход легированных сталей и не увеличивает габарита котла. Несколько повышенная в этом случае масса пароперегревателя окупается большей его надежностью и доступностью для очистки и ремонта, что важно для судов торгового флота.

Поддержание установленной для турбин или паровых машин температуры пара представляет одно из важных требований об-

служивания котельной установки. Снижение температуры пара против установленной уменьшает экономичность работы паровых двигателей и может вызвать эрозию лопаток последних ступеней турбины (из-за высокой влажности пара), а повышение вызывает перегрев и снижение механической прочности лопаток первых ступеней.

Температура перегретого пара при колебаниях нагрузки котла изменяется.

При конвективных пароперегревателях увеличение количества сжигаемого топлива вызывает рост температуры перегретого пара. Кроме того, температура пара повышается при росте коэффициента избытка воздуха, непосредственно приводящем к увеличению количества и скорости газов, проходящих через пароперегреватель. Иногда повышение температуры пара вызывается засорением сажей или золой газоходов до пароперегревателя или догораниями газов в его газоходе (в обоих случаях температура газов в районе пароперегревателя увеличивается). При уменьшении температуры питательной воды также повышается температура пара, так как при этом количество вырабатываемого котлом пара в единицу времени уменьшается и при постоянном выделении тепла в топке то же самое количество тепла от газов будет уже воспринято меньшим количеством пара.

Температура перегретого пара уменьшается при снижении нагрузки котла, загрязнении пароперегревателя сажей или золой, уменьшении избытка воздуха и повышении влажности пара.

Кроме того, на температуру перегрева влияют некоторые другие условия, например, изменение марки топлива или его влажности.

Все эти обстоятельства затрудняют поддержание постоянной температуры пара. В таких случаях необходимо принудительное регулирование температуры. При ручном управлении котлом следят за показаниями измерительного прибора (термометра или термомпары), устанавливаемого в месте выхода пара из пароперегревателя.

В современных котельных установках применяют следующие методы регулирования температуры перегретого пара:

- впрыск дистиллята в магистраль перегретого пара;

- установку поверхностных охладителей в водяном пространстве пароводяного коллектора котла;

- установку газонаправляющих заслонок, которые изменяют количество газов, протекающих через газоход пароперегревателя;

- установку выносных поверхностных пароохладителей, которые охлаждают поток воздуха, направляемого в топку;

- установку выносных поверхностных пароохладителей, охлаждаемых питательной водой.

Температуру перегретого пара проще всего регулировать впрыском питательной воды (рис. 48).

Обычно на трубопроводе перегретого пара устанавливают специальный клапан, в который подается дистиллят.

Регулирование температуры пара впрыском питательной воды допустимо только при низком (1—3 мг/л) содержании солей в дистилляте. В противном случае неизбежно загрязнение паропроводов и механизмов (особенно лопаток турбин) солями. Легкость регулирования температуры пара впрыском и компактность смесителей для этой цели, а также высокое качество дистиллята на современных судах являются основными причинами широкого распространения метода впрыска в последнее время. Однако для получения слабоперегретого пара для вспомогательных механизмов и хозяйственно-бытовых нужд в барабане котла устанавливают вспомогательный внутрибарабанный пароохладитель (см. ниже).

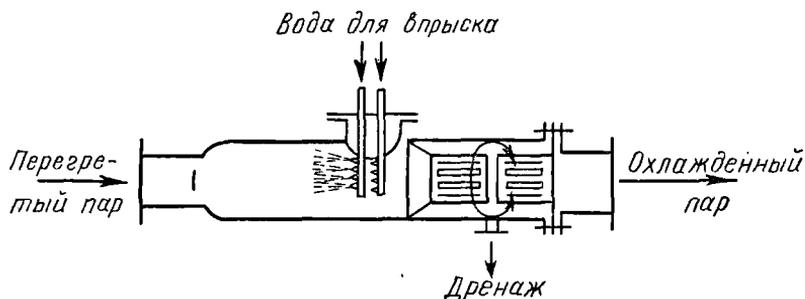


Рис. 48. Регулирование температуры перегретого пара впрыском

Регулирование температуры пара изменением количества газов, протекающих через пароперегреватель, применяют давно. Одна из таких установок для котла фирмы «Бабкок и Вилькоккс» представлена на рис. 49. К достоинствам этой установки относится расположение шиберов (газовых заслонок) 1 за котлом, в зоне температур газов 332—350° С, что уменьшает коробление шиберов. Степень открытия шиберов определяется количеством газов, протекающих через пароперегреватель 2, что позволяет регулировать температуру перегретого пара. Газовое регулирование по такой схеме можно применять для котлов любой мощности.

Регулирование температуры перегретого пара охлаждением части его в специальных пароохладителях до недавнего времени было широко распространено на морских судах. В этом случае часть перегретого пара направляется в пароохладитель, установленный в воздухопроводе котла; одновременно подогревается воздух перед поступлением в топку. Такой пароохладитель позволяет осуществить устойчивое регулирование температуры перегретого пара при изменении нагрузки котла в широких пределах.

В паровом котле с воздушным пароохладителем полезно используется только часть тепла, отданного перегретым паром воздуху. Поэтому чаще применяют более экономичные внутрибарабанные поверхностные пароохладители. Схема включения такого

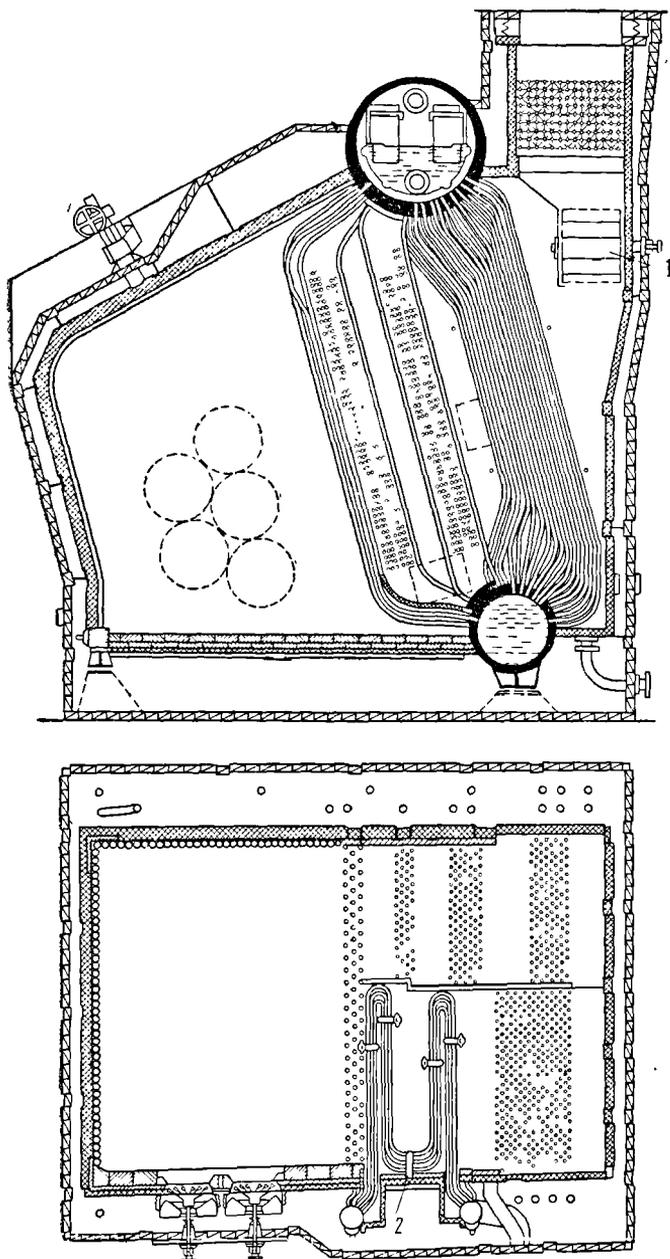


Рис. 49. Котел с газовым регулированием температуры перегретого пара

пароохладителя для большого котла с двухсекционным пароперегревателем показана на рис. 50. В этом пароохладителе тепло охлаждаемого пара, сообщаемое воде котла, полностью используется для парообразования.

В данном случае пароперегреватель разделен на две секции — 3 и 4. Количество пара, проходящего через пароохладитель 1 из секции 4 в секцию 3 и далее к двигателю, регулируется специальным клапаном 2, от степени открытия которого зависит температура перегретого пара на выходе из пароперегревателя.

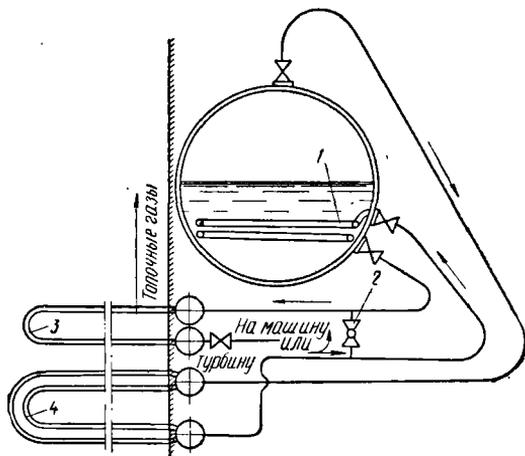


Рис. 50. Схема включения внутрибарабанного пароохладителя

На большинстве паровых судов необходимо, чтобы пар имел относительно низкую температуру для работы некоторых вспомогательных механизмов, насосов, грузовых и палубных механизмов, а также для бытовых нужд. Поэтому специальные пароохладители во время ходового режима частично выдают слабоперегретый пар с температурой на 25—50° выше температуры насыщения. Пар, отбираемый из котла на стоянке судна, также проходит сначала пароперегреватель, а затем такой пароохладитель.

При любой системе регулирования «главного» пара впрыском сохраняется небольшой внутрибарабанный охладитель пара для вспомогательных механизмов и хозяйственных нужд судна, помещенный либо в водяном пространстве пароводяного коллектора, либо в водяном барабане котла (см. рис. 28).

Надежность работы пароперегревателя во многом зависит от тщательного соблюдения правил технической эксплуатации. При эксплуатации котла весь насыщенный пар должен проходить через основной пароперегреватель. Отбор насыщенного пара непосредственно из барабана котла снижает скорость пара в трубах пароперегревателя, в результате чего повышается температура его стенок и увеличивается возможность их пережога. Пар для работы

вспомогательных механизмов и хозяйственно-бытовых нужд судна должен отбираться только через пароохладитель.

На выходном коллекторе (или патрубке) пароперегревателя должны быть установлены предохранительный клапан и термометр. Предохранительный клапан пароперегревателя снабжен более слабой пружиной и открывается раньше главного для того, чтобы при подрыве предохранительных клапанов пар всегда охлаждал пароперегреватель.

Если при работе котла на установившемся режиме постепенно снижается температура перегретого пара, то необходимо усилить обдувку пучков труб пароперегревателя. Причинами снижения температуры пара могут быть также его повышенная влажность, увеличение температуры питательной воды или неполное горение топлива в топках, происходящее с очень малым избытком воздуха.

Повышенная влажность насыщенного пара, поступающего из барабана котла в пароперегреватель, может быть следствием высокого уровня воды в барабане, высокой концентрации солей или неисправности паросепарирующих устройств. В этом случае надо снизить уровень воды в барабане до рабочего, довести продувкой соледержание воды в котле до нормы и, если температура перегретого пара не меняется, при первой возможности проверить состояние сепарирующих устройств.

Если при эксплуатации двух и более котлов температура вырабатываемого ими перегретого пара отличается более чем на $10-15^{\circ}$, это свидетельствует, в первую очередь, о неравномерной нагрузке котлов или разной степени загрязнения их поверхностей нагрева. Увеличив интенсивность горения у того котла, который выдает пар пониженной температуры, и несколько снизив нагрузку другого котла, можно добиться их равномерной работы.

При повышении температуры пара выше нормальной необходимо снизить интенсивность горения, обдуть пучки испарительных труб, расположенных до пароперегревателя, и проверить температуру питательной воды, поступающей в котел. Если температура питательной воды ниже установленной, надо проверить степень открытия паровых и конденсатных клапанов на водоподогревателях, давление поступающего к ним пара и т. д. После устранения причин, вызывающих чрезмерное повышение температуры, пара, можно вновь увеличить нагрузку котла до нормальной.

Если температура перегретого пара постоянно держится выше или ниже нормы, это может быть следствием конструктивных недостатков котла либо пропусков пара через клапаны продувания или находящиеся внутри коллектора пароперегревателя перегородки, особенно после их разборки и установки на место. Тогда при повышении температуры усиливают охлаждение пара после пароперегревателя. Следует, однако, помнить, что это не устраняет ненормального режима работы пароперегревателя, из-за чего он может быстро выйти из строя. Кроме того, само по себе охлаждение перегретого пара любыми методами связано с уменьшением экономичности эксплуатации силовой установки.

При сниженной (за счет регулирования пароохладителей) температуре пара перед двигателем температура на выходном коллекторе пароперегревателя не должна превышать установленную более чем на 50° , иначе прочность труб пароперегревателя может оказаться недостаточной и они выйдут из строя. В этом случае необходимо уменьшить горение в топках до выяснения причин высокой температуры перегрева.

При работе котла следует регулярно проверять падение давления пара в пароперегревателе по показаниям манометров, установленных на барабане котла и магистрали перед двигателем. Увеличение падения давления от котла до двигателя свидетельствует о заносе пароперегревателя солями, что опасно для прочности его труб и снижает экономичность работы силовой установки. Поэтому пароперегреватель надо при первой возможности промыть. Падение давления сопровождается одновременным снижением температуры перегретого пара из-за ухудшения теплопередачи в пароперегревателе.

Однако температура стенки загрязненных изнутри труб пароперегревателя будет при этом выше расчетной, в связи с чем форсирование котла с загрязненным пароперегревателем категорически запрещается, иначе неизбежно повреждение. При температуре стенки труб более 600°C происходит интенсивная высокотемпературная коррозия с участием содержащегося в дымовых газах кислорода и находящихся в золе мазута солей натрия и соединений ванадия.

При соблюдении правил технической эксплуатации наиболее опасными моментами в работе пароперегревателей являются пуск котла, резкое изменение его нагрузки и стояночные режимы.

Если трубки пароперегревателя изготовлены из малоуглеродистой (перлитной) стали, то температура газов перед отключением пароперегревателя во всех случаях не должна превышать 500°C . При этой температуре стальные трубки еще не испытывают остаточных деформаций и не наблюдается их коррозии.

Если котел имеет пароохладитель и работает на стояночном режиме, то весь пар, расходуемый из котла, должен проходить сначала через пароперегреватель, а затем через пароохладитель к потребителям. При этом необходимо строго следить за температурой пара на выходном коллекторе пароперегревателя.

При работе котла без расхода пара или с незначительным его расходом горение в топке должно быть отрегулировано так, чтобы температура газов перед пароперегревателем не превышала 500°C . Клапаны продувания, установленные на коллекторах пароперегревателя, надо держать слегка приоткрытыми и полностью продувать коллекторы два раза за вахту.

При стояночном или маневренном режиме котла температура перегретого пара, как правило, повышается, так как в этих случаях работают часто при повышенном избытке воздуха, чтобы избежать дымления. В результате увеличивается объем газов, проходящих

через пароперегреватель, а следовательно, и теплопередача в нем, что повышает температуру пара.

Перед подъемом пара в котле предварительно открывают клапан на пароперегреватель и продувальные клапаны его коллекторов. При этом трубы пароперегревателя охлаждаются конденсирующимся в них паром. Температура газов перед пароперегревателем при таком способе также не должна во время подъема пара превышать 500°C .

После того как расход пара, необходимого для вспомогательных потребителей и проходящего через пароохладитель, достигнет величины, достаточной для охлаждения пароперегревателя, клапаны продувания прикрывают. Полностью закрыть эти клапаны можно только после начала работы главных двигателей.

После подъема пара в котле температура перегретого пара долгое время (до 12 ч) остается высокой, так как для прогрева кладки и металла котла приходится сжигать в топке больше топлива.

При внезапной остановке главных двигателей необходимо, во избежание перегрева труб пароперегревателя, немедленно открыть клапаны продувания его коллекторов.

Перевод главных двигателей на насыщенный пар разрешается лишь в исключительных случаях, например, при выходе из строя во время рейса пароперегревателя, особенно в условиях, угрожающих безопасности судна.

§ 27. Водяные экономайзеры

Водяной экономайзер устанавливают за котлом. Вместе с воздухоподогревателем он относится к так называемым хвостовым поверхностям нагрева, развитие которых способствует снижению температуры уходящих газов и повышению к. п. д. котла вследствие уменьшения потерь с уходящими газами.

При снижении температуры газов перед экономайзером возникает опасность интенсивной коррозии стальных труб экономайзера (или воздухоподогревателя), которая появляется в том случае, если температура стенки труб станет равной температуре точки росы t_p . При этом пары водного раствора серной кислоты в газах конденсируются на стенках и вызывают интенсивную коррозию труб.

Температура точки росы зависит в основном от содержания в топливе влаги и серы; для мазутов $t_p = 60 \div 80^{\circ}\text{C}$, но может достигать до $120\text{—}145^{\circ}$ при сжигании сернистых мазутов, содержащих более 3% серы.

Температура стенок труб экономайзера практически равна температуре воды, протекающей в них. Поэтому при включении экономайзера по схеме противотока, т. е. когда питательная вода подается в верхний коллектор экономайзера, необходимо, чтобы температура питательной воды на $15\text{—}20^{\circ}$ превышала точку росы. Это условие соблюдается на всех морских паровых судах, так как

питательная вода перед поступлением в экономайзер проходит через один, два или даже три водоподогревателя.

При одноступенчатом подогреве температура питательной воды составляет 90—100°, а при трехступенчатом — 150—180° и выше. Это позволяет избежать точки росы в экономайзере практически при всех режимах работы котла.

Подогрев воды в экономайзере на 1° вызывает охлаждение дымовых газов на 2,5—3°, т. е. установка экономайзера дает большой экономический эффект. Кроме того, относительные размеры поверхности нагрева экономайзера с повышением параметров пара увеличиваются (см. § 23).

Повышение температуры воды, поступающей из экономайзера в котел, позволяет сократить размеры парообразующей поверхности нагрева последнего, стоящей дороже, чем равная ей по величине поверхность нагрева экономайзера. При этом увеличивается экономический эффект применения экономайзера.

Температура воды при выходе из экономайзера должна быть на 35—40° ниже температуры насыщения при любых нагрузках котла. Питательная вода подается из раздаточного коллектора в систему труб экономайзера, установленную в газоходе, и, выходя из экономайзера, поступает в пароводяной коллектор.

Между экономайзером и котлом ставят разобщительный клапан. При аварии или течи экономайзер обязательно отделяют от котла, а питательную воду подают по обводной (байпасной) магистрали. Отключаемый экономайзер не будет поврежден от нагрева, так как температура газов в месте его установки обычно не превышает 300—450°С.

Конструкция судового гладкотрубного стального экономайзера представлена на рис. 51. Экономайзер имеет два коллектора. Его поверхность нагрева образована несколькими рядами змеевиковых изогнутых труб. Питательная вода поступает в патрубок 1 верхнего коллектора и проходит последовательно три группы труб. Для действия в экономайзере противоточной схемы предусмотрены перепускные трубы 4 и перегородки 2 в коллекторах. Нагретая вода из выходного фланца 5 нижнего коллектора направляется в коллектор котла. Для осушения и продувки экономайзера служат спускные краны 6, а для удаления воздуха из нагреваемой воды — воздушные краны (вантузы) 3.

Трубы экономайзера изготавливают из малоуглеродистой стали марки 10 или 20, а его коллекторы — из стали 15К или 20К. Диаметр труб обычно составляет не более 38 и не менее 16 мм. Штампованные квадратные коллекторы дороги, однако в них легче вальцевать трубы. Иногда применяют также сварные соединения труб и коллекторы, изготовленные из цельнотянутых стальных труб.

Скорость воды в трубах экономайзера составляет 0,3—1,5 м/с. При скорости воды менее 0,1—0,15 м/с не исключена возможность кислородной коррозии труб вследствие скопления в них воздуха, выделяющегося при нагревании воды. Поэтому питательная вода

должна быть подвергнута предварительной деаэрации (удалению воздуха). Кроме того, каждый экономайзер снабжают специальными воздушными кранами, расположенными в верхних точках экономайзера.

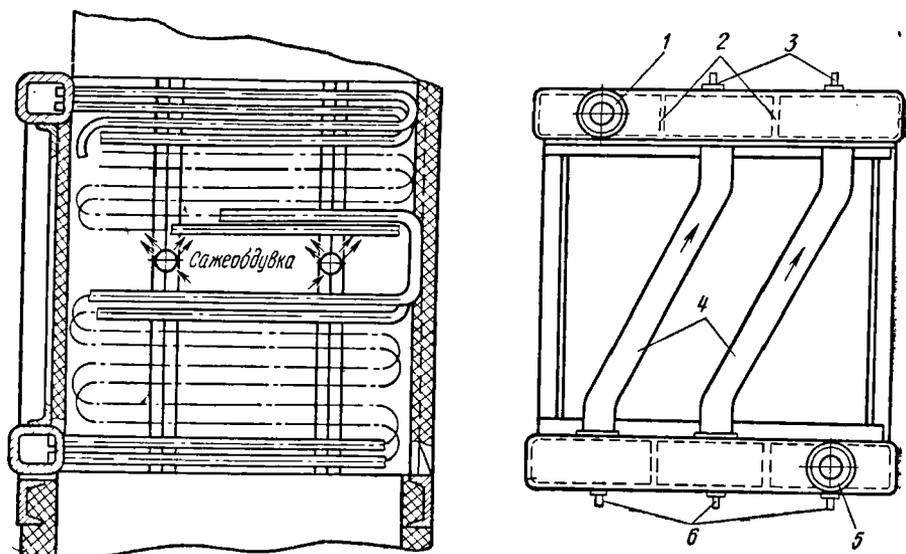


Рис. 51. Гладкотрубный змеевиковый экономайзер

Иногда для повышения эффективности теплообмена применяют специальные насадки в виде приварных плавников или круглых ребер, напрессованных на гладкие стальные трубы (рис. 52). Это улучшает теплоотдачу от газов к стенке, позволяет сократить габарит и массу экономайзера.

Ребристые экономайзеры дороже обычных гладкотрубных и подвергаются более интенсивному загрязнению золой и сажей. В некоторых экономайзерах переходные патрубки делают съемными (рис. 53), что упрощает очистку труб и их замену.

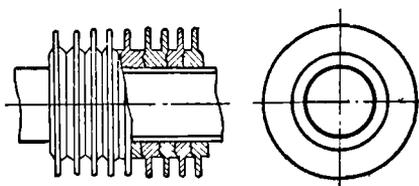


Рис. 52. Трубка экономайзера с насадными ребрами

Современные методы водоподготовки позволяют избежать отложений накипи на внутренних стенках труб экономайзера. Небольшие отложения можно удалить химической промывкой.

Гладкотрубные змеевиковые экономайзеры более просты, надежны в эксплуатации и не требуют специального оборудования при изготовлении, поэтому они широко распространены на морском флоте.

Эксплуатация водяных экономайзеров обычно не вызывает каких-либо осложнений, но при появлении течи в них котел следует немедленно вывести из действия.

При работе котла необходимо контролировать температуру воды, поступающей из экономайзера, и питательной. Температуру воды при выходе из экономайзера надо поддерживать в установленных пределах. Снижение ее наблюдается при внутренних и наружных загрязнениях труб. Регулярное включение обдувки труб

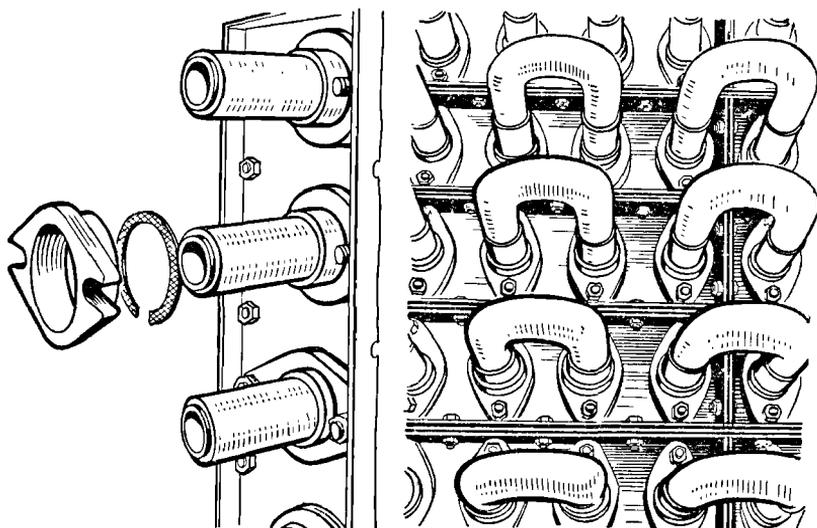


Рис. 53. Переходные патрубки судового ребристого экономайзера

экономайзера и очистка их от солей или масляных отложений с внутренней стороны способствует повышению к. п. д. котла, т. е. снижению расхода топлива. Выше нормальной температура воды после экономайзера может стать при догорании топлива перед экономайзером и загрязнении поверхности нагрева котла до экономайзера.

Для уменьшения коррозии труб экономайзера и увеличения срока его службы необходимо предотвращать питание котла необработанной водой и конденсацию водяных паров на наружной поверхности труб. Необработанная вода выделяет при нагревании кислород, который разрушает внутренние стенки труб. Наружная коррозия труб может возникнуть, как указывалось, при снижении температуры питательной воды или уходящих газов до точки росы. Поэтому при длительной работе котла на очень малых нагрузках, когда температура уходящих газов невелика, рекомендуется отключить экономайзер, питать котел по обводной магистрали, а экономайзер освободить от воды. Аналогичные меры должны быть приняты при пуске котла.

Если при работе котла возникнет пожар (загорание сажи) в хвостовых поверхностях нагрева, следует прекратить горение в топках, включить все аппараты паровой обдувки котельного агрегата и по возможности усилить подачу воды в экономайзер, наблюдая за уровнем воды в барабане котла. Такой пожар обычно более опасен для воздухоподогревателя.

Вышедшие из строя отдельные петли или змеевики экономайзера удаляют, а отверстия в коллекторах экономайзера или, что лучше, оставшиеся концы труб (если они не повреждены) заглушают нарезными пробками.

Трубы необходимо восстановить при очередном заводском ремонте котла.

§ 28. Воздухоподогреватели

Воздухоподогреватель обычно устанавливают непосредственно за экономайзером или после поверхности нагрева котла, работающего без экономайзера.

Функции воздухоподогревателя и обычных поверхностей нагрева котельного агрегата различны. Тепло, воспринятое воздухом от дымовых газов, не используется непосредственно для нагревания воды или парообразования, как, например, в экономайзере или пароперегревателе. Однако установка воздухоподогревателя имеет большое значение для повышения экономичности работы котла. Подогретый воздух поступает в топку, что способствует повышению температуры газов не только в ней, но и по всему газопотоку. В результате температура и скорость газов возрастают, процесс теплопередачи интенсифицируется, переходя на более «горячий» уровень. Коэффициент теплопередачи увеличивается. Вместе с тем растет и количество полезного тепла, воспринятое поверхностями нагрева собственно котла, пароперегревателя и экономайзера.

Повышение температуры воздуха, подаваемого в топку, ускоряет процесс воспламенения, увеличивает скорость и полноту сгорания топлива. В итоге температура уходящих газов снижается, а полезно воспринятое тепло и к. п. д. котла увеличиваются.

Воздухоподогреватели увеличивают к. п. д. судового котла на 4—5% и более, поэтому они широко распространены на судах морского флота.

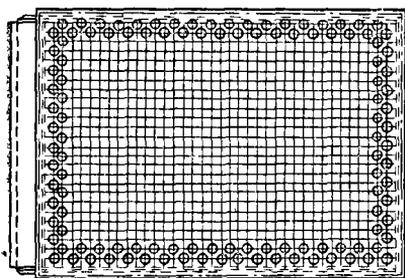
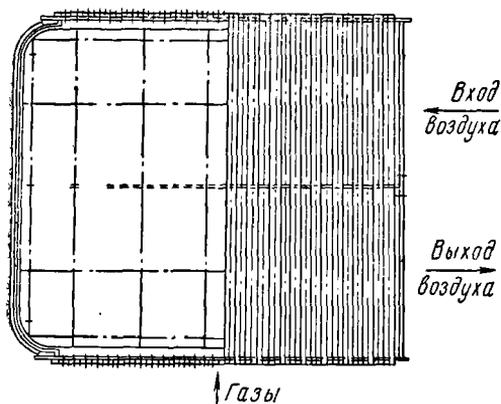
По принципу действия воздухоподогреватели разделяются на регенеративные и рекуперативные.

В регенеративных воздухоподогревателях стенки некоторой поверхности сначала нагреваются теплом дымовых газов. Потом вдоль этих стенок проходит воздух, нагревающийся от них.

На некоторых крупных зарубежных морских судах и военных кораблях применяют регенеративные воздухоподогреватели шведской фирмы «Юнгстрем». Основой такого воздухоподогревателя является медленно вращающийся (обычно от электропривода) барабан. В нем имеется много гофрированных пластин из тонкой

нержавеющей стали, составляющей поверхность нагрева воздухоподогревателя. Благодаря вращению барабана одна половина его поверхности нагрева непрерывно нагревается дымовыми газами, а вторая охлаждается, нагревая холодный воздух теплом дымовых газов.

Воздухоподогреватели типа «Юнгстрем» отличаются малым габаритом при большой эффективности теплообмена. Их устанавливают обычно по одному на группу из 2—4 котлов. Такие воздухоподогреватели сложны по устройству, требуют тщательного наблюдения и ухода, вследствие чего они пока не получили широкого распространения.



В рекуперативных воздухоподогревателях трубчатого типа горячие газы передают тепло воздуху через стенки труб.

Наиболее широко распространены гладкотрубные стальные воздухоподогреватели (рис. 54), изготовленные из труб диаметром 51, 48, 45, 38 или 32 мм.

На судах применяют как вертикальные, так и горизонтальные воздухоподогреватели. В последних газы идут между трубами, внутри которых проходит воздух.

Стенки труб воздухоподогревателя могут быть небольшой толщины, так

Рис. 54. Вертикальный двухпроточный гладкотрубный воздухоподогреватель

как трубы почти не испытывают нагрузки, за исключением собственной силы тяжести, а также силы тяжести стенок газохода. С учетом необходимого запаса на коррозию металла толщину стенок труб принимают равной не менее 1,5 мм. Трубы с толщиной стенки свыше 2,5 мм применять нецелесообразно, так как это приводит к неоправданному увеличению массы воздухоподогревателя.

Трубы 1 (рис. 55) воздухоподогревателей, как правило, устанавливают в трубных досках 2 с помощью сварки. Получаемая жесткая конструкция компенсируется креплением трубных досок, которое выполняют либо «плавающим», либо с компенсаторами 3.

В небольших воздухоподогревателях применяют и жесткое крепление трубных досок, которое, однако, нежелательно. Разная

температура труб и трубных досок приводит при жестком креплении и большой толщине стенки доски к разрывам сварных швов труб. Помимо утечек воздуха, это ведет к пожарам в воздухоподогревателе. В водотрубных котлах устанавливают двух- и трехходовые воздухоподогреватели по воздуху и по ходу газов (см. рис. 30), позволяющие довести температуру воздуха до 250°C и выше.

В течение последних лет на морских судах все шире применяют пластинчатые воздухоподогреватели с секциями, отлитыми из чугуна или специальных легких антикоррозионных сплавов (рис. 56). Газы идут снизу вверх, омывая ребра литых пластин, а воздух направляется между пластинами в поперечном по отношению к газам направлении. Пластины соединены между собой болтами и разделены асбестовыми прокладками.

Большим недостатком воздухоподогревателей из литых секций является трудность очистки их поверхностей. Поэтому для полной очистки приходится периодически полностью разбирать воздухоподогреватель.

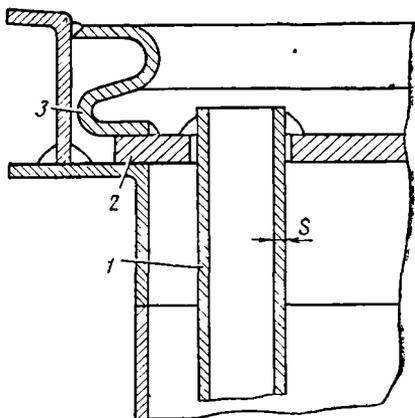


Рис. 55. Узел крепления трубной доски воздухоподогревателя

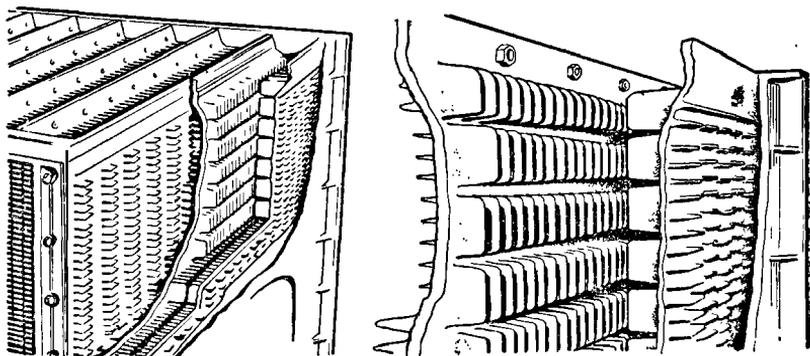


Рис. 56. Пластинчатый воздухоподогреватель с литыми секциями

Стремление избежать коррозии хвостовых поверхностей нагрева котла при всех режимах его работы на сернистых мазутах (см. § 27) привело к замене газовых воздухоподогревателей паровыми на многих отечественных и иностранных судах.

Для паровых воздухоподогревателей используют тепло конденсации пара отбора турбин. Пар поступает в трубы воздухоподогревателя при давлении 3—4 кгс/см² (в отдельных случаях до 8—10 кгс/см² для второй ступени парового воздухоподогревателя). Воздух проходит между трубами, которые для увеличения коэффициента теплоотдачи снабжаются ребрами (рис. 57, а).

Отдельные трубы монтируются в пакеты (рис. 57, б). Из разводящего паропровода 4 пар поступает к оребренным трубкам 2 малого диаметра, составляющим поверхность нагрева воздухопо-

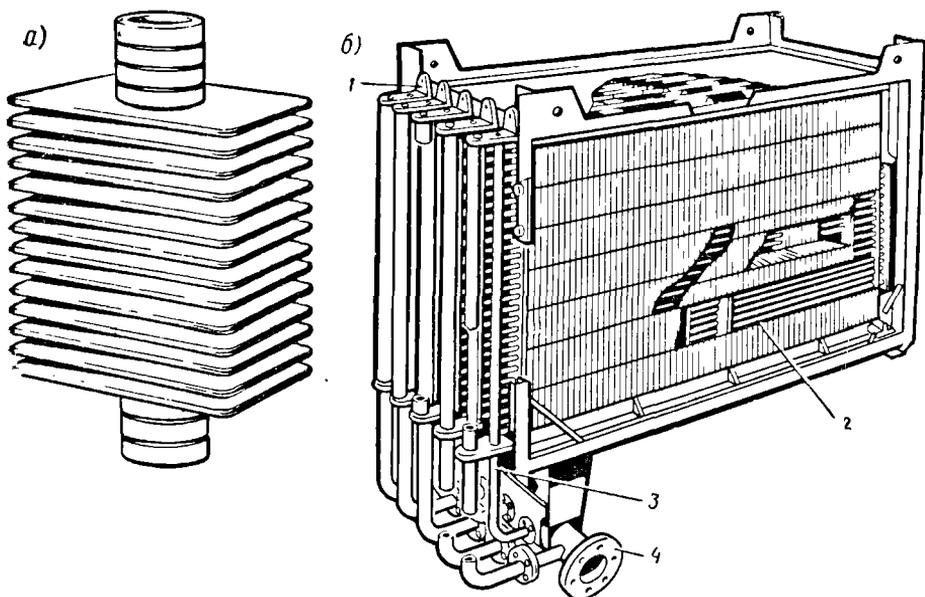


Рис. 57. Труба и секция парового воздухоподогревателя

догревателя. Конденсат по трубам 3 отводится к общему конденсационному горшку, снабженному автоматическим регулятором уровня конденсата. Штуцеры 1 служат для удаления воздуха из парового пространства воздухоподогревателя.

Применение паровых воздухоподогревателей не улучшает систему теплоиспользования, так как для подогрева воздуха расходуется тепло, затраченное на получение пара в котле. Температура уходящих газов при газовых воздухоподогревателях, как правило, ниже, чем за экономайзером котлоагрегата, работающего с паровым подогревом воздуха. Кроме того, паровой воздухоподогреватель дороже обычного гладкотрубного, так как требует применения паропроводов и паровой арматуры.

Эксплуатация газового воздухоподогревателя сводится к поддержанию в чистоте его поверхностей нагрева путем регулярной сажеобдудки, к очистке труб на стоянках и периодическому контролю плотности.

Глава VIII. ФУНДАМЕНТЫ, КАРКАСЫ И ИЗОЛЯЦИЯ

§ 29. Фундаменты и каркасы

Паровые котлы имеют большую массу и должны быть надежно закреплены на фундаментах. При качке, и особенно в шторм, надо регулярно, каждую вахту, осматривать крепления котлов.

Огнетрубные и комбинированные котлы, а также водяные коллекторы водотрубных котлов устанавливают на нескольких седлах (см. рис. 28), изготовленных из листовой стали Ст. 3 толщиной 10—15 мм. Седла приваривают или прикрепляют к котельному фундаменту, прочно соединенному с набором корпуса судна, или к самому набору.

Фундамент имеет прочную конструкцию и равномерно передает силу тяжести котла на несколько усиленных днищевых шпангоутов.

Котельные седла не должны перекрывать сварные или клепаные швы для возможности их осмотра.

Фундамент должен иметь упоры, предотвращающие перемещение котла в продольном направлении. Между корпусом котла и задними упорами оставляют зазор около 5—8 мм с учетом расширения металла от нагрева.

Для равномерного распределения давления котла на седла ставят прокладки из свинца. Если температура коллектора или корпуса котла не превышает 180—200°С, то в качестве прокладки можно применять асбестовое волокно с суриком в парусиновой обертке или только сурик.

Огнетрубные и комбинированные котлы притягивают к седлам хомутами, охватывающими их бочки. Кроме того, на корпусе имеются приваренные рымы, которыми его соединяют с соседними котлами и бортовым набором судна для того, чтобы препятствовать поперечному перемещению при бортовой качке.

Несколько конструкций опор для водотрубных котлов показано на рис. 58. Как видно из рисунка, прикрепленная к коллектору одна опора (лапа) *I* наглухо крепится к фундаменту, а остальные *II*, *III*, *IV* допускают возможность расширения коллектора в направлениях, указанных стрелками, одновременно препятствуя сдвигу (приварные полосы) и опрокидыванию (запечники прижимных планок) котла.

При другом методе одну лапу крепят болтами намертво, а у остальных отверстия для болтов делают овальными для свободного удлинения коллектора. Длинные барабаны крепят к одному среднему седлу приклепанными или приваренными угольниками, а на остальных двух седлах барабан лежит свободно на свинцовых прокладках.

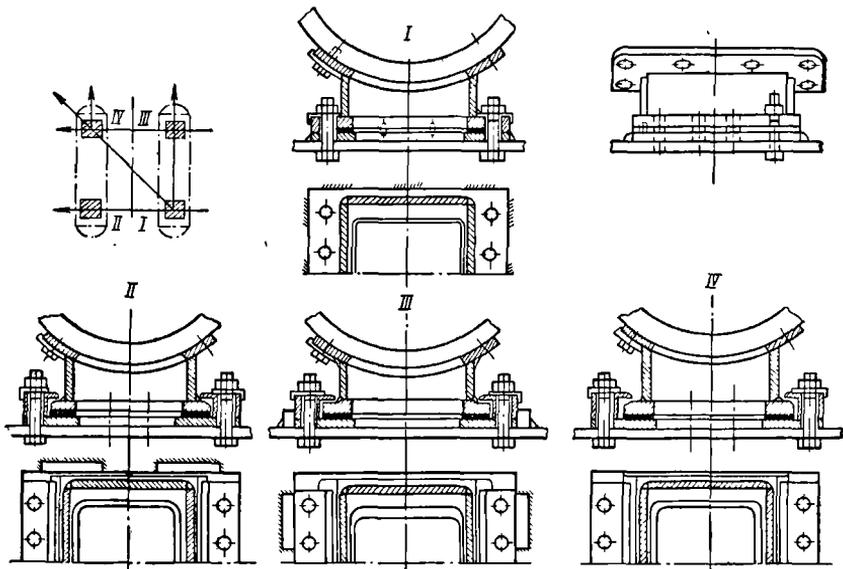


Рис. 58. Опоры водотрубного котла

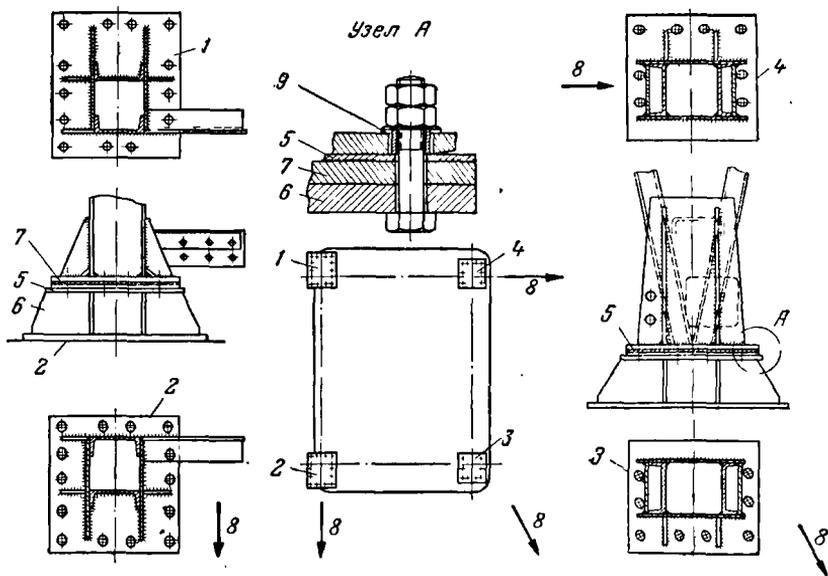


Рис. 59. Опоры каркаса водотрубного котла

План опор для несущего каркаса водотрубного котла показан на рис. 59. Опора 1 закреплена жестко, а опоры 2, 3 и 4 выполнены подвижными в направлении стрелок 8. Изменением толщины прокладок 5 можно регулировать правильную установку каркаса при его монтаже. Подвижность опор (узел А) обеспечивается овальностью отверстий под болты, поставленные со втулками 9 и соединяющие опоры каркаса 2, 3 или 4 с фундаментами 7 и 6, приваренными (или прикрепленными) к судовому набору.

Размещение котлов в котельном отделении судна должно полностью удовлетворять требованиям Регистра СССР. Не разрешается устанавливать под котлами танки для жидкого топлива. Должно быть соблюдено минимальное расстояние от нижней части топки или котла до второго дна и т. д. Эти требования, основанные на обобщении длительного опыта эксплуатации морских судов, гарантируют безопасную работу котлов.

Установленный на фундаменте каркас служит опорой для обмуровки и изоляции котла, воздухоподогревателя, экономайзера, части вспомогательного котельного оборудования и т. п. Каркас обычно изготовляют из фасонной катаной малоуглеродистой стали категории 3.

Для современных экранированных котлов каркас делают легким и крепят непосредственно к барабанам, которые вместе с водогрейными трубами представляют собой достаточно жесткую и надежную опору. Крепление каркаса также должно предусматривать температурные зазоры, так как температура стенки барабана не равна температуре каркаса.

Общий вид каркаса для двухбарабанного водотрубного котла представлен на рис. 60. С внешней стороны каркас покрывают кожухом. Части кожуха, находящиеся против пароперегревателя, лючков и других мест, требующих периодического осмотра, сделаны в виде съемных щитов.

Если каркас служит несущей конструкцией для самого котла или опорой для развитой хвостовой поверхности нагрева, то его устанавливают на фундамент, жестко соединенный с судовым набором.

Основные требования, предъявляемые к эксплуатации фундаментов и опор котлов, сводятся к продлению срока их службы путем регулярной очистки от грязи и мусора, окраски и своевременной замены дефектных штагов, талрепов и крепежных деталей.

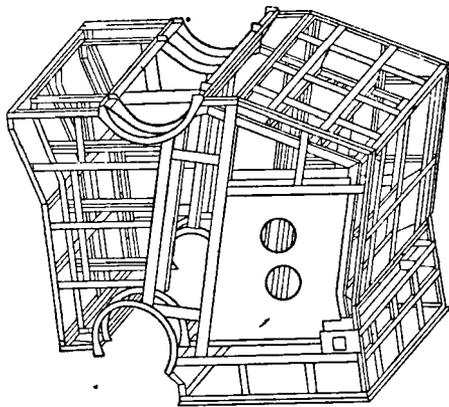


Рис. 60. Каркас водотрубного котла

§ 30. Обмуровка и изоляция

Работа парового котла сопровождается значительным выделением тепла в окружающую среду. Для обеспечения нормальных условий работы обслуживающего персонала и уменьшения потерь тепла во внешнюю среду все нагретые поверхности должны быть изолированы. В соответствии с Правилами Регистра СССР температура наружной поверхности изоляции котла и поверхности изоляции трубопроводов не должна превышать соответственно 50 и 60° С.

Наиболее сложна изоляция топочной камеры, выполненная в виде кладки из огнеупорного кирпича — обмуровки. Внутренняя часть обмуровки топки, соприкасающаяся с факелом, называется футеровкой.

Все стенки газоходов котла изолируют и покрывают кожухом, обеспечивающим необходимую герметичность газоходов. Обмуровку, изоляцию газоходов и кожух крепят на каркасе, соединенном с фундаментом котла и его барабанами (см. § 29).

Для обмуровки топок применяют огнеупорные и изоляционные кирпичи, фасонные огнеупорные массы и различные виды изоляционных материалов.

В настоящее время неэкранированные топки имеются у котлов старой конструкции или у вспомогательных котлов, где применение экранов нежелательно из-за усложнения конструкции котла.

В неэкранированных топках одной из основных задач обслуживания персонала является ремонт футеровки. В худших случаях, при неправильной технологии кладки, применении низкосортных огнеупоров и т. д. футеровка разрушается уже через 10—15 суток работы котла. В лучших случаях этот срок увеличивается до 1,5—2 лет при условии регулярного профилактического ремонта кладки.

Топочный экран резко снижает температуру топочных стен, расположенных за ним. Если для неэкранированных стен температура поверхности футеровки мало чем отличается от средней температуры газов в топке, то установка экрана с большим шагом труб снижает температуру поверхности футеровки примерно на 400—500° С. При сплошном экране температура стен за экраном не превышает температуры поверхности труб, т. е. вместо дорогих огнеупорных материалов можно применять обычные изоляционные.

Схема изоляции и обмуровки экранированной стены топки показана на рис. 61.

Топочный экран образован сплошным рядом труб 5, т. е. шаг $S_3 = 1,02 \div 1,05 d_3$. Трубы 4 являются опускными, т. е. вода из пароводяного барабана котла опускается по ним в коллектор экрана, откуда поступает в подъемные трубы 5.

Более рационально однорядное экранирование с шагом $S_3 = 1,8 \div 2 d_3$ и с необогреваемыми опускными трубами, так как тепловосприятие такого экрана мало отличается от сплошного при расходе металла, меньшем в 2 раза. Такой экран обеспечивает

температуру поверхности обмуровки не более 400—600° С, т. е. обмуровка 3 выполняется толщиной в $\frac{1}{4}$ кирпича с подслоем асбеста 2 или магнетитовых плит. Стальной кожух 6 обычно толщиной 3—4 мм служит одновременно каркасом топки и омывается воздухом. Наружная изоляция воздушных каналов состоит из щитов 1 толщиной 40—60 мм (асбест, шлаковата, совелит и т. д.).

При экранировании топки температура газов за топкой снижается (по сравнению с неэкранированной топкой при равных условиях), при этом иногда трудно достичь требуемой температуры перегретого пара. Увеличение же поверхности нагрева пароперегревателя, особенно расположенного внутри пучка водогрейных труб, далеко не всегда возможно.

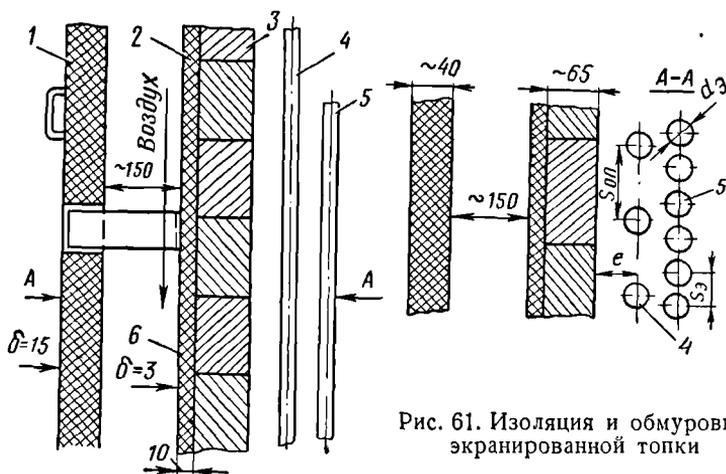


Рис. 61. Изоляция и обмуровка экранированной топки

Для повышения температуры газов перед первым пучком труб, а следовательно, и перед пароперегревателем трубы топочных экранов полностью или частично закрывают специальной пластичной огнеупорной обмазкой. При этом тепловосприятие труб снижается, а температура перегретого пара может быть доведена до требуемой без увеличения поверхности нагрева пароперегревателя. Такое «утепление» экранов способствует в некоторой степени более устойчивому горению мазутного факела при низких нагрузках топки.

Различные типы утепленных (ошипованных) экранов представлены на рис. 62. Для удержания пластичной огнеупорной обмазки 1 на трубы наваривают шипы 2 или пластинки 3 из малоуглеродистой стали.

Различная степень покрытия экранов позволяет в известной степени отрегулировать температуру газов за топкой. Частичное шипование применяют и у водогрейных труб для создания защитных мостиков перед креплением пароперегревателя или для изменения направления потока газов.

Огнеупорные кирпичи, блоки или различные пластичные огнеупоры (типа бетонов) крепят к стальным щитам, образующим наружную стенку изоляции топки. Обычно крепят не все кирпичи (или блоки), а только часть их; остальная часть кладки поддерживается за счет связующего раствора (мертеля). На некоторых котлах (например, типа КВГ) крепят болтом каждый огнеупорный блок футеровки, что обеспечивает ее надежность в условиях вибрации стенок топки, качки судна и т. д., но усложняет конструкцию футеровки.

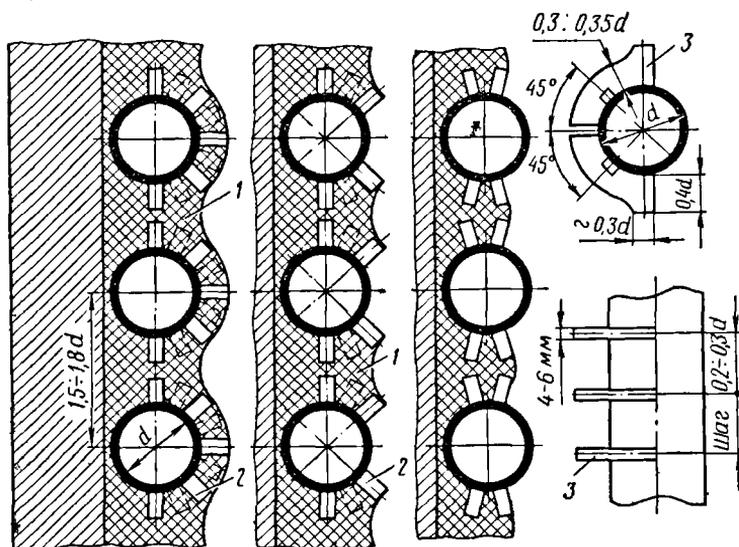


Рис. 62. Обмуровка топочных экранов

Некоторые виды креплений огнеупорных кирпичей и блоков представлены на рис. 63, а пластичных огнеупоров — на рис. 64.

В настоящее время имеется много видов креплений огнеупоров. Лучшие из них те, которые не имеют большого количества деталей и находятся в зоне относительно низких температур (300—500° С), т. е. достаточно удалены от поверхности футеровки.

Для крепящих болтов, крючьев, подвесок и т. п. рекомендуется применять жаростойкий чугун или жаростойкую сталь.

Конструкция обмуровки и изоляции в районе нижнего коллектора современного вертикального двухбарабанного котла показана на рис. 65, а. Под топки образован двумя рядами огнеупорных кирпичей 1 толщиной по 50 или 65 мм. Ниже кирпичей расположена насыпная или пластичная изоляция 4 и под ней листовая изоляция 5, уложенная на стальные листы 2. Пластичный огнеупор 6 защищает нижний коллектор 3 от действия топочных газов и направляет их поток к пароперегревателю 7.

Конструкция обмуровки и изоляции топки в районе коллектора экрана водотрубного котла представлена на рис. 65, б. В данном случае каждый огнеупорный блок 1 крепят к листу 2 каркаса котла, охлаждаемого воздухом в воздушном кожухе 3.

Для доступа в топку или газоходы котла в стенках газохода предусматривают люки, плотно закрываемые крышками. Обмуровка и изоляция этих крышек такие же, как и окружающих стен газохода.

К обмуровочным и изоляционным материалам, применяющимся на морских судах, предъявляют повышенные требования. Они должны обладать высокой прочностью, небольшой плотностью и низкой теплопроводностью. Изоляционные материалы не должны быть гигроскопичными или пожароопасными при любых температурах нагрева.

Материалы, применяемые для футеровки топок, должны иметь

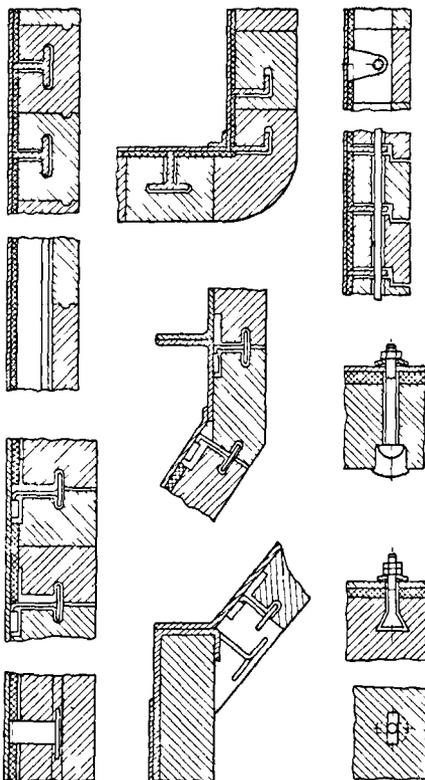


Рис. 63. Крепление огнеупоров к каркасу котла

высокую огнеупорность, обладать стойкостью по отношению к шлакам и не разрушаться при резких переменах температур. Кроме того, все огнеупорные и изоляционные материалы должны иметь невысокую стоимость.

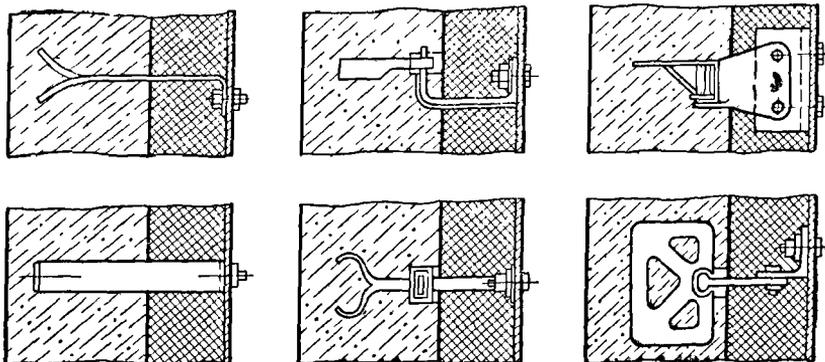


Рис. 64. Крепление жаропрочных бетонов и пластичных огнеупоров

Огнеупорные изделия подразделяют на огнеупорные (до 1770° С), высокоогнеупорные (до 2000° С) и высшей огнеупорности (свыше 2000° С).

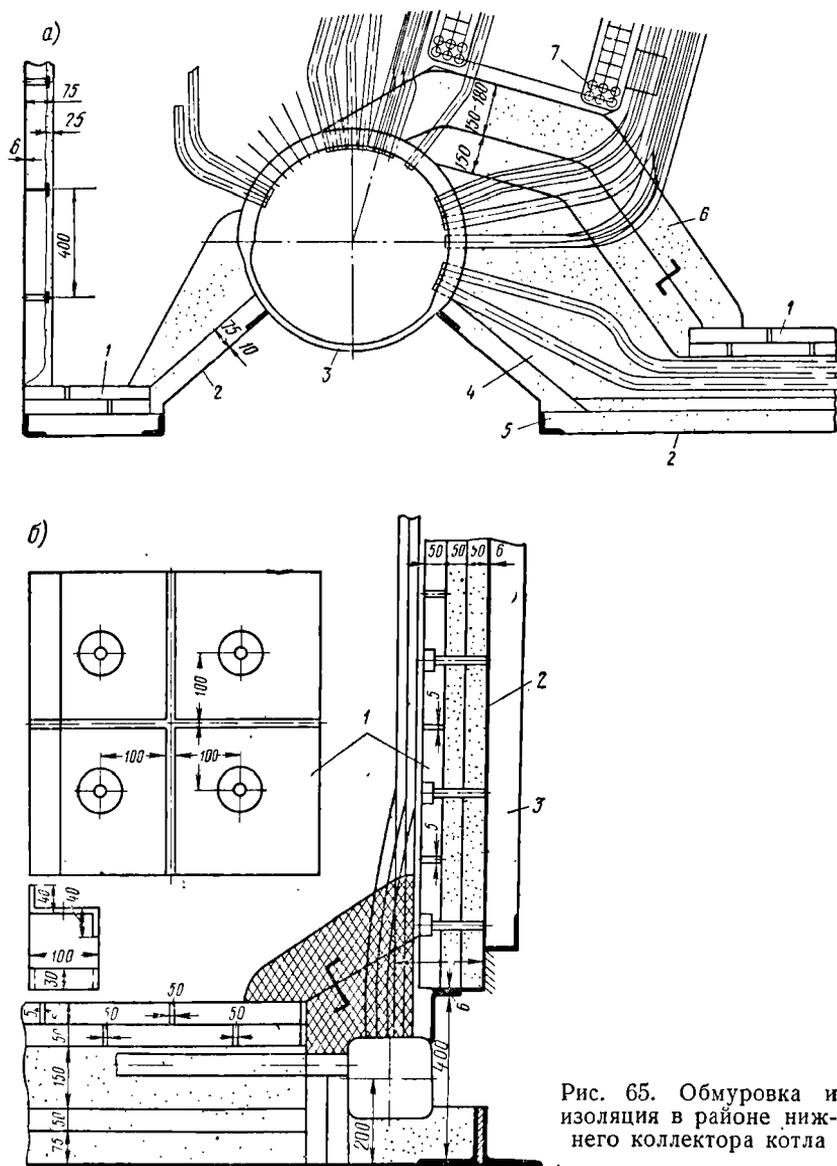


Рис. 65. Обмуровка и изоляция в районе нижнего коллектора котла

Керамические материалы для топок готовят на основе огнеупорных глин — продуктов выветривания горных пород, содержащих кремнезем SiO_2 и глинозем Al_2O_3 . Огнеупорные свойства глины улучшаются с повышением содержания Al_2O_3 . Содержа-

щиеся в глине примеси (окись железа, кальций и магний) ухудшают ее свойства после обжига. Поэтому для огнеупорных изделий предпочитают чистую каолиновую белую глину.

Специальные огнеупоры содержат магнезит MgO , хромит Cr_2O_3 , боксит, имеющий до 60% Al_2O_3 , цирконовую руду $ZrSiO_4$ и карборунд (до 90% карбида кремния SiC). Все эти материалы отличаются высокой огнеупорностью.

Качество и свойства огнеупорных материалов и изделий характеризуются их химическим составом, огнеупорностью (t_0), температурой начала деформации (t_d), термической стойкостью (T), пределом прочности при сжатии σ_d , усадкой (или расширением) при нагревании ($l, \%$), плотностью (γ), пористостью и другими характеристиками, регламентируемыми соответствующими ГОСТами или ТУ на поставку.

Характеристики определяют также в соответствии с ГОСТом. Например, огнеупорность изделий оценивается температурой t_0 , при которой трехгранная пирамидка высотой 30 мм, изготовленная из данного материала, размягчается и падает при нагреве в печи.

Температура начала деформации t_d — это температура, при которой образец (цилиндр высотой 50 мм, диаметром 36 мм) дает усадку 0,6% под влиянием нагрузки 2 кгс/см².

Термическая стойкость (или число теплосмен) T определяется сохранностью изделия без образования трещин в нем при определенном числе циклов нагрева и последующем резком охлаждении.

Дополнительная усадка l определяется как необратимое изменение размеров образца, выдерживаемого в печи при данной температуре в течение определенного времени.

В качестве футеровки применяют кирпичи сухой или пластичной формовки, набивные (трамбованные) массы, литые и плавильные фасонные изделия.

Шамотным кирпичом называется кирпич, изготовленный из смеси обожженной огнеупорной глины шамота с пластичной необожженной глиной. Кирпичи с большим содержанием шамота (80%) (многошамотные, или отощенные) отличаются высокой прочностью, но большой хрупкостью. Глиноземистые кирпичи имеют содержание Al_2O_3 30% и выше.

Огнеупоры, применяемые в топках, должны обладать малой пористостью, так как проникающие в поры жидкие шлаки и газы разъедают кирпич.

Специальные пористые легковесные кирпичи отличаются небольшой массой и малой теплопроводностью. Их применяют в качестве изоляционных (например, за сплошными экранами, в газодоходах с относительно низкой температурой).

Примерные характеристики основных марок отечественных огнеупоров в виде изделий (кирпичи, фасонные блоки) представлены в табл. 6. Многошамотный кирпич класса А, отличающийся большей прочностью и огнеупорностью, чем обычный шамотный,

Огнеупоры	ГОСТ или ТУ	Класс	$t_0, ^\circ\text{C}$	$t_d, ^\circ\text{C}$	T	$l, \%$	$\sigma_d,$ кгс/см ²	Содер- жание Al ₂ O ₃	$\gamma, \text{г/см}^3$
Многошамот- ные	1598—53	A	1750	1300	Не норми- руется	0,2	300—400	39	1,8—2
Каолиновые	7940—56	I	1740	1440	15	0,5	125	39	2—2,3
Высокоглино- земистые . .	1598—53	A	1800	1500	25	1,2	600	62	2,5—2,8
Высокоглино- земистые лег- ковесные . .	5040—68	—	1850	1300	10	1	350	80	1,4—1,5

применяют для незкранированных топок вспомогательных водотрубных котлов. Этот кирпич можно заменять каолиновым.

Для футеровки мазутных незкранированных топок вспомогательных котлов рекомендуется высокоглиноземистый легковес.

Для футеровки незкранированных стен высоконапряженных мазутных топок главных водотрубных котлов (типа КВГ и др.) применяют высокоглиноземистый кирпич класса А или многошамотный класса А. Для слоя, не соприкасающегося с огнем, рекомендуется применять легковесные огнеупоры.

Огнеупорный кирпич выпускают стандартных размеров: большой $250 \times 123 \times 65$ и малый $230 \times 112 \times 65$ мм. Кроме того, имеются стандартные клиновидные кирпичи (для топочных сводов и амбразур).

Жароупорные бетоны представляют собой пластичные массы из огнеупорных материалов с добавлением глиноземистого или портландского цемента. Бетон укладывают на заранее приготовленную арматуру (см. рис. 65, а). Заполненную бетоном форму затем просушивают и прогревают при самой малой нагрузке топки.

Преимуществом бетона является возможность получения поверхности любой формы и удобство ремонта путем вырезания, недостатком — меньшая термостойкость.

Толщину кладки определяют по стандартному размеру кирпича: кладка в один кирпич имеет толщину 250 мм, в половину кирпича — 125, в четверть кирпича — 65, в два кирпича — 500 мм и т. д.

При приемке огнеупорных изделий (кирпичей и блоков) обращают внимание на их внешний вид и размеры, регламентируемые ГОСТом. Кирпич не должен иметь трещин, искривлений, отбитых углов и т. д. Хранение огнеупорного кирпича под открытым небом не допускается. Применение огнеупоров без сертификата не рекомендуется.

Кирпич режут дисковой корундовой пилой и пригоняют на корундовом круге.

В последнее время часто из кирпичей делают только под топки. Амбразуры форсунок обычно собирают из литых готовых блоков: бетона с шамотом или термостойкими заполнителями.

Для выполнения кладки рекомендуется применять полужидкий раствор. Толщина швов должна быть минимальной (для футеровки не более 1,5—2 мм). Более толстые швы вызывают усадку всей кладки, так как усадка раствора после его сушки и затвердения составляет около 15%. При большой усадке нарушается крепление кирпичей и общая прочность кладки.

Характеристики сыпучих огнеупоров, из которых готовят растворы (мертели), регламентирует ГОСТ по химическому

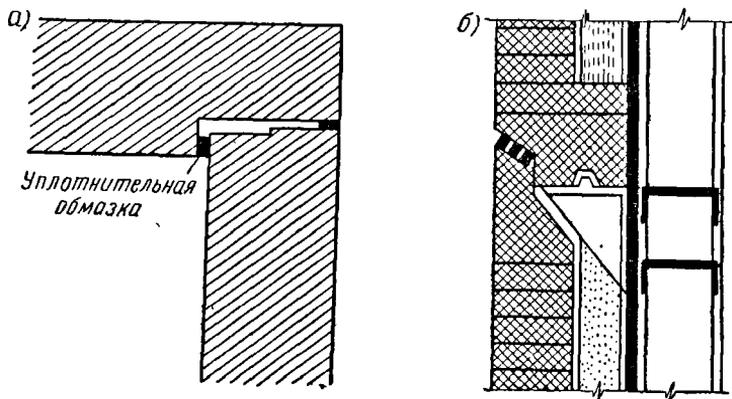


Рис. 66. Температурный зазор для угла футеровки; температурный зазор и разгрузочная опора вертикальной стенки футеровки

составу, огнеупорности и т. д. Состав мертеля должен приближаться к составу огнеупора: примерно 80% шамотной крупы, остальное — глина. Сухую смесь разводят водой, в которой растворен препятствующий выдавливанию мертеля пластификатор — сода или сульфитно-спиртовая барда.

Долговечность кладки во многом зависит от технологии ее выполнения, поэтому надо строго соблюдать правила кладки, следить за тем, чтобы не было бракованных кирпичей, толстых швов и т. д.

Для снижения температуры напряжений в кладке в углах топki предусматривают соответствующий температурный зазор из расчета 5—8 мм на 1 пог. м длины кладки (рис. 66, а). Зазор уплотняют асбестовым шнуром и смесью мертеля с 25—30% асбестовой ваты или графита.

При высоте стен более 1,5—2 м нижние кирпичи кладки рекомендуется разгружать промежуточной опорой, воспринимающей давление верхней части кладки и прикрепленной к каркасу котла (рис. 66, б).

Для увеличения срока службы футеровки ее покрывают огнеупорными обмазками, химический состав которых должен соответствовать составу огнеупора (при основной обмуровке — основная обмазка и т. д.). Обмазки изготовляют обычно из хромовой руды, шамота, графита, огнеупорной глины и т. д.; для связи добавляют жидкое стекло и воду.

Составляющие обмазки должны быть тщательно измельчены на шаровой мельнице и перемешаны до получения однородной массы, которую наносят на футеровку топок слоем до 3 мм кистью или при помощи специальных пистолетов. Перед обмазкой футеровку смачивают жидким стеклом, разведенным пополам с теплой водой.

На отечественных судах применяют обмазку О-1 (90% каолинового шамота, 10% огнеупорной глины и сверх того 12% жидкого стекла и 18% воды) и хромитовую обмазку ПХМ. Обмазку О-1 поставляют в готовом виде в герметичной таре (на воздухе твердеет); обмазку ПХМ — в виде порошка.

На судах также применяют иностранные обмазки «Бриксил», «Дру» и др., поставляемые фирмами в виде жидких паст, готовых к употреблению.

Под действием факела обмазки образуют глазурь и защищают поверхность футеровки от проникновения газов и шлаков, значительно увеличивая срок ее службы. Обмазки восстанавливают обычно через 3—6 месяцев работы котла.

Обмазки всех типов применяют также для мелкого ремонта футеровки, заделки трещин, сбитых углов и т. д.

Разжигать топку можно сразу же после нанесения обмазки.

Бараны, экранные коллекторы и другие металлические части котла, подвергающиеся воздействию топочных газов, торкретируют огнеупорным составом толщиной 50—100 мм. Перед торкретированием больших гладких поверхностей на них наваривают шипы или ребра из малоуглеродистой стали для отвода тепла от торкрета и лучшего схватывания его с поверхностью. После нанесения торкрет следует медленно просушить, чтобы он не растрескался.

Для обмазок и торкретирования топочных экранов, газовых перегородок и т. д. наши заводы выпускают пластичную хромитовую массу ПХМ, состоящую из тонкоразмолотого хромистого железняка (руда) и 3—5% молотой огнеупорной глины. Огнеупорные пластичные массы применяют также для ремонта кладки.

После выполнения кладки и торкретирования труб, коллекторов кладка должна быть высушена сначала проветриванием, а затем с помощью костра из дров, разводимого в топке. Чем толще стены кладки, тем медленнее следует ее прогревать. На нагревание кладки до 120—150°С обычно затрачивают 12—20 ч; после достижения этой температуры скорость прогревания увеличивают (можно зажечь одну форсунку).

Сушка — весьма ответственная операция, при которой удаляется 7—12% воды. Общая продолжительность сушки новой кладки незкранированных котлов составляет до 32 ч и более.

На сохранность кладки большое влияние оказывают, помимо качества ее исходных материалов и технологии самой кладки, условия эксплуатации. Вредны резкие перемены температуры в топке, прорывы холодного воздуха, переменные режимы работы.

Для изоляции барабанов, коллекторов и стен газоходов котла применяют легкие и малотеплопроводные изоляционные материалы. Примерные характеристики некоторых изоляционных материалов приведены в табл. 7. Как видно из таблицы, изоляционные материалы поставляют (и применяют) в виде засыпной изоляции (порошка) плит, шнура, листа, блоков и т. д.

Таблица 7

Материал	Объемная масса, кг/м ³	Тепло-стойкость	Коэффициент теплопроводности, ккал м·ч·°С
Минеральная вата	200	600	0,04 (1+0,0039)
Формованные изделия из минеральной ваты ФМВ-I	300	600	0,08 при 100 °С
Стекловата и маты из нее	200	450	0,03 (1+0,0038)
Совелит	500	400	0,09 при 100°С
Совелитовые плиты	500	400	0,07 (1+0,0008)
Ньювель	350	350	0,07 при 100°С
Вермикулит обожженный (засыпная изоляция)	150	1100	0,07 (1+0,0028)
Диатомитовые изделия	200	600	0,11 (1+0,0018)
Асбокартон	1400	600	0,13 +0,00012
Асбобумага	до 1250	500	0,12 —0,5 при 100°С
Асбопушшнур	300—600	400	0,13 при 100°С
Асбозурит	650	900	0,14 при 100°С
Асбоволокно	—	800	—

При изоляции барабанов и коллекторов необходимо предусматривать съемную изоляцию (маты) в тех местах, которые требуют регулярного осмотра (швы, наварыши) и предъявления инспектору Регистра.

В простейшем случае барабаны (преимущественно оборотных котлов) изолируют смесью из асбоволокна и шамотной глины. Такая изоляция относительно дешева, но низкого качества (большие толщина и масса, относительно высокая теплопроводность).

Крепление изоляции на стенках газоходов и укладка ее на поду топки (под футеровкой) видны из рис. 65.

Для сохранения прочности изоляцию покрывают тонкими железными листами (лучше оксидированными) или парусиной. Трубопроводы изолируют асбопушшнуром, асбобумагой или совелитовыми, вермикулитными и другими изделиями в виде полуцилиндров и покрывают сверху тонкой жстью, стянутой обручами, или обшивают парусиной с последующей ее окраской.

Уход за кирпичной обмуровкой топок очень важен. Ее состояние во многом определяет возможность форсировки и срок службы котла между ремонтами. Ремонт обмуровки составляет значительную часть расходов по ремонту водотрубных котлов.

Во время работы котла обмуровка подвергается действию высоких переменных температур, что вызывает ее тепловую деформацию и может явиться причиной повреждений.

При изменении теплового режима топки (увеличении или уменьшении количества сжигаемого топлива) быстрее всего изменяется температура наружных слоев футеровки, обращенных к топке. Это вызывает неравномерность ее расширения по толщине. Следовательно, резкие колебания температуры при подъеме пара и остывании котла, касании факелов, потухании форсунок, изменении нагрузки топки могут вызвать повреждения обмуровки.

Просачивающийся в топку холодный воздух или перегрев обмуровки при избыточном давлении в топке также могут привести к деформации обмуровки и повреждению кирпичей и швов. Повреждения особенно часто возникают при недоброкачественно изготовленной обмуровке.

К наиболее частым повреждениям (до 60% случаев) обмуровки относится эрозия, т. е. износ ее поверхности, оплавление кирпичей, трещины, откалывание кусков и даже выпадание целых кирпичей. Эрозия обмуровки наблюдается на горизонтальных переборках и сводах, омываемых потоком газа, и в местах просачивания газов или воздуха. Прилипающий к поверхности футеровки топок жидкий шлак, проникая в поры и трещины футеровки, вступает в химическое взаимодействие с огнеупором и разрушает его. Этот процесс происходит интенсивно, так как зола мазута содержит соли натрия и калия, образующие легкоплавкие шлаки.

Трещины футеровки возникают вследствие резких изменений температуры, например при пропусках холодного воздуха или во время маневров при выключении нескольких форсунок. Очень опасно попадание воды на горячую футеровку. Испаряясь, вода отбирает много тепла и сильно охлаждает огнеупор. Причинами трещин могут быть также плохое качество кирпича, чрезмерная нагрузка от тяжести верхних слоев кирпичей или нажатия металлических частей, плохая разделка температурных швов или перегорание крепежных деталей и попадание на раскаленную кладку воды при течи труб.

Трещины проходят либо в углах, либо поперек кирпичей, а также в кольцах форсуночных амбразур. Трещины пода возникают при охлаждении топки. Футеровка нередко повреждается и при удалении с нее шлаковых наростов.

Особенно опасны для обмуровки ускоренный подъем пара или быстрое остывание котла. После вывода форсунок из действия необходимо тщательно закрыть и уплотнить все отверстия, через которые в котел может проникнуть холодный воздух. Не следует также без особой нужды и надолго открывать различные люки и «глазки» (смотровые отверстия) в топке.

Во время эксплуатации котельного агрегата необходимо постоянно наблюдать за состоянием обмуровки для своевременного обнаружения трещин и других повреждений. Особенно внимательно надо следить за обмуровкой, защищающей нижние коллек-

торы и водогрейные трубы, швы коллекторов и секционные камеры, а также за чистотой температурных швов и температурных зазоров в местах прилегания обмуровки к металлу. Такие места уплотняют асбестовым шнуром.

Образовавшиеся в обмуровке трещины расширяют киркой, смачивают водой и плотно заделывают огнеупорной массой. Кирпичи с большими трещинами заменяют. Обмуровку перекаладывают кирпичом той же марки. Менее значительные повреждения и выгоревшие места можно заделывать смесью шамотного порошка и огнеупорной глины или массой ПХМ с последующей трамбовкой деревянным молотком.

В современных котлах предусмотрена работа топки под избыточным давлением. Такие котлы имеют, как правило, экранированные топки и сварной кожух.

Все неплотности в кожухе или наружной обмуровке котла следует устранять.

Глава IX. ТЯГА И ТЯГОДУТЬЕВЫЕ УСТРОЙСТВА

§ 31. Тяга и сопротивление газоздухопроводов

Одним из основных условий устойчивого горения топлива должен быть непрерывный подвод воздуха к очагу горения и непрерывный отвод газообразных продуктов горения. Воздух подается к топке по газоздухопроводам, а газообразные продукты горения — топочные газы — удаляются по газоходам.

При передвижении воздуха или газов по газоздухопроводам возникают различные сопротивления: трение о стенки газоздухопровода и местные сопротивления, возникающие при поворотах, внезапных изменениях сечения газоходов и т. п. Для их преодоления необходимо затрачивать определенную энергию. Важно добиться такого перемещения потоков воздуха и газов в котельном агрегате, чтобы расход энергии на это перемещение был минимальным, а теплоотдача от газов к поверхности нагрева — наибольшей.

Перемещение любых объемов газа или воздуха возможно под действием каких-либо внешних сил. К ним относятся естественная тяга, возникающая вследствие различной плотности горячего газа и холодного воздуха, или принудительное перемещение потока с помощью различных тягодутьевых устройств: вентиляторов, дымососов и т. п.

В котельной практике величину давления или разрежения часто измеряют при помощи U-образной трубки, заполненной водой, которую подкрашивают для лучшей видимости уровня. Приборы с такими трубками называют тягомерами (рис. 67). Высота столба в трубке, подсоединенной к газоходу или газоздухопроводу, будет указывать величину разрежения (или давления). Если оба

колена тягомера подсоединить к каким-либо двум точкам газохода или воздухопровода, то разность уровней будет определять сопротивление этого участка между двумя точками подключения.

Разрежением S называют разность между барометрическим давлением B и статическим давлением p в газоходе, т. е. $S = B - p$ мм вод. ст. (или мм рт. ст.)¹, откуда статическое (абсолютное) давление в газоходе

$$p = B - S.$$

Если например, показание тягомера, подключенного к газоходу, составляет $S = 10$ мм рт. ст., а барометрическое давление $B = 750$ мм рт. ст., то абсолютное давление газов в данной точке газохода

$$p = 750 - 10 = 740 \text{ мм рт. ст.}$$

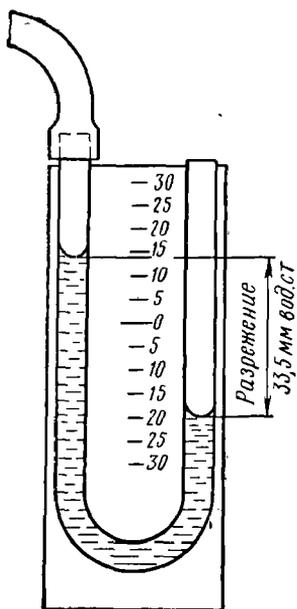


Рис. 67. U-образный тягомер

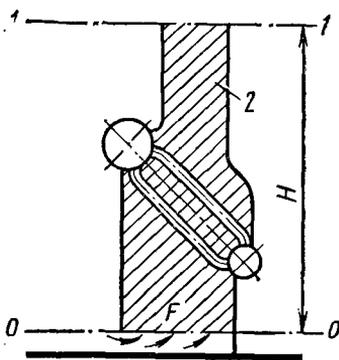


Рис. 68. Схема естественной тяги

Определим величину естественной тяги котла (рис. 68). Для упрощения допустим, что горячие газы внутри газоходов котла имеют одинаковую во всех точках температуру и занимают пространство, ограниченное сечениями $0-0$ и $1-1$, т. е. от пода топки до среза дымовой трубы. Давление горячих газов в сечении $0-0$ на некоторую площадку F будет $H\gamma_2$ кгс/м² (где H — высота газохода, м; γ_2 — плотность газов, кг/м³).

С другой стороны, на ту же площадку F будет действовать давление холодного воздуха, равное $H\gamma_{х.в.}$ (где $\gamma_{х.в.}$ — плотность холодного воздуха, кг/м³). Так как $\gamma_{х.в.} > \gamma_2$, то воздух будет вытеснять горячие газы из газохода с силой h_c кгс/м² (мм вод. ст.):

$$h_c = H\gamma_{х.в.} - H\gamma_2.$$

или

$$h_c = H(\gamma_{х.в.} - \gamma_2).$$

¹ Напомним, что $\text{кгс/см}^2 = 736 \text{ мм рт. ст.} = 10\,000 \text{ мм вод. ст.} = 98\,100 \text{ Н/м}^2 = 0,981 \text{ бар}$.

Величину h_c называют силой естественной тяги, или самотягой.

В действительности температура газов и, следовательно, их плотность не одинаковы на отдельных участках газохода, поэтому полная величина самотяги H_c (мм вод. ст.) для всего котла будет равна:

$$H_c = \sum_{i=1}^{i=n} h_{ci}, \quad (45)$$

где n — число участков газохода с примерно одинаковой температурой газов.

Самотяга такого участка

$$h_{ci} = H_i (\gamma_{x.в} - \gamma_i), \quad (46)$$

где H_i — высота данного участка, м;

γ_i — средняя плотность газов на данном участке, кг/м³.

Плотность воздуха и газов зависит от температуры:

$$\gamma_{x.в} = \gamma_0 \frac{273}{273 + t_{x.в}} \text{ кг/м}^3$$

и

$$\gamma_i = \gamma_2 \frac{273}{273 + v} \text{ кг/м}^3,$$

где $\gamma_0 = 1,293$ кг/н. м³ — плотность воздуха при нормальных физических условиях;

$t_{x.в}$ — температура холодного воздуха (обычно принимают 20° С);

v — средняя температура газов на участке, °С.

Величину γ_i (плотность газов при нормальных физических условиях) можно в среднем принимать равной 1,34 кг/н. м³.

Тогда

$$\gamma_{x.в} = 1,293 \frac{273}{273 + 20} = 1,2 \text{ кг/м}^3;$$

$$h_{ci} \approx H_i \left(1,2 - 1,34 \frac{273}{273 + v} \right) \text{ мм вод. ст.} \quad (47)$$

Величину v принимают по данным теплового расчета котла или непосредственно измеряя ее. Обычно v считают равной средней арифметической температуре газов на входе t_1 и выходе t_2 из данного газохода, т. е.

$$v = 0,5 (t_1 + t_2).$$

Если газы на данном участке газохода движутся сверху вниз, то величину h_{ci} подставляют в формулу для определения H_c со знаком минус.

При расчете тяги обычно газоход разбивают на следующие участки:

от топочных заслонок до первого ряда водогрейных труб;

пучок водогрейных труб вместе с расположенным в нем пароперегревателем (причем для трехходовых котлов можно считать, что самотяга первого и второго газоходов взаимно уравновешена);

хвостовые поверхности нагрева, т. е. от последнего ряда водогрейных труб до верхней трубной доски воздухоподогревателя.

Самотягу дымовой трубы (от воздухоподогревателя до среза трубы) подсчитывают отдельно.

При расчете средней температуры газов следует учитывать охлаждение газов в дымовой трубе. Для подсчета охлаждения газов в трубе на 1 м ее высоты применяют эмпирическую формулу ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$):

$$\Delta t = \frac{2}{\sqrt{D}},$$

где D — суммарная паропроизводительность всех котлов, подключенных к трубе, т/ч.

Следовательно, температура газов на выходе из трубы $t_{\text{вых}}$ $^{\circ}\text{C}$ будет:

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{yx}} - \Delta t H_{\text{тр}}$$

и средняя температура газов в трубе $v_{\text{тр}}$ $^{\circ}\text{C}$:

$$v_{\text{тр}} = 0,5(t_{\text{yx}} + t_{\text{вых}}).$$

Из приведенных выражений следует, что сила естественной тяги будет тем больше, чем выше дымовая труба, ниже температура наружного воздуха и выше средняя температура газов.

Высота трубы ограничивается условиями архитектуры судна, а повышение средней температуры газов возможно только при увеличении температуры уходящих газов, что невыгодно, так как при этом возрастают потери тепла. Между тем при недостаточной естественной тяге в топку поступит меньше воздуха, чем необходимо, т. е. расчетная паропроизводительность котла не будет достигнута.

Сила тяги расходуется на преодоление сопротивлений и сообщение потоку газов определенного ускорения (приращение живой силы потока). Последняя составляющая пренебрежимо мала, поэтому можно записать следующее основное условие надежной работы котла при наличии только естественной тяги:

$$H_c > \sum_{i=1}^{i=n} h_i,$$

где h_i — сопротивление участка газохода;

n — количество этих участков.

Если это условие не выполняется, то либо требуемая паропроизводительность котла не будет достигнута, либо прибегают к установке тягодутьевых устройств.

Соппротивление любого газозовдухопровода определяют как сумму местных соппротивлений и соппротивлений трений, т. е.

$$h = \Delta h_m + \Delta h_{тр}, \quad (48)$$

где Δh_m — сумма местных соппротивлений участков газозода, мм вод. ст.:

$$\Delta h_m = \sum_{i=1}^{i=n} \zeta_i \frac{\gamma_i \omega_i^2}{2g}; \quad (49)$$

$\Delta h_{тр}$ — сумма соппротивлений трений участков газозода длиной l_i м каждый, мм вод. ст.:

$$\Delta h_{тр} = \sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \frac{l_i}{d_{эi}} \frac{\gamma_i \omega_i^2}{2g}. \quad (50)$$

Число n участков, для которых подсчитывают местные потери напора, зависит от конструкции котельного агрегата. К таким участкам относятся повороты, места изменения поперечных сечений газозода или воздухопровода, проход потока через заслонки и решетки, выход потока из газозода или вход внутрь его и т. д.

Величины плотности и скорости (γ_i , кг/м³ и ω_i , м/с) определяют для каждого отдельного i -участка, имеющего различную конфигурацию, температуру или скорость потока.

Эквивалентный диаметр газозода или воздухопровода $d_{эi}$ (м) определяют по формуле.

$$d_{эi} = \frac{4F}{u},$$

где F — площадь поперечного сечения газозода, м²;

u — периметр газозода или воздухопровода, омываемый потоком, м.

Коэффициенты местных соппротивлений, зависящие от типа местного соппротивления ζ_i , и соппротивлений трения λ_i , зависящие от критерия R_e , определяют по формулам, таблицам или номограммам, построенным по опытным данным.

Соппротивления пучков труб испарительных, перегревателя, экономайзера и воздухоподогревателя рассчитывают также при помощи специальных номограмм, обобщающих данные многочисленных опытов. Эти номограммы построены для шахматных и поперечных пучков и для поперечного и продольного их омывания.

Из рассмотренных соотношений видно, что скорость потока воздуха или газов оказывает решающее влияние на соппротивление газозовдухопроводов. Если, например, уменьшить каждую сторону воздухопровода (или газозода) квадратного или прямоугольного поперечного сечения в 2 раза, то площадь поперечного сечения уменьшится в квадрате, т. е. в 4 раза. Соответственно при том же расходе воздуха или газа увеличится в 4 раза и скорость потока, а соппротивление газозода или воздухопровода возрастает

в 16 раз, поскольку сопротивление прямо пропорционально квадрату скорости потока.

Местные сопротивления в значительной степени зависят и от конструкции газозоводопроводов. Например, сопротивление поворота с плавным внутренним закруглением может быть в 3 раза меньше, чем поворота без закругления.

Длина воздухопровода должна быть по возможности короткой, а число резких поворотов — минимальным. Поэтому вентиляторы обычно устанавливают непосредственно у воздухоподогревателя.

Фланцы газозоводов и воздухопроводов должны обеспечивать достаточную герметичность и предотвращать утечки воздуха или газов. Стенки газозоводов и воздухопроводов горячего воздуха изолируют асбестом, стекловатой или специальными блоками и покрывают тонколистовой сталью или парусиной.

При монтаже воздухо- и газопроводов предусматривают возможность их свободного теплового расширения. Сопротивление правильно спроектированных воздухопроводов вместе с одноходовым воздухоподогревателем обычно не должно превышать 20—40 мм вод. ст., а при двух- и трехходовом воздухоподогревателе — 60—70 мм вод. ст. Сопротивления топочных устройств оценивают на основе опыта эксплуатации топков. Оно может колебаться в очень широких пределах от 10—15 до 100—1500 мм вод. ст. и более (для топков, работающих с большими тепловыми нагрузками).

§ 32. Регулирование тягодутьевых устройств

Все современные котлы имеют большие хвостовые поверхности нагрева, и температура уходящих газов составляет 130—160° С. При этих условиях самотяга, как правило, не может преодолеть все сопротивления газозоводов котла, поэтому приходится устанавливать специальные тягодутьевые устройства.

Искусственную тягу с отсосом газов можно, например, создать вентиляторами и дымососами. С помощью дымососов можно преодолеть и сопротивление топочного фронта при мазутном отоплении. Однако в этом случае в топке и во всех газозоводах котла будет значительное разрежение. В результате увеличатся подсосы холодного воздуха, ухудшится теплообмен на поверхностях нагрева котла, что потребует установки дымососа большой мощности.

Иногда применяют комбинированную тягу, при которой сопротивление воздухопроводов и топочного устройства преодолевают вентилятором, а сопротивление газозоводов — дымососом. На современных судах чаще устанавливают только вентилятор; при этом газозоводы котла работают под небольшим избыточным давлением (стенки газозоводов должны быть герметичными).

У таких котлов роль дымовой трубы сводится в основном к отводу газов на достаточную высоту от палубы судна, что особенно важно для пассажирских судов и танкеров. При строительстве

судов или серий судов рациональную форму кожуха трубы определяют после продувки нескольких моделей в лаборатории.

Производительность Q_B ($\text{м}^3/\text{ч}$) котельного вентилятора можно определить по выражению

$$Q_B = K_1 \frac{V_\alpha \sum B (273 + t_{x,в})}{273}, \quad (51)$$

где $K_1 = 1,2 \div 1,25$ — коэффициент запаса производительности, учитывающий утечки воздуха из воздухопровода и возможность форсировки котла;

V_α — фактическое количество воздуха на 1 кг топлива, н. $\text{м}^3/\text{кг}$;

$\sum B$ — суммарный расход топлива для всех котлов, обслуживаемых данным вентилятором, $\text{кг}/\text{ч}$;

$t_{x,в}$ — температура холодного воздуха на всасе вентилятора (обычно Q_B определяют при $t_{x,в} = 20^\circ \text{C}$).

Напор вентилятора H_B (мм вод. ст.) должен обеспечить преодоление всех сопротивлений воздухопровода, топочного устройства и газоходов котла, т. е.

$$H_B = K_2 (\Delta h_B + \Delta h_T + \Delta h_G - H_C), \quad (52)$$

где K_2 — коэффициент запаса по напору;

Δh_B и Δh_T — сопротивления воздухопроводов и топочного устройства, мм вод. ст.;

Δh_G — полное сопротивление газоходов котла, мм вод. ст.;

H_C — самотяга газоходов и дымовой трубы, мм вод. ст.

Мощность N (кВт) привода вентилятора определяют по формуле

$$N = K_3 \frac{Q_B H_B}{3600 \cdot 102 \eta}, \quad (53)$$

где Q_B — производительность вентилятора, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$K_3 = 1,1 \div 1,15$ — коэффициент запаса по мощности привода;

η — к. п. д. вентилятора (около $0,7 \div 0,65$).

Для привода вентиляторов и дымососов на морских судах используют чаще всего электродвигатели, которые не могут изменять частоту вращения или изменяют ее в недостаточных пределах. Поэтому устанавливают двух- или трехскоростные электродвигатели, что обеспечивает более широкий диапазон регулирования.

В пределах каждой частоты вращения вентилятора его производительность и напор можно регулировать прикрытием заслонок (шиберов) на напорной или всасывающей магистрали. Последний вид регулирования более экономичен и осуществляется с помощью жалюзийных веерообразных лопаток, устанавливаемых на всосе вентилятора (рис. 69).

На судах применяют групповую и индивидуальную установки вентиляторов и дымососов. Последняя более экономична и требует меньше места (см. рис. 69).

Позиции на рисунке означают: 1 и 21 — котлы КВГ-34 левого и правого бортов; 2 — присоединительный патрубок котла; 3 — приварыш для дымомера; 4 — патрубок-тройник; 5 — указатель положения заслонки; 6 и 20 — ограничительные болты для установки заслонки в горизонтальное и вертикальное положения; 7, 13, 13, 19 — конечные выключатели; 8 — компенсатор; 9 — нагнетательный патрубок вентилятора; 10 и 12 — вентиляторы левого и правого бортов; 11 — дымовая труба; 14 — горизонтальный патрубок; 15 — подвеска; 16 — горловина; 17 — ручной привод управления заслонкой.

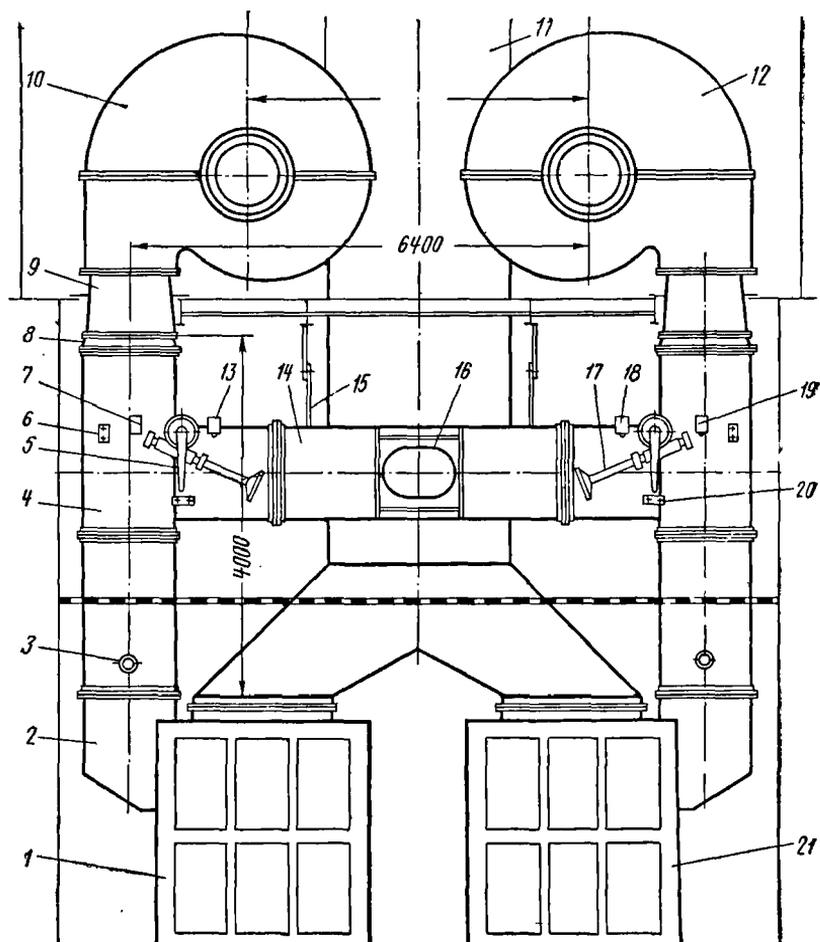


Рис. 69. Расположение котельных вентиляторов и установка воздухо-трубопроводов на танкере типа „София“

При управлении дутьем и тягой изменяют подачу воздуха в топку в соответствии с количеством сжигаемого топлива так, чтобы обеспечить наиболее выгодное соотношение между количеством сжигаемого топлива и подаваемого в топку воздуха.

При увеличении нагрузки котла сначала надо усилить подачу воздуха, а затем подачу топлива. Если изменение подачи воздуха

будет следовать за изменением количества подаваемого к форсункам мазута, возникнет дымление из-за недостатка воздуха в первые моменты регулировки.

Дутье и тягу регулируют вручную или при помощи автоматических устройств.

К наиболее неэкономичным методам относится изменение подачи воздуха степенью прикрытия шиберов на напорном воздухопроводе. В этом случае значительная часть энергии вентилятора бесполезно расходуется на преодоление сопротивления шибера.

При управлении тягой и дутьем необходимо постоянно контролировать изменение давления воздуха и газов в основных точках воздухопровода и газохода котла. Такими основными точками являются, воздухопровод перед воздухоподогревателем; воздушный короб перед форсунками; топочное пространство котла; газоход, расположенный непосредственно за последней поверхностью нагрева котельного агрегата (экономайзер или воздухоподогреватель).

Давление, разрежение или их перепад измеряют чаще всего с помощью тягомеров, которые располагают на щите контрольно-измерительных приборов котлоагрегата и подключают к местам замера давления стальными трубками диаметром 8—12 мм.

Режим дутья и тяги зависит от нагрузки, конструкции котла и тягодутьевых устройств.

В газоходах работающих котлов существует так называемое нейтральное сечение, в котором давление равно атмосферному, т. е. меняет знак. Это сечение можно перемещать по длине газохода, изменяя соотношение между давлением дутья и тягой. В котлах старых систем нейтральное сечение чаще всего находилось в топочном пространстве. С увеличением давления дутья это сечение перемещалось вперед по ходу газов. С ростом сопротивлений газоходов (засорения дымогарных труб или пучков водогрейных труб) нейтральное сечение также перемещалось вперед.

При больших давлениях дутья в современных котлах нейтральное сечение может переместиться даже за поверхность нагрева котла. Например, для серийных котлов отечественной постройки типа КВГ сопротивление топочных устройств составляет 110—170 мм вод. ст., а суммарное сопротивление газоходов — 100—150 мм вод. ст. В итоге сумма всех сопротивлений по пути воздуха и газов достигает 200—300 мм вод. ст.

Так как самотяга составляет здесь около 10 мм вод. ст., то нейтральное сечение находится в хвосте котла, все газоходы которого работают при избыточном давлении. Фактически вся работа преодоления газовых сопротивлений приходится на долю дутьевого вентилятора, создающего перед воздухонаправляющими устройствами котла напор при нормальной нагрузке более 200 мм вод. ст. и при максимальной — до 300 мм вод. ст. В последнем случае расходуемая на привод вентилятора одного котла мощность равна 130 кВт.

Из приведенного примера видно, что в новых котлах для увеличения коэффициента теплоотдачи от газов к поверхности нагрева

и повышения ее теплового напряжения предусмотрены высокие скорости газов, что вызывает большие сопротивления газопроводов. Роль самотяги в преодолении этих сопротивлений ничтожна, и котлы на нормальной нагрузке работают с большими избыточными давлениями в газопроводах. Поэтому обшивка котлов должна быть герметичной, а в воздушном кожухе, охватывающем все наружные стенки топки, необходимо поддерживать давление воздуха, превышающее давление газов в топке, для предотвращения протечек газов через футеровку и обмуровку топки.

Увеличение разности показаний тягомеров, установленных за вентилятором и перед фронтом котла, при одной и той же нагрузке котла свидетельствует о неплотности воздухопроводов. Последние нужно периодически осматривать и обнаруженные неплотности устранять. Сопротивления, проверяемые по разности показаний тягомеров в начале и конце газопроводов, возрастают по мере загрязнения последних (при одной и той же нагрузке котла). Подсосы в котлах, работающих с разрежением в газопроводах, можно обнаружить с помощью свечи, пламя которой втягивается в направлении подсоса. Неплотности устраняют уплотнением асбестовыми жгутами, смоченными в смеси керосина с графитом, или размоченной в воде старой изоляционной массой.

Чаще всего пропуски воздуха или газов бывают в дверцах и люках обшивки, между секционными камерами, в вертикальных котлах (у съемных листов обшивки), в отверстиях для болтов, крепящих топочную футеровку, и в местах прохода через обшивку различных труб. Кроме того, воздух может проникнуть через щели и трещины в трубных досках воздухоподогревателя и неплотности вальцовки труб.

Регулярный осмотр воздухоподогревателей и устранение обнаруженных дефектов очень важны, так как это предотвращает опасность возникновения пожара. После чистки, ремонта и уплотнения мест пропусков рекомендуется определить и записать показания тягомеров в различных точках воздушного и газового трактов (у вентилятора, перед фронтом котла, в топке и т. д. до основания дымовой трубы), а затем сравнивать с ними данные периодического контроля.

Глава X. АРМАТУРА ТРУБОПРОВОДОВ И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

§ 33. Арматура

Для управления котельным агрегатом и контроля за его работой предусмотрены специальная арматура и контрольно-измерительные приборы. Запорная, переключающая и предохранительная арматуры позволяют регулировать работу котла изменением расхода давления или температуры воды, пара, воздуха и газов в пре-

делах, обусловленных нагрузкой котла, требованиями безопасности и надежности эксплуатации.

В данном параграфе рассматриваются только арматура и основные контрольно-измерительные приборы парового и водяного пространств парового котла.

Контрольно-измерительные приборы позволяют периодически или непрерывно регистрировать основные данные, характеризующие работу котла: уровень воды в барабане, давление пара в котле, температуру перегретого пара и т. д.

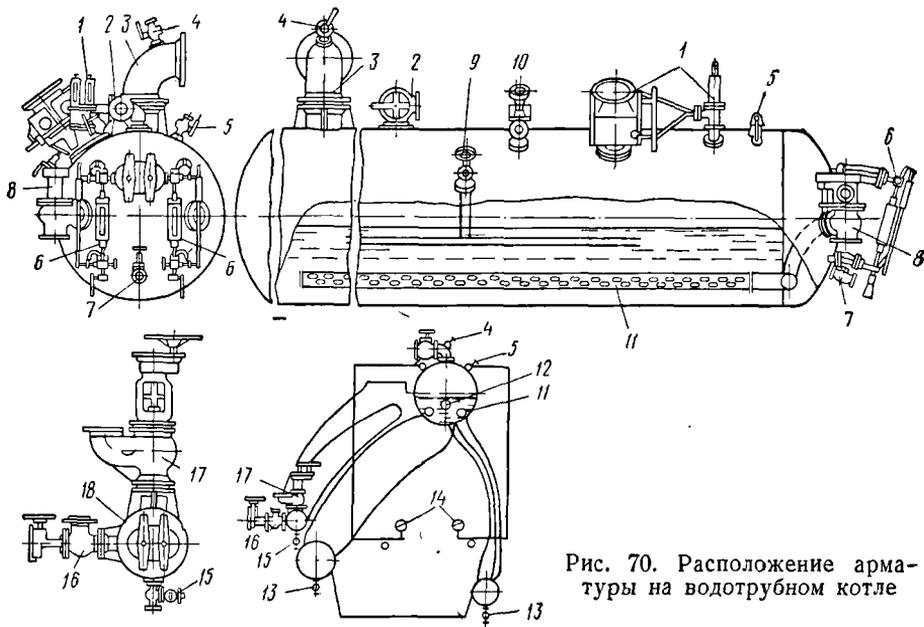


Рис. 70. Расположение арматуры на водотрубном котле

Расположение арматуры на котле и ее минимально необходимое количество определяются требованиями классификационных обществ (в СССР — Регистра СССР).

Расположение арматуры на водотрубном котле показано на рис. 70.

Позиции на рисунке означают: 1 — предохранительный клапан; 2 и 16 — вспомогательные стопорные клапаны перегретого и насыщенного пара; 3 — патрубок к стопорному клапану на пароперегреватель; 4 и 5 — краны воздушный и на манометр; 6 — водоуказательный прибор; 7 и 8 — солемерный и питательный клапаны; 9 и 12 — клапан и труба верхнего продувания; 10 — клапан для заполнения котла водой и введения химических реагентов; 11 — питательная труба; 13 — клапан (или кран) нижнего продувания; 14 — манометры; 15 — дренажный клапан; 17 — главный стопорный клапан; 18 — коллектор пароперегревателя.

Материал для изготовления арматуры должен соответствовать Правилам Регистра СССР.

Арматура систем питания и продувания котлов может быть стальной, бронзовой или латунной. Если для обработки питательной

воды вводят щелочи не непосредственно в котел, а в теплый ящик, то клапаны и краны арматуры, соприкасающиеся со щелочной водой, рекомендуется изготовлять из оловянистой бронзы, не содержащей цинка, который быстро разъедается щелочными растворами.

Регистр СССР допускает изготовление мелкой паровой арматуры из чугуна только для пара низких параметров (температуры не более 300° С, давления не выше 20 кгс/см²). Клапаны для пара более высокого давления изготавливаются из специальной литой стали с уплотняющими вставками — кольцами в тарелках и седлах. Кольца делают из сплава, который можно легко притереть.

Арматуру и соединительные части трубопроводов (колена, патрубки и т. д.) до установки на судно подвергают гидравлическому испытанию на прочность и плотность под давлением по Правилам Регистра СССР.

Арматуру в сборе подвергают испытанию также после установки на судно. Арматуру для перегретого пара и системы питания котла после изготовления испытывают на прочность и плотность гидравлическим давлением, равным 2,5 рабочего.

Каждый судовой котел с естественной циркуляцией воды можно надежно эксплуатировать только при определенном уровне находящейся в нем воды. Различают наинизший (НУВ) и наивысший (ВУВ) допускаемые уровни воды. Рабочий уровень воды (РУВ) располагается примерно посередине между ними. НУВ определяется из необходимости охлаждения водой наиболее высоко расположенных частей поверхности нагрева, омываемых горячими газами, т. е. предотвращения перегрева металла. ВУВ ограничивается необходимым объемом парового пространства, достаточным для отделения влаги от пара.

Каждый котел снабжен указателем НУВ, а иногда РУВ и ВУВ. Указатель изготовляют в виде шурупа (так называемого огневого шурупа) или пластинки с риской и прочно прикрепляют к наружной поверхности барабана котла.

В водотрубных котлах НУВ устанавливают на 150 мм выше верхних кромок наиболее высоко расположенных опускных труб.

Уровень воды в котле контролируют при помощи водоуказательных приборов и пробных кранов (установка последних для водотрубных котлов необязательна).

Огнетрубный котел должен иметь не менее двух пробных кранов. Ось нижнего крана располагается на НУВ, а ось верхнего — на ВУВ. При установке трех пробных кранов третий кран размещают посередине между указанными двумя. Для того чтобы узнать, выходит из открытого крана вода или пар, под струю подставляют какой-либо металлический предмет. Появление на нем мелких капель свидетельствует о том, что из крана идет пар, а крупных капель — вода. Конструкция двухходового пробного крана представлена на рис. 71.

При выходе из строя всех водоуказательных приборов работа огнетрубного котла может продолжаться не более 20 мин (при

контроле уровня воды по пробным кранам). Если за это время водоуказательный прибор не будет исправлен, то котел надо отключить от магистрали и вывести из действия. При неисправности последнего водоуказательного прибора водотрубный котел следует немедленно вывести из эксплуатации.

Каждый котел должен иметь не менее двух водоуказательных приборов. Нижний край прорези для стекла водоуказательного прибора должен быть расположен выше НУВ и не менее чем на 50 мм выше огневой линии или верхних кромок опускных водогрейных труб.

У водотрубных котлов водоуказательные приборы устанавливают на днищах пароводяных коллекторов. При расположении коллекторов поперек судна в каждом конце коллектора должен быть установлен самостоятельный водоуказательный прибор. Середина его стекла должна соответствовать РУВ.

Водоуказательные приборы с плоскими стеклами устанавливают на всех котлах с давлением пара до 32 кгс/см². На рис. 72 показан водоуказательный прибор для двухстороннего наблюдения. Два толстых плоских стекла 6 закрепляют рамками 2 при помощи шпилек 5 с гайками 3. Прокладки 4,

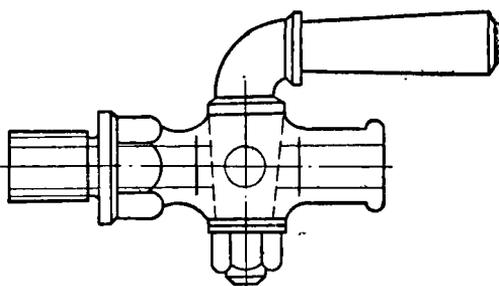


Рис. 71. Двухходовой пробный кран

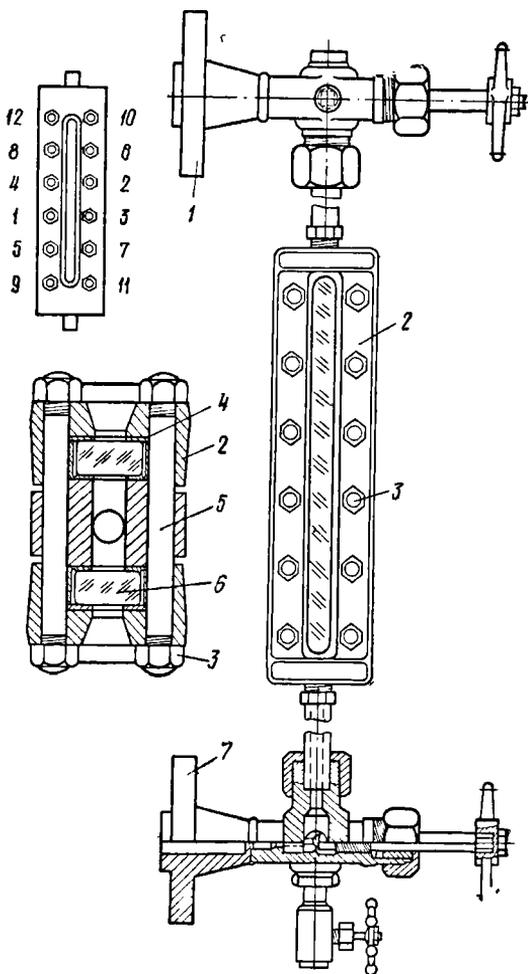


Рис. 72. Водоуказательный прибор с плоским стеклом

устанавливаемые с обеих сторон, обеспечивают герметичность стекла. Внутренняя поверхность стекла *б* имеет параллельные призматические канавки (риски), что способствует четкой видимости уровня воды благодаря разному коэффициенту преломления луча. При этом вода кажется темной, а пар — серебристым.

Для равномерного обжата прокладок рекомендуется поджимать гайки *з* в последовательности, указанной в левой верхней части рисунка. Фланцами *1* и *7* прибор присоединяется к котлу или подводящим трубам. Трубы для продувки водоуказательного прибора отводят под плиты котельного отделения.

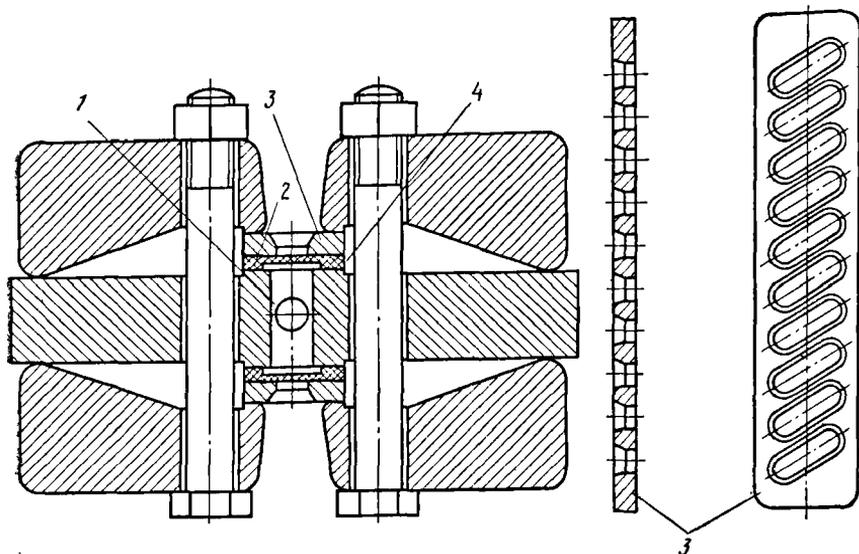


Рис. 73. Водоуказательный прибор для котлов высокого давления (поперечное сечение)

При работе котла уровень воды в стекле прибора должен колебаться. Неподвижный уровень свидетельствует о засорении каналов. В этом случае стекло продувают, открывая сначала нижний спускной кран прибора, а затем поочередно краны, сообщающие прибор с паровым и водяным пространствами.

Поочередное закрывание кранов позволяет определить, какой из них засорился. Сначала открывают нижний продувочный кран, а потом закрывают сначала паровой, а затем водяной. В заключении открывают водяной кран и закрывают нижний.

На рис. 73 представлено поперечное сечение водоуказательного прибора для котлов высокого давления. Опорная решетка *з* имеет косые щели, через которые виден уровень воды водяного пространства *1*, подсвечиваемый с задней стороны электролампочкой (иногда подсвечивание не устанавливают).

В таких приборах вместо плоских стекол применяют набор слюдяных пластин 2 (4 — прокладка). В некоторых водоуказательных приборах поверх листовой слюды ставят плоское стекло, повышающее прочность слюды, которая в свою очередь защищает стекло от действия воды и пара. В других конструкциях в водяном пространстве помещают решетку (наклонно), которая при освещении ее с задней стороны специальным параболическим зеркалом с электролампочкой дает резкое отражение уровня воды.

Если верхний барабан котла расположен на значительной высоте, то устанавливают сниженный указатель уровня (рис. 74). Уровень воды в трубке 18 практически соответствует уровню воды в барабане котла (он будет несколько ниже вследствие большей плотности воды в трубке 18, чем пароводяной смеси в барабане). Уровень воды в трубке 5 постоянен вследствие конденсации пара, поступающего в конденсатор 4 через трубопровод и разобшительный клапан 1. Гидростатическое давление от разности уровней в трубках 18 и 5 через грязеуловители 6 передается в U-образную трубку 12 сниженного указателя, в одной из ветвей 10 которого уровень будет изменяться в соответствии с изменением его в барабане котла.

Для четкой видимости уровня в U-образную трубку 12 наливают тяжелую цветную жидкость, не смешивающуюся с водой. Место расположения указателя не влияет на его работу.

После заливки тяжелой жидкости в отверстие 14 систему заполняют дистиллятом через пробку 7, удаляя воздух через пробку 2. Затем перекрывают клапаны на трубках 5 и 15 (клапаны на рисунке не указаны), и открывают клапаны 1 и 17, после чего сообщают прибор с трубками 5 и 15 и подгоняют уровень в приборе к уровню воды в котле путем спуска части тяжелой жидкости через пробку 11.

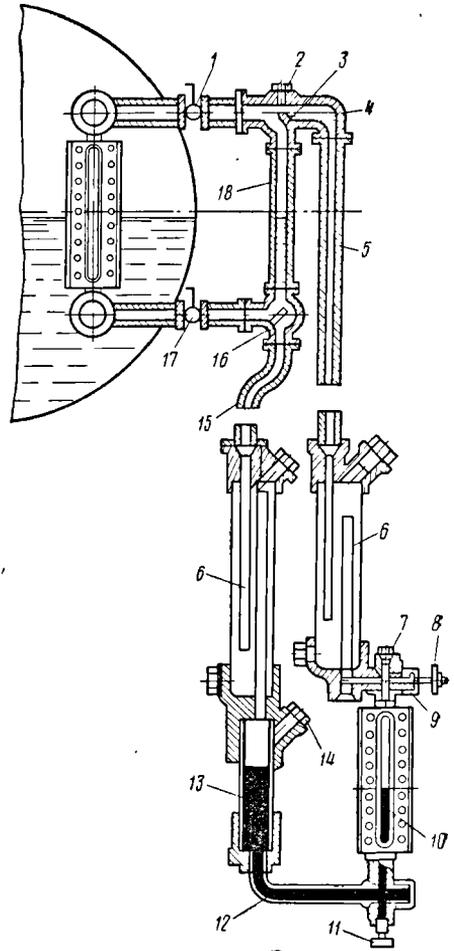


Рис. 74. Сниженный указатель уровня

При продувках грязеуловителей *б* прибор должен быть отсоединен от них, так как иначе тяжелая жидкость будет выброшена из прибора. В качестве тяжелой жидкости применяют четыреххлористый углерод CCl_4 плотностью 1,594, подкрашенный краской, придающей ему красный цвет.

Остальные позиции на рисунке означают: *3* — перегородка; *8* — клапан; *9* — крестовина; *13* — расширительный сосуд; *16* — тройник.

В трубах, ведущих к сниженным указателям уровня, обычно устанавливают запорные клапаны с шаровым затвором.

На рис. 75 показаны различные положения такого клапана (*а* — клапан закрыт, *б* — клапан открыт). В случае разрыва трубки и поломки стекла шар прижимается к седлу разностью

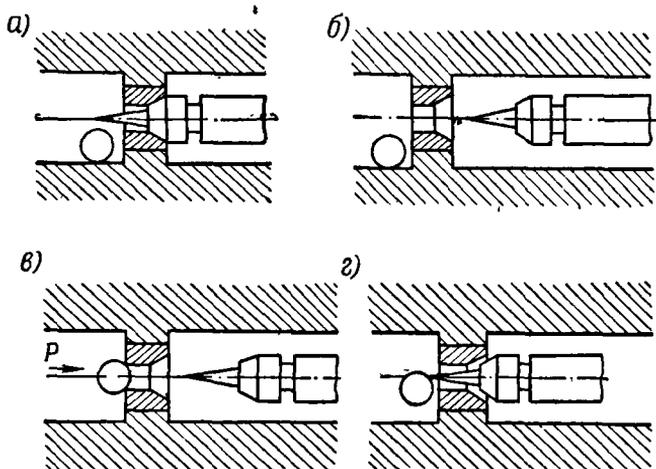


Рис. 75. Шаровой клапан

давлений и автоматически закрывает клапан (рис. 75, *в*). Для того чтобы шар не мешал продувке труб, его можно отжать в сторону острием запорного клапана (рис. 75, *г*).

Так как показания сниженных указателей уровня не всегда соответствуют истинному положению уровня в барабане котла и при резких его изменениях запаздывают, то такие приборы считаются дублирующими и их устанавливают в дополнение к обычным водоуказательным приборам.

Каждый котел с поверхностью нагрева более 12 м² должен быть снабжен двумя предохранительными клапанами, открывающимися, когда давление пара в котле превысит установленное рабочее. Для котлов с расчетной паропроизводительностью менее 750 кг/ч и для утилизационных котлов достаточен один предохранительный клапан (не сдвоенный).

Клапаны должны иметь привод для их принудительного открывания (подрыва) из котельного отделения и с верхней палубы

судна. Привод необходим для немедленного выпуска пара в атмосферу в случае серьезного повреждения котла. Кроме того, с помощью ручного привода предохранительные клапаны можно поднимать для проверки, а также, если они прикипели, к гнездам. Корпуса предохранительных клапанов для давления пара свыше 10 кгс/см^2 и температуры более 180°C изготовляют только из стали.

Типичная конструкция простого сдвоенного предохранительного клапана представлена на рис. 76. Два одинаковых пружинных клапана установлены в общей литой коробке, которая подсоединена к паровому пространству барабана котла (1 — тарелка клапана; 2 — рычаг для ручного подъема клапана).

После регулирования клапанов шток одного из них пломбирует инспектор Регистра СССР во избежание поджатия клапанов обслуживающим персоналом для повышения давления в котле.

При открытых предохранительных клапанах и полном горении в топках повышение давления пара в отключенном от магистрали котле не должно превышать рабочее более чем на 10%.

На выходном коллекторе пароперегревателя устанавливают отдельный предохранительный клапан, который должен срабатывать раньше клапана на котле. В противном случае при подрыве клапана, установленного на котле, через пароперегреватель не будет проходить пар, что может вызвать перегрев и повреждение пароперегревателя.

Предохранительные клапаны водотрубных котлов с давлением регулируют в соответствии с Правилами Регистра, устанавливающими, при каком повышении давления пара против рабочего клапан должен открыться.

Величина площади сечения предохранительных клапанов зависит от часовой паропроизводительности котла.

У современных мощных водотрубных котлов устанавливают разгруженные (импульсные) клапаны (рис. 77). В них сначала

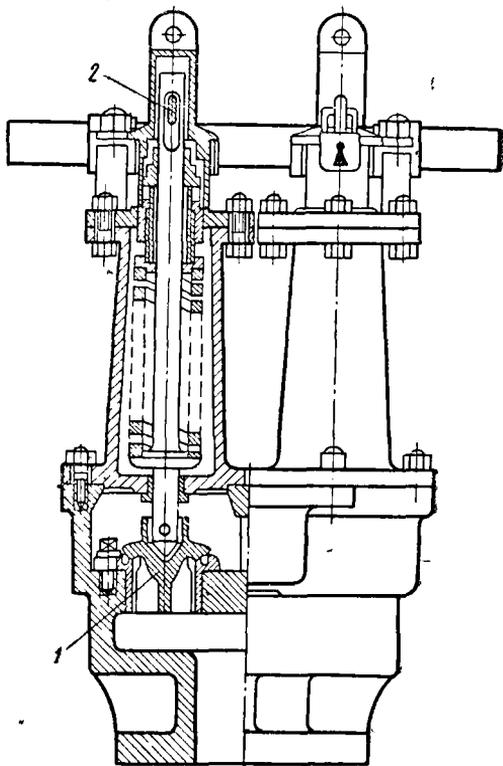


Рис. 76. Предохранительный клапан

срабатывает вспомогательный сигнальный клапан 1, и пар из котла поступает по паропроводу 2 в полость над поршнем 3, который и открывает основной клапан 4.

Предохранительные клапаны должны быстро открываться, во время действия оставаться открытыми и плотно, без стука, са-

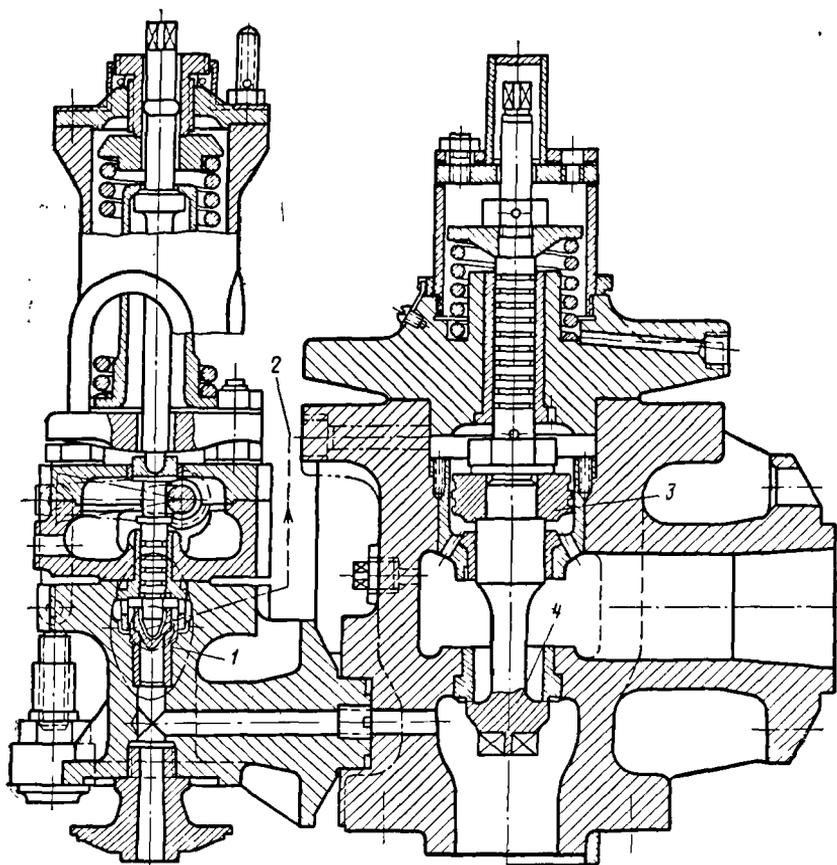


Рис. 77. Предохранительный клапан для мощных котлов

даться на гнезда. Для этого нужно заботиться о сохранении первоначальных размеров клапана при его ремонте. Если гнездо клапана будет значительно расточено, то давление пара на него возрастет. Это потребует более сильного нажатия пружины, т. е. дополнительного регулирования.

Пропуски предохранительного клапана наблюдаются при разьедании или забоинах на рабочих поверхностях, попадании частиц металла и перекосе от неравномерного нажатия фланцевых болтов. Иногда пропуски возникают при коррозии или трещинах в стенках корпуса. Для устранения пропусков необходимо вручную при-

поднять клапан и вновь опустить его на гнездо. Если это не поможет, надо притереть или проточить клапан, сохраняя по возможности неизменным диаметр гнезда.

Предохранительные клапаны притирают машинным маслом с толченым стеклом или тонким наждачным порошком.

Каждый котел (или группа котлов) должен иметь не менее двух независимых питательных насосов. Производительность каждого насоса должна быть равна не менее 1,15 паропроизводительности котла (или группы котлов, обслуживаемых этим насосом).

В качестве питательных средств на судах с паровыми машинами применяют машиннопитательные помпы с приводом от машины, насосы с самостоятельным приводом и инжекторы. На больших судах распространены центробежные питательные насосы с приводом от небольших паровых турбин. На каждом судовом котле должны быть установлены два питательных клапана в двух магистралях питания, между насосами и котлом. На утилизационном котле может быть один питательный клапан.

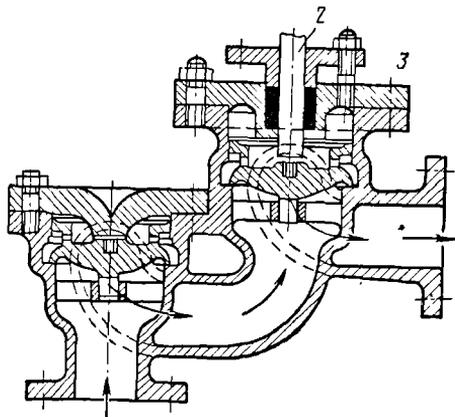


Рис. 78. Питательный клапан

Питательный клапан (рис. 78) состоит из двух клапанов: невозвратного 1 и невозвратно-запорного 3. Такое устройство дает возможность пропускать воду только в одном направлении — в котел. Вода, подаваемая насосом в магистраль питания, приподнимает последовательно клапаны 1 и 3 и проходит в котел. Неисправный невозвратный клапан 1 можно отключить от действующего котла перекрытием невозвратно-запорного клапана при помощи штока 2.

При падении давления в трубопроводе (например, при всасывающем ходе поршневого питательного насоса) давлением пара закрывается клапан 3 и котел разобщается от магистрали питания. Клапан 3 закроется также при разрыве питательной магистрали, прорыве прокладки во фланце и т. п.

Высота подъема клапана 3 регулируется маховиком, перемещающим по резьбе в крышке клапана шток 2. Для закрытия клапана надо прижать его шток к седлу и завернуть маховик до отказа.

На питательной магистрали современных котлов устанавливают также регулирующий питательный клапан, предназначенный для работы с системой автоматического регулирования (САР) питания котла.

Одна из конструкций такого клапана показана на рис. 79. Питательная вода по трубопроводу поступает к фланцу 1 и

проходит между тарелками 4 и седлами 5 клапана к выходному фланцу 6, подсоединенному к питательному клапану (через трубопровод). Шток клапана уплотнен сальниковыми коробками 3 и рычагом 2 соединен с сервомотором (установленным на фланце 7) САР. Наличие двух тарелок на клапане обеспечивает его уравновешенность и дает возможность плавного изменения проходного сечения клапана.

Каждый котел отделяется от главной и вспомогательной паровых магистралей разобщительными клапанами, установленными непосредственно на котле. Эти клапаны, а также вспомогательные

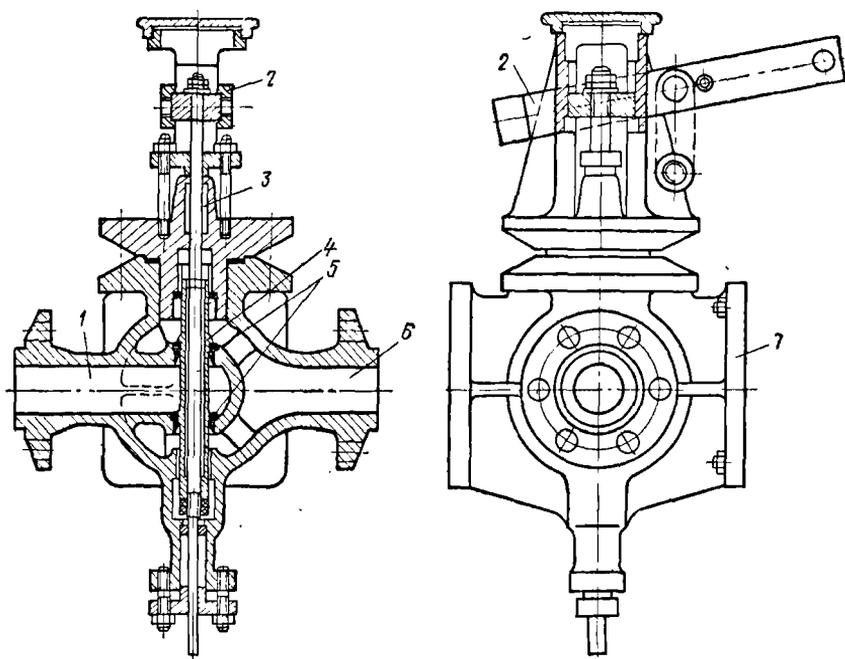


Рис. 79. Регулирующий питательный клапан

клапаны, подводящие пар к распределительным коробкам вспомогательной паровой магистрали, должны иметь привод с верхней палубы, чтобы их можно было перекрыть при аварии в МКО, например, при разрыве паропроводов.

Все разобщительные клапаны паровой магистрали, предотвращающие попадание пара из одного котла в другой (например, при падении давления в одном из котлов), должны быть невозвратно-запорного типа.

В настоящее время существует много конструкций прямых и угловых разобщительных, невозвратно-запорных и других клапанов, задвижек, кранов и т. д. Некоторые из них (на больших котлах) имеют специальные передачи, уменьшающие усилие, необходимое для их открытия.

Для примера на рис. 80 представлены наиболее простые и распространенные клапаны, устанавливаемые на судовых котлах и паропроводах.

Быстрозапорный стопорный клапан (невозвратно-запорного типа) показан на рис. 81. Клапан может открываться под давлением пара снизу на тарелку в том случае, если шток 6 поднят. Закрывается клапан при опускании штока. Так как для закрытия клапана посредством маховика (через зубчатую передачу, гайку 3 и втулку 4, освобождающую шток при его движении вверх) тре-

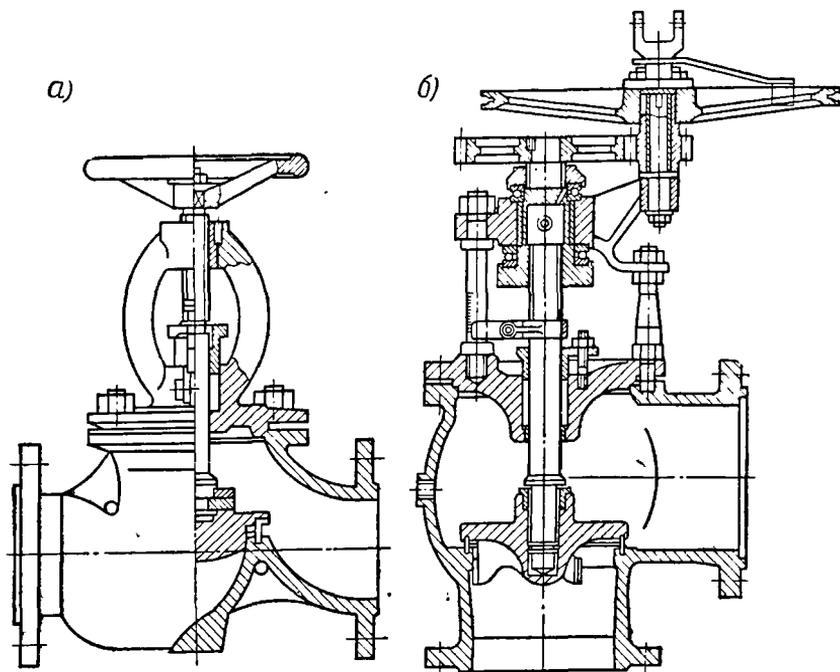


Рис. 80. Прямой разобшительный (а) и угловой стопорный (б) клапаны

буется около 1 мин, то для быстрого закрытия клапана 9 (в случае аварии турбины или магистрали) предназначен сервомотор 12. Шток 13 через крестовину 14 и рычаг 15, имеющий опору в точке А, соединен с поперечиной 16 штока 6 клапана.

При открытом клапане в обе полости цилиндра сервомотора 12 поступает пар и поршень идет вверх, так как давление снизу больше (на площади сечения штока 13), и освобождает шток 6. Для быстрого закрытия клапана полость под поршнем сообщают с конденсатором или магистралью низкого давления и сервомотор быстро закрывает клапан.

Остальные позиции на рисунке означают: 1 — зубчатая передача; 2 — шариковый подшипник; 5 — стопор; 7 и 8 — тарелка и гнездо клапана; 10 — цилиндр; 11 — поршень.

Во время работы котла в водяном пространстве его барабана (или барабанов) постепенно накапливаются масло и шлам, а соленость воды в котле повышается. Чтобы предотвратить загрязне-

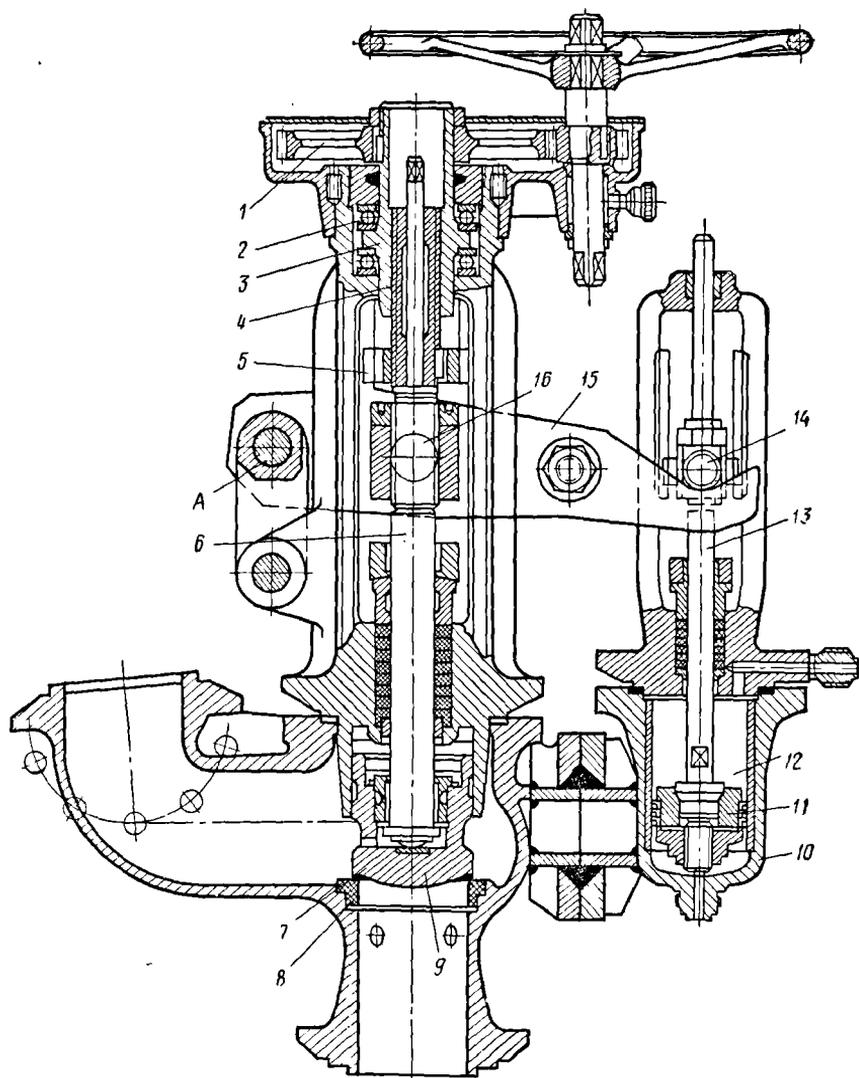


Рис. 81. Быстрозапорный стопорный клапан

ние поверхности нагрева, необходима регулярная продувка, т. е. удаление из котла части воды вместе с растворенными в ней солями и отложениями.

Масляные образования, плотность которых меньше, чем плотность котловой воды, скапливаются у зеркала испарения; их удаляют верхним продуванием. Более тяжелые образования (шлам),

оседающие в нижней части бочки огнетрубного коллектора или в водяных коллекторах водотрубного котла, удаляют нижним продуванием.

Кран верхнего продувания представлен на рис. 82. От крана внутри котла идет труба верхнего продувания (см. рис. 70).

В огнетрубных и некоторых секционных котлах к трубе верхнего продувания приваривают одну или несколько воронок, через которые собственно и удаляются масло и другие загрязнения при открытии клапана верхнего продувания. Установка воронок оправдывает себя в том случае, если не исключено попадание масла в котел при работе паровых поршневых машин.

В современных котлах вместо воронок устанавливают обычную цилиндрическую трубу с обращенными вверх отверстиями (см. рис. 70). Трубу устанавливают на НУВ или немного ниже его. Если труба верхнего продувания установлена между НУВ и РУВ, то перед продувкой котла надо убедиться в том, что уровень воды не менее чем на 50—100 мм выше приемных отверстий трубы, иначе вместо воды из котла будет удаляться пар.

Положение верхней кромки трубы верхнего продувания рекомендуется отметить указателем на колонке водомерного прибора. Трубы нижнего продувания, размещенные в нижней части барабанов огнетрубных котлов или в водяных коллекторах водотрубных, представляют собой также обычные цилиндрические трубы с заглушенным концом и с отверстиями по их нижней образующей поверхности. Если суммарное сечение этих отверстий превышает сечение трубы нижнего продувания, то при продувке котла возникают опасные для прочности фланцев и труб гидравлические толчки и вибрации.

Для возможности нижнего продувания котла при полном рабочем давлении пара должна быть установлена дроссельная труба, у которой суммарная площадь всех отверстий (диаметром 5—8 мм) для приема шлама не превышает половины поперечного сечения трубы нижнего продувания. Протяженность дроссельной трубы должна быть не менее $\frac{2}{3}$ длины коллектора или барабана.

Применять обычные клапаны для нижнего продувания можно только в водотрубных котлах с водообработкой, исключающей образование накипи. В других котлах не исключено попадание кусочков твердой накипи под клапан, в результате чего он не закрывается и вода может быть выдута из котла. Поэтому вместо клапанов чаще всего устанавливают пробковые краны (рис. 83).

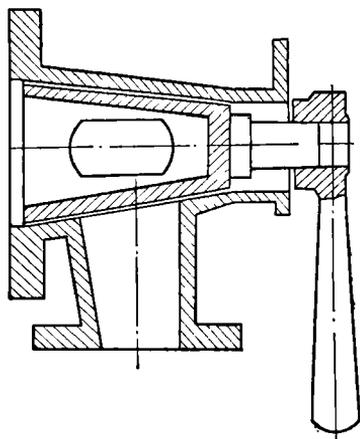


Рис. 82. Кран верхнего продувания

Позиции на рисунке означают: 1 — заплечик, не позволяющий снять рычаг в открытом положении крана; 2 — рычаг; 3 — уплотнительный сальник с крышкой; 4 — корпус; 5 — пробка; 6 — фиксирующий винт с гайкой.

Съемную рукоятку у крана нижнего продувания можно снять только при полностью закрытом кране. Такое устройство рукоятки не позволяет оставить кран не полностью закрытым, т. е. предотвращает упуск воды и повреждение котла.

К арматуре парового котла относятся краны воздушные, краны для отбора проб котловой воды (солемерные), клапан для введения в котел химических веществ и клапан на свисток. Пар к последнему поступает либо непосредственно из барабана котла, либо от специальной магистрали особенно ответственных для эксплуатации судна механизмов (рулевой машины, автономного питательного насоса и т. д.). Конструкции этих кранов и клапана принципиально не отличаются от рассмотренных (установку их на котле см. на рис. 70).

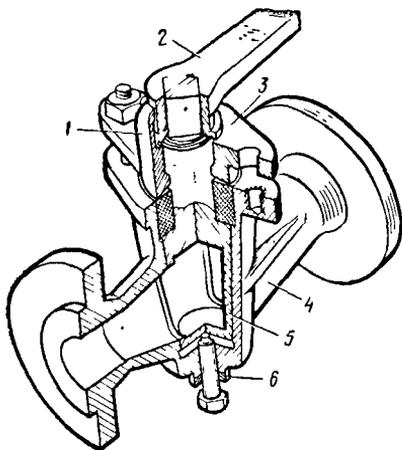


Рис. 83. Кран нижнего продувания

При этом пар поступает к поршню 7 главного клапана 4. Перемещаясь под действием давления пара, поршень 7 открывает клапан 6, подающий пар на свисток 1. Звук возникает в результате удара выходящей с большой скоростью струи пара о кромки стакана свистка.

К преимуществам такого устройства относится плотное прижатие главного клапана к седлу давлением пара, а не пружиной. Кроме того, для открытия импульсного клапана 3 малой площади, имеющего небольшую пружину толкателя 10, достаточно незначительного усилия, развиваемого электромагнитным устройством 2. В нижней части свистка имеется сепаратор 5 влаги. Рычаг 9 импульсного клапана служит для ручного управления свистком.

Размеры клапанов и сечений труб рассчитывают по рекомендуемым величинам скорости: для перегретого пара — 40—50 м/с, насыщенного пара — 18—25, воды — 1,5—2,5. Чрезмерное увеличение этих скоростей приводит к повышенным потерям напора, уменьшение — к увеличению сечений и перерасходу металла на трубы и арматуру.

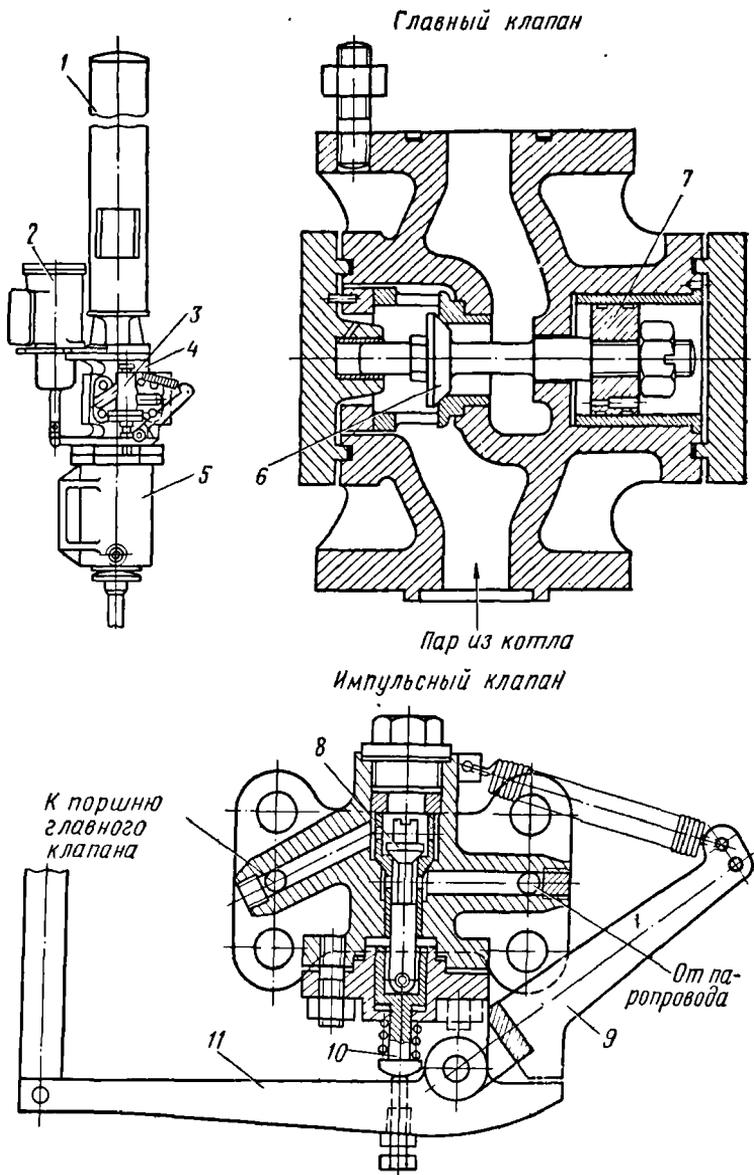


Рис. 84. Паровой свисток

Тип и основные геометрические размеры клапана принимают в зависимости от так называемых условного прохода и условного давления по ГОСТу.

Всю котельную арматуру, кроме водоуказательного прибора, устанавливают непосредственно на котле.

Диаметр труб, идущих от клапана (крана) нижнего или верхнего продувания, должен быть не менее 20 мм.

§ 34. Паропроводы и котельные трубопроводы

В судовой котельной установке имеются трубопроводы питательной воды, продувочной котловой воды, паропроводы и топливопроводы. Кроме того, могут быть трубопроводы, относящиеся к системам водоподготовки, автоматического регулирования, сажеобдувки и т. д.

Трубопроводы питательной воды (питательные магистрали) обязательно дублируют, т. е. имеются главная и вспомогательная питательные магистрали. На ходу судна вода подается в котлы по одной из питательных магистралей, другая служит резервной.

В зависимости от назначения различают следующие паропроводы котельного отделения:

главные, по которым перегретый пар подается из пароперегревателей к главным паровым двигателям;

вспомогательные, по которым пар поступает из котла или его парохладителей в распределительные коробки; от них идут паропроводы к различным вспомогательным механизмам и потребителям пара;

специального назначения.

Если часть механизмов (турбогенераторы, турбонасосы) работает на перегретом паре, на судне имеется отдельная вспомогательная магистраль перегретого пара.

Паропроводы специального назначения относятся к вспомогательным, но могут работать на паре различных параметров в зависимости от цели, для которой предназначены. Например, трубопроводы для подогрева мазута работают преимущественно на отработавшем паре. Однако при его отсутствии подогрев может производиться охлажденным паром из котла. Если паропроводы имеют два подключения для работы на паре разных параметров (например, на охлаждаемом или отработавшем), то все фланцы, прокладки и арматуру необходимо устанавливать применительно к пару более высоких параметров.

Фланцы трубопроводов и арматуры в установках с давлением пара до 20 кгс/см² соединяются на прокладках из листового мягкого прокладочного материала, изготовляемого из асбеста, каучука и минерального наполнителя (паронита и клингерита).

На лючках секционных котлов ставят полуметаллические прокладки в виде готовых колец из прорезиненной асбестовой ткани с медной оболочкой. При более высоких давлениях пара применяют прокладки из тонкого паронита, отожженной красной меди,

медно-никелевого сплава или малоуглеродистой стали, имеющие волнистое или призматическое сечение. Для уплотнений сальников арматуры паропроводов применяют асбестовую набивку сквозного плетения, пересыпанную для уменьшения трения сухим чешуйчатым графитом без какой-либо смазки. Для клапанов питательной магистрали можно применять пропитанную и армированную проволокой асбестовую набивку.

Все трубопроводы (топлива, воды и пара) закрепляют для того, чтобы они не провисали. Крепления должны исключать возникновение дополнительных напряжений и деформаций и позволяют осматривать трубы и разбирать их соединения. Трубы развальцовывают во фланцах, после чего последние приваривают

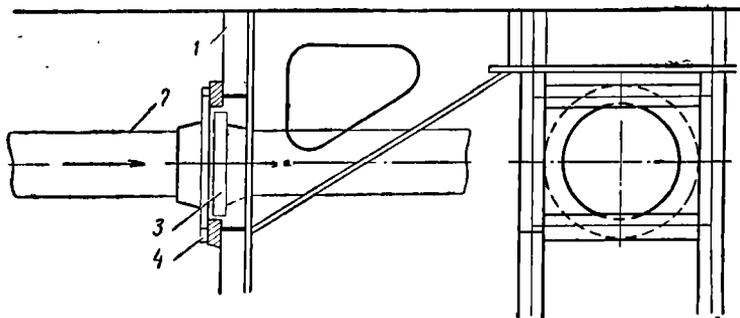


Рис. 85. Крепление трубопровода с помощью переборочного фланца

к трубам. Для паропроводов повышенного и высокого давлений применяют специальные соединения (со стыковой сваркой труб и усиленными фланцами).

Трубопроводы котельного отделения крепят к переборкам или элементам судового набора на подвесных тягах, пружинных подвесках или с помощью переходных переборочных сальников, стаканов и фланцев, дающих возможность свободного теплового расширения трубопровода.

На рис. 85 показано устройство переборочного фланца (1 — переборка; 2 — трубопровод; 3 и 4 — переборочный и обыкновенный фланцы).

Все трубопроводы и в первую очередь паропроводы испытывают значительное тепловое удлинение. Однако фланцы, присоединяющие их к арматуре, должны быть строго фиксированы и не допускать дополнительных напряжений от расширения. Поэтому для компенсации тепловых удлинений трубопроводам придают специальные изгибы. Радиусы и расстояния между центрами смежных изгибов должны быть не менее трех диаметров (d) трубопровода, а длина изогнутой части — не менее восьми диаметров.

На рис. 86 показаны разные типы компенсаторов. Компенсирующая способность лирообразных компенсаторов зависит от длины вылета компенсатора и его диаметра.

При сборке гайки фланцев следует крепить равномерно, без перекосов (крест-накрест); особенно осторожно следует прогревать холодные паропроводы.

Так как температура шпилек (болтов) фланцев ниже температуры стенок труб, шпильки испытывают большие напряжения и при быстром прогреве могут быть разорваны.

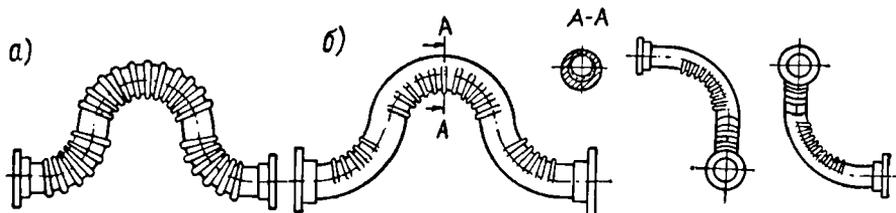


Рис. 86. Гофрированный (а) и гладкие (б) компенсаторы паропроводов

Изоляция фланцев способствует более быстрому выравниванию температуры во фланцевом соединении.

Материал трубопроводов и арматуры должен соответствовать Правилам Регистра СССР и действующим ГОСТам, ТУ и нормалам.

Паропроводы изготавливают из стальных цельнотянутых труб; при температуре пара свыше 425°C — из легированной стали.

Главные паропроводы диаметром свыше 100 мм и трубопроводы, работающие при температуре перегретого пара (равной или превышающей 450°C), следует регулярно проверять на скорость ползучести.

Для проверки скорости ползучести на паропроводе I (рис. 87) наваривают бобышки 2 строго определенного размера по данной схеме.

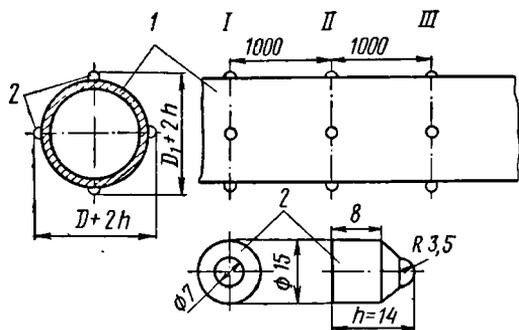


Рис. 87. Расположение контрольных бобышек на паропроводе

На судне должна быть таблица замеров диаметров паропровода по сечениям I, II, III и т. д. и по направлениям D и D_1 . Первый замер должен быть сделан сразу после постройки судна, второй — спустя год и последующие замеры — через каждые шесть месяцев.

Замер делают при нерабочем состоянии паропровода; желательно, чтобы температура при этом была такой же, как при предыдущем замере.

Истинный диаметр D (мм) паропровода определяют по формуле

$$D = \frac{D'}{1 + 11,2 \cdot 10^{-6} \Delta t} - 2h,$$

где D' — замеренный диаметр по бобышкам, мм;

Δt — разность температур стенки паропровода и воздуха в месте замера, °С;

h — высота бобышек, мм.

Скорость ползучести C (мм/мм·ч) определяют по формуле

$$C = \frac{D_n - D_{n+1}}{D_n \tau},$$

где D_n и D_{n+1} — соответственно диаметры паропровода предыдущего и данного замеров, мм;

τ — рабочее время между двумя замерами, ч.

Нормальной величиной скорости ползучести C считается 1×10^{-7} мм/мм·ч. Если скорость ползучести $C = (6-9) \times 10^{-7}$ мм/мм·ч, то следующий замер надо сделать через три месяца работы паропровода, а если $C \geq 1 \times 10^{-6}$ мм/мм·ч, то эксплуатацию паропровода надо прекратить и сообщить об этом в пароходство. Несоблюдение указанного правила может привести к разрыву паропровода, т. е. к аварии.

Напорные питательные трубопроводы изготавливают из бесшовных стальных оцинкованных или бакелитированных труб. Арматура систем питания и продувания котлов может быть стальной, бронзовой или латунной.

Арматуру и соединительные части трубопроводов (колена, патрубки и т. д.) подвергают до установки на судно гидравлическому испытанию (на прочность и плотность) в соответствии с Правилами Регистра СССР. После установки на судно трубопроводы и их арматуру испытывают совместно с котлом. Шкалы манометров, установленных на трубопроводах, должны иметь деления на 15% выше пробного гидравлического давления.

Все трубопроводы пара, горячей воды и нагретого мазута должны быть покрыты изоляцией, обшиты парусиной и иметь отличительные кольца, по окраске которых узнают назначение трубопровода. Например, у трубопровода перегретого пара кольца красного цвета, питательной воды — синего, топливные — коричневого и т. д.

Температура поверхности изоляции не должна превышать 60° С.

§ 35. Контрольно-измерительные приборы

Теорию по контрольно-измерительным приборам (КИП) и их конструкцию изучают в специальном курсе, поэтому здесь изложены только основные требования по установке штатных КИП на судовых котлоагрегатах и приведены некоторые приборы, обычно не рассматриваемые в курсе.

К штатным КИП первой необходимости относятся уже рассмотренные водоуказательные приборы, манометры, установленные на котле и выходном коллекторе пароперегревателя, и термометры для измерения температуры пара за пароперегревателем. Эти приборы необходимы для безопасной эксплуатации котла, и их установка обусловлена Правилами Регистра СССР.

Современные котельные агрегаты морских судов снабжены значительно большим количеством штатных приборов теплотехнического контроля, что улучшает эксплуатацию энергетической установки и способствует повышению к. п. д. (вследствие правильного управления работой котла).

Различают оперативный и учетный теплотехнический контроль.

При оперативном контроле устанавливают визуальные КИП, определяющие величину какого-либо параметра в данный момент (манометры, термометры, указатели уровня и т. д.).

При учетном контроле в котельном отделении устанавливают суммирующие приборы и счетчики, позволяющие оценить изменение какого-либо параметра за определенный промежуток времени (вахту, сутки). К таким приборам относятся самопишущие манометры, расходомеры, газоанализаторы и т. д.

Принципиальная схема установки основных КИП для судового котлоагрегата показана на рис. 88.

Условные обозначения приборов: *В* — визуальные; *С* — самопишущие (учетные); *АП* — аварийно-предупреждающие (сигнализирующие).

Условные обозначения параметров: *Д* — давление; *Т* — температура; *Р* — расход; *А* — анализ; *У* — уровень воды.

Позиции на рисунке означают: *1* — воздухоподогреватель; *2* — экономайзер; *3* — пароперегреватель; *4* — щит теплоконтроля.

Из схемы видно, что показания всех штатных приборов, установленных непосредственно у котла, дублируются на щите. Кроме того, для измерения некоторых параметров вместо штатного прибора устанавливают датчик с передачей показаний на щит теплоконтроля, находящийся в МКО или на центральном посту управления (ЦПУ).

Особо важные для надежной эксплуатации котла параметры: уровень воды и давление пара в барабане — обычно дублируют приборами и устройствами аварийно-предупредительной сигнализации. Некоторые приборы визуального контроля (газоанализаторы, солемеры, расходомеры топлива и пара и т. д.) желательно дублировать самопишущими приборами. Это позволяет проводить анализ работы котлоагрегата за длительный промежуток времени (вахту, сутки). Такой анализ позволяет выявить недостатки в работе котельной установки и в ее обслуживании, определить лучшую вахту и распространить опыт ее работы на другие вахты.

При установке на судне САР работы котельной установки на щит или в ЦПУ выносят также КИП этих систем и приборы управления ими. Концентрация КИП и приборов управления автоматического контроля в одном месте способствует сокращению штата обслуживающего персонала и облегчает эксплуатацию котлов.

Ошибки в считывании показаний, которые могут привести к нарушению нормальной эксплуатации котлов или даже к аварии, зависят не только от индивидуальных особенностей и степени внимания вахтенного котельного машиниста или механика. Установлено, что черный цвет щита и приборов быстро утомляет

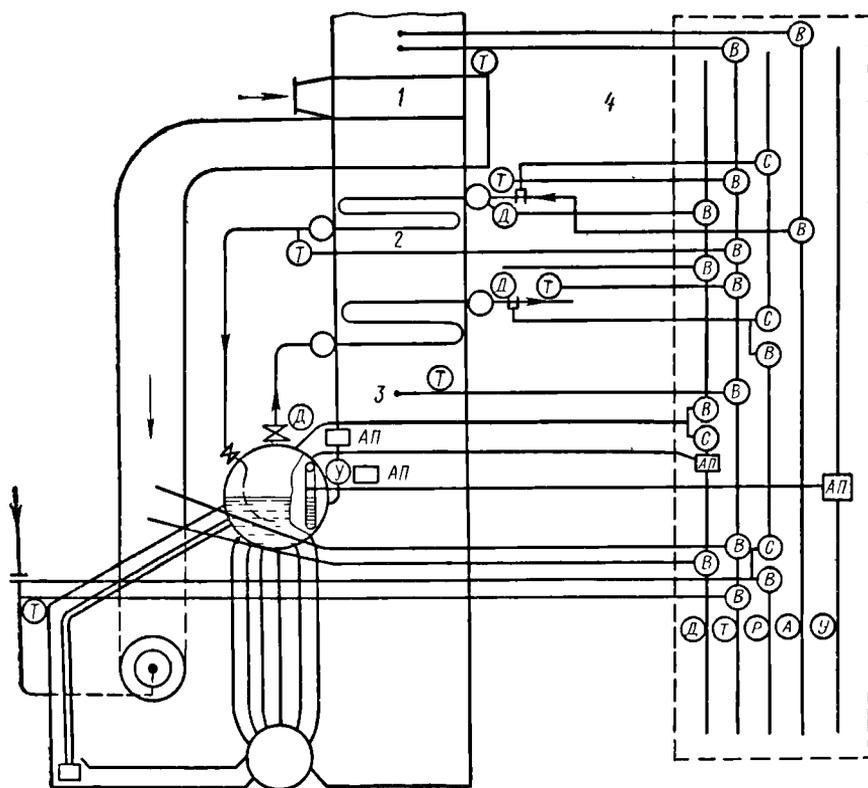


Рис. 88. Схема расположения КИП для котла

зрение, поэтому рекомендуются спокойные тона светло-шаровой или бледно-зеленой окраски. Исполнение КИП также оказывает влияние на ошибки в считывании показаний.

Из схемы, приведенной на рис. 89, видно, что наибольший процент ошибок падает на вертикальную линейную шкалу 1, наименьший — характерен для приборов, шкала 4 которых выполнена в виде окна, где появляются цифры (2, 3 — горизонтальная и полукруговая шкалы).

Как штатные, так и щитовые КИП должны поддерживаться всегда в исправном состоянии. Работа с неточными или неисправными КИП, как правило, не только приводит к снижению экономичности котлоагрегатов, но часто является основной причиной

аварии. Все приборы следует проверять и тарировать в установленные сроки. При сомнении в показаниях прибора его нужно проверить контрольным.

Рабочие манометры можно проверить с помощью контрольного манометра (рис. 90), имеющего две трубки и две стрелки, показания которых при исправности прибора должны совпадать.

Термопары проверяют (в границах температур до 500°C) термометрами, дифманометры малых перепадов давления — U-образной трубкой с водяным заполнением и т. д. При заведомо ложных показаниях прибора его следует отключить, а затем заменить или отремонтировать.

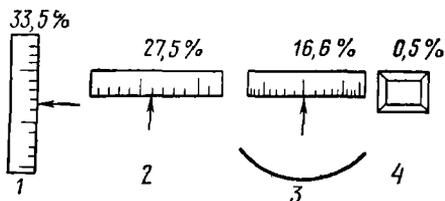


Рис. 89. Зависимость количества ошибочных отсчетов от формы шкалы

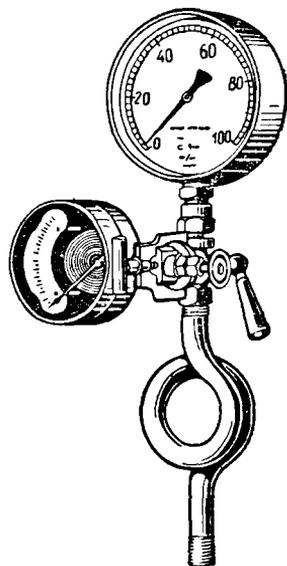


Рис. 90. Установка контрольного манометра на трехходовом кране рабочего манометра

При заказе новых приборов механик должен указать их назначение, место установки, требуемый класс точности, параметры среды, границы измерений и т. д. Завод-поставщик приборов

обычно имеет для этой цели специальные вопросные листы, а если их нет, то надо описать требуемые характеристики приборов возможно более полно и точно во избежание ошибок при поставке.

Кроме обычных КИП (манометров, термометров, термопар, расходомеров и т. д.), в котельных установках применяют также специальные приборы (штатные вискозиметры, дымномеры, сигнализаторы уровня, газоанализаторы и т. п.).

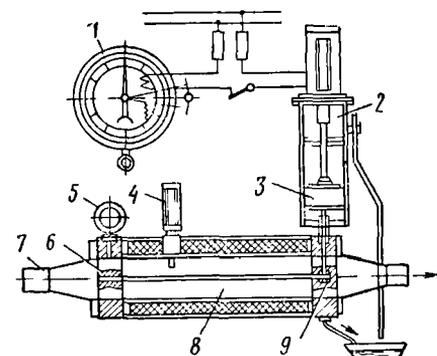


Рис. 91. Судовой вискозиметр

Известно, что качество распыливания мазута для разных форсунок зависит от его вязкости. Вязкость топлива можно контролировать с помощью вискозиметра (рис. 91).

Топливо из расходной цистерны по магистрали 7 через трехходовой кран 6 поступает в мерительную трубку 8, одновременно обтекая ее, благодаря чему трубка имеет ту же температуру, что и топливо. Трубка соединяется с мерительной камерой 2 посредством крана 9. Давление определяют по манометру 5, а температуру — по термометру 4. Поплавок 3 мерительной камеры связан с электрическими часами 1, которые фиксируют время, необходимое для заполнения мерительной камеры. Зная давление и время заполнения мерительной камеры, вязкость топлива определяют по специальному графику, приложенному к прибору. Точность прибора находится в пределах 0,2—0,3°, т. е. вполне достаточна для практических целей.

На основе этой схемы разработаны автоматические вискозиметры, установленные непосредственно у форсунок и регулирующие температуру подогрева мазута в зависимости от его вязкости перед форсункой.

Дымление при работе топки служит первым признаком неотрегулированного процесса горения. Для контроля дымности применяют визуальные дымномеры (с зеркальным перископом) и дымномеры с фотоспротивлением.

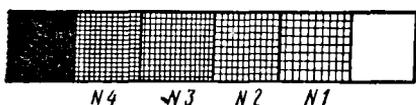


Рис. 92. Шкала дымности газов

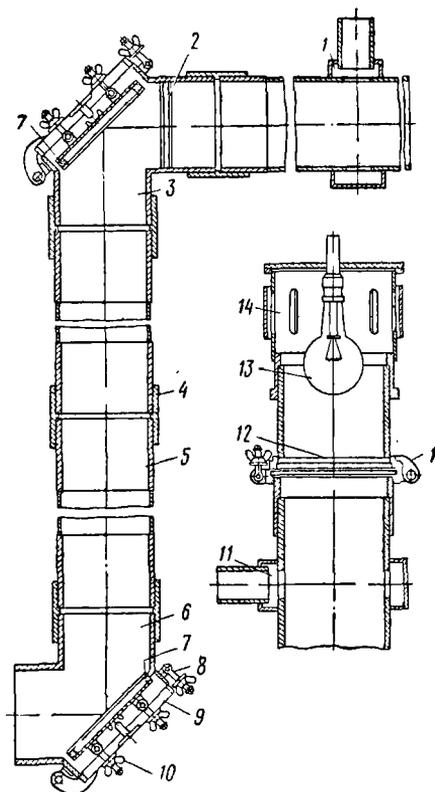


Рис. 93. Визуальный дымномер

Схема последних довольно проста. В стенке газохода за воздухоподогревателем устанавливают электрическую лампу, а точно напротив — линзу, фокусирующую свет этой лампы на фотоспротивление. Изменение тока, проходящего через фотоспротивление и зависящего от степени дымности, регистрирует милливольтметр со шкалой типа шкалы Рингельмана (рис. 92), имеющей черную и белую секции (номера на рисунке соответствуют номерам степени дымности по шкале Рингельмана).

У визуального дымномера (рис. 93) во избежание загрязнений стекло 2 и 12 организован воздушный заслон. Воздух подается к ним из напорных воздухопроводов котлов через овальные

отверстия (4×50 мм), расположенные по окружности труб 1 и 11. Зеркала 7, установленные в камерах отражателей 3 и 6, имеют регулировочные винты 10. (Остальные позиции означают: 4 — муфта; 5 — труба диаметром 140 мм; 8 — откидной болт; 9 — крышка-зеркалодержатель; 13 — электролампа 150 Вт; 14 — фонарь.)

Большое значение для надежной работы котлоагрегатов имеет аварийно-предупредительная сигнализация. Включение приборов и устройств этой сигнализации свидетельствует о приближении некоторого параметра к опасному для всего агрегата пределу. Такими важнейшими параметрами являются уровень воды в барабане котла и давление пара в нем, причем наиболее опасно снижение уровня. Повышение давления при исправных предохранительных клапанах менее опасно, так как его следствием обычно бывает лишь безвозвратная потеря тепла и конденсата в виде пара. Упуск же воды в котле, как правило, влечет за собой выход котла из строя.

Для предупреждения обслуживающего персонала об опасном состоянии уровня воды в котле имеется много устройств и приборов, однако наиболее надежен обычный водоуказательный прибор. Большинство приборов дублирует показания уровня воды не в барабане котла, а в водоуказательном приборе. При этом нарушается основной принцип аварийно-предупредительной сигнализации — ее независимость от других систем и КИП и непосредственное измерение параметра.

Таким образом, при неисправности водоуказательного прибора такая аварийная сигнализация также не сработает. Существующие схемы сигнализации непосредственно по уровню в барабане котла (схема с двумя — тремя электродами, с радиоактивными изотопами и др.) ненадежны (по крайней мере для морских котлов).

Газоанализаторы предназначены для количественного определения состава газообразных продуктов горения, которое, в свою очередь, необходимо для контроля качества топочного процесса. По данным газового анализа производят наладку топочных устройств.

Для периодического контроля горения применяют ручные (переносные) газоанализаторы, а для постоянного наблюдения за качеством горения в котельных отделениях новых судов — автоматические газоанализаторы.

Современные газоанализаторы позволяют производить полный анализ продуктов горения, т. е. определять процентное содержание углекислоты, окиси углерода, кислорода, водорода и несгоревших углеводородов. Такой анализ вследствие его сложности применяют редко. Обычно ограничиваются определением процентного содержания в дымовых газах углекислоты CO_2 , точнее $\text{RO}_2 = \text{CO}_2 + \text{SO}_2$ и кислорода O_2 . Поэтому на судах применяют упрощенные приборы для неполного анализа объемного содержания газов. Эти приборы, называемые газоанализаторами Орса́, основаны на принципе избирательного поглощения.

Прибор состоит из измерительной бюретки 8 (рис. 94) емкостью 100 см³, распределительной гребенки 6 и поглотительных сосудов 3 и 5, заполненных поглощающими растворами. На левые открытые концы поглотительных сосудов надевают резиновые мешочки 4, предохраняющие реактивы от соприкосновения с воздухом.

Измерительная бюретка 8 имеет градуировку в кубических сантиметрах. Метка 0 помещается в нижней части, а метка 100 — в верхнем суженном сечении. Нижняя часть бюретки, по которой берут отсчеты, для увеличения цены деления сильно сужена и

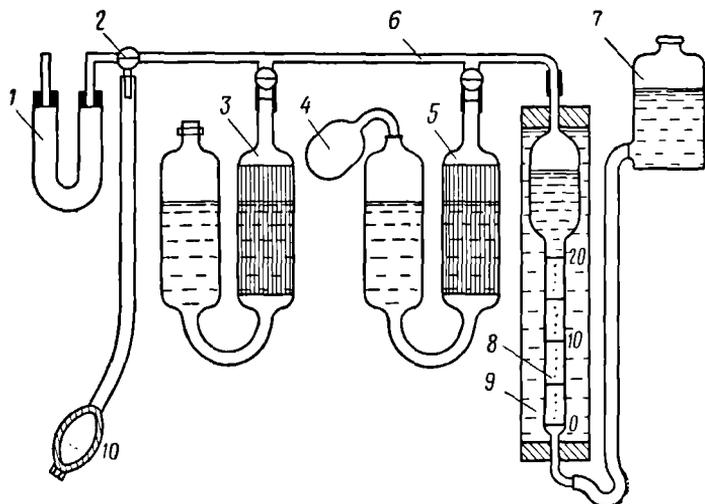


Рис. 94. Газоанализатор Орса́

соединена резиновым шлангом с уравнильным сосудом 7. Для того чтобы изменение температуры внешней среды мало влияло на объем газа, бюретка помещена в заполненный водой сосуд 9.

Распределительная гребенка 6 соединяет поглотительные сосуды, снабженные притертыми стеклянными кранами с бюреткой и с трехходовым краном 2. К этому крану подключены фильтр 1, наполненный стеклянной ватой, и резиновая груша 10. Поглотительный сосуд 3 содержит водяной раствор КОН, поглощающий углекислоту CO₂ и сернистый газ SO₂ (обозначаемые общим символом RO₂), а поглотительный сосуд 5 — водный раствор пирогалловой кислоты с едким кали, поглощающий кислород. Каждый из поглотительных сосудов состоит из двух сообщающихся частей, в одной из которых находится пучок стеклянных трубок для увеличения поверхности поглощения и ускорения анализа.

Фильтр прибора соединяют резиновым толстостенным шлангом с вставленной в газоход стальной трубкой для забора пробы газов. В уравнильный сосуд наливают окрашенную воду. С помощью резиновой груши заполняют газоподводящую линию газом.

Переключая трехходовой кран на гребенку, опускают уравнильный сосуд и заполняют газом измерительную бюретку. После этого газ удаляют, соединяя трехходовой кран с атмосферой и поднимая уравнильный сосуд (перед взятием пробы для анализа уровень растворов в поглотительных сосудах доводят до контрольных меток под их кранами, опуская уравнильный сосуд). Затем с помощью трехходового крана гребенку 6 соединяют с фильтром 1. Медленно опуская уравнильный сосуд, создают разрежение в измерительной бюретке, после чего в нее засасывается газ.

Для приведения давления пробы газа к атмосферному уравнильный сосуд ставят в такое положение, чтобы уровни в нем и в измерительной бюретке 8 были одинаковыми, и закрывают трехходовой кран. При этом в измерительной бюретке будет находиться 100 см^3 дымовых газов при атмосферном давлении (объемом газов в гребенке пренебрегают). Затем открывают кран поглотительного сосуда 3 с раствором КОН и медленно поднимают этот сосуд, доводя уровень воды в измерительной бюретке 8 до верхней метки 100.

После этого 4—5 раз опускают и поднимают уравнильный сосуд 7 так, чтобы уровень раствора в поглотительном сосуде 3 поднимался до метки под краном и снова опускался вниз. Затем доводят уровень раствора до метки, закрывают краник сосуда 3, опускают уравнильный сосуд 7 так, чтобы уровни в нем и в измерительной бюретке 8 совпали, и записывают содержание RO_2 (в кубических сантиметрах или, что то же самое, в процентах по шкале бюретки).

Для контроля производят проверочную прокачку. Если при этом отсчет не изменится, считают, что RO_2 поглощена полностью.

Остаток газа с помощью уравнильного сосуда выжимают в поглотительный сосуд 5 и определяют содержание кислорода. Анализ газов занимает обычно 5—7 мин, т. е. характеризует уже прошедшее состояние топочного процесса.

Получаемые в результате анализа входящих газов величины RO_2 и O_2 представляют собой процентное содержание этих газов в объеме сухих продуктов сгорания 1 кг топлива ($V_{с.г} \text{ нм}^3/\text{кг}$). Таким образом, можно по соотношениям, приведенным в гл. IV, определить коэффициент избытка воздуха и потери от химического недожога, что позволяет судить о качестве топочного процесса.

Автоматические газоанализаторы, иногда устанавливаемые в котельном отделении, непрерывно анализируют состав газов и передают соответствующие данные указывающим приборам. Их описания приведены в инструкциях заводов-изготовителей.

Солемерами называют приборы, постоянно контролирующие содержание питательной воды. Принцип действия приборов основан на методе измерения электропроводности, при котором определение содержания соли сводится к измерению сопротивления электролита. Через датчик солемера, имеющий два электрода, непрерывно протекает небольшое количество питательной воды.

Электроды датчика включены в снабженный милливольтметром измерительный мост, одним из плечей которого является сопротивление воды между электродами. На шкале милливольтметра непосредственно даны значения содержания хлористого натрия (в мг/л). Некоторые солемеры снабжены устройством, которое подает аварийный световой и звуковой сигналы в случае превышения установленного предела соледержания.

Помимо рассмотренных основных приборов, на новых судах устанавливают и другие: расходомеры перегретого пара, воды, топлива, автоматические газоанализаторы, дающие величины RO_2 , CO , H_2 и O_2 , и т. д.

При испытаниях котельной установки применяют приборы, как правило, с повышенной точностью.

§ 36. Автоматическое регулирование котлов

Режим работы парового котла определяется его паропроизводительностью или теплопроизводительностью и характеризуется параметрами. У котлов с естественной циркуляцией есть три основных параметра режима работы: давление пара, температура пара и уровень воды.

Для производства пара в котел подается вода, топливо и воздух. Котел является аккумулятором воды и тепла. Запас воды в котле определяется уровнем. Запас тепла заключен преимущественно в нагретой до температуры парообразования воде и частично в металле. Запас тепла пропорционален температуре парообразования или давлению пара в пароводяном котле.

Основные параметры режима котла изменяются в зависимости от расхода пара. В целях экономичности и надежности работы парового двигателя температуру перегретого пара следует поддерживать постоянной. При установившемся режиме расход пара, количество подаваемого в котел топлива и воды, а также запас воды и тепла в котле не изменяются.

У паровых двигателей давление пара перед ними пропорционально расходу пара. Поэтому при увеличении расхода пара на двигатель давление пара падает; чтобы восстановить его, следует увеличить подачу топлива, воздуха и воды в котел. При уменьшении расхода пара давление растет и подачу топлива, воздуха и воды необходимо соответственно уменьшить.

Таким образом, количество подаваемого в котел топлива, воздуха и воды и температуру перегретого пара необходимо регулировать в зависимости от изменения расхода пара, от уровня воды в котле и от давления пара.

До недавнего времени применяли преимущественно ручное регулирование. Котельный машинист наблюдал за показаниями манометра, водоуказательного прибора и прибора, измеряющего температуру пара после пароперегревателя, и регулировал подачу топлива и воздуха в топочные устройства, открытие питательных клапанов и действие регуляторов температуры пара.

Однако в современных высоконапряженных водотрубных котлах с малым запасом воды и тепла запаздывание, свойственное ручному регулированию, приводит к значительным колебаниям параметров и к опасности повреждений котлов и паровых двигателей. Автоматические регуляторы воспринимают изменения регулируемых параметров и в соответствии с этим воздействуют на органы, управляющие подачей топлива, воздуха и воды и температурой пара. В этом случае котел представляет собой регулируемый объект.

В систему автоматического регулирования работы котла входят: датчик-измеритель, воспринимающий начальный импульс регулирования (манометр, термометр, уровнемер); устройство для передачи импульса исполнительному или регулируемому органу; сам исполнительный или регулирующий орган, изменяющий подачу топлива и воды, частоту вращения котельного вентилятора и т. п.

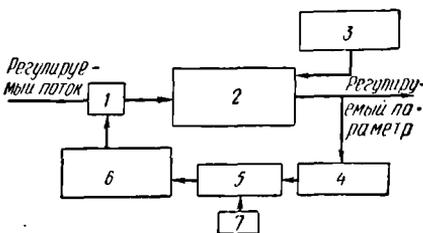


Рис. 95. Схема контура регулирования

Импульсом регулирования называется отклонение параметра от номинального (заданного) значения. Номинальные значения чаще всего задаются исходя из оптимального режима работы, т. е. когда заданная котлу нагрузка обеспечивается с наименьшими потерями энергии (с наибольшим к. п. д. котла).

Нарушения оптимального режима (возмущения) могут быть вызваны внутренними причинами (загрязнение поверхности нагрева, изменение коэффициента избытка воздуха, качества распыла и т. д.) и внешними (изменение нагрузки турбины, температуры питательной воды и т. д.).

На рис. 95 показана схема контура регулирования.

Для перемещения регулирующего органа 1 (клапана, заслонки и т. д.) необходимо затратить работу. Если энергия, создаваемая датчиком-измерителем 4, для этой работы достаточна, такое устройство называется регулятором прямого действия.

Если необходимое для перемещения регулирующего органа усилие превышает усилие, создаваемое измерителем, то в контур вводят усилитель 5 и сервомотор. Это устройство усиливает принятый от измерителя импульс с помощью получаемой от постоянного постороннего источника 7 вспомогательной энергии и передает его исполнительному устройству 6. В этом случае относительно слабое усилие, развиваемое измерителем, управляет потоком вспомогательной энергии от постоянного источника к сервомотору исполнительного устройства (2 — объект регулирования; 3 — источник возмущения). Регуляторы такого типа называются регуляторами непрямого действия. Внешним источником энергии здесь может быть вода под давлением (гидравлические системы), сжатый воздух (пневматические системы) и электроэнергия.

В качестве датчиков-измерителей используют достаточно чувствительные КИП.

В манометрическом датчике (рис. 96, *а*) измерителем давления служат трубка Бурдона, сильфон или (для малых давлений) мембрана. Дилатометрический датчик (рис. 96, *б*) состоит из металлической трубки с большим коэффициентом теплового расширения, в которой закреплен стержень с малым коэффициентом расширения. Такой датчик при изменении температуры (например, перегретого пара) передает импульс контуру. Третий датчик (рис. 96, *в*), также реагирующий на изменение температуры, основан на применении терморпары.

Когда регулятор восстанавливает оптимальное значение регулируемого параметра, его действие должно прекратиться, т. е. исполнительный механизм должен стать в нейтральное положение. Для этого предусмотрена так называемая обратная связь, которая связывает исполнительный механизм с усилителем так, что перемещение регулирующего органа оказывает на него воздействие, обратное полученному от датчика. Обратная связь не допускает перерегулирования, т. е. излишнего изменения регулируемого параметра.

Конструкция усилителя и сервомотора зависит от рода вспомогательной энергии. При использовании электроэнергии сервомотором служит электродвигатель (вращающий котельный вентилятор или открывающий через передачу заслонку либо клапан), а усилитель импульса представляет собой управляемый датчиком контактор для пуска и остановки электродвигателя.

На рис. 97, *а* показан пневматический проточный золотник-усилитель. Сжатый воздух постоянного давления подводится к выходному отверстию 1 и выпускается в атмосферу через зазор между стержнем 2 и верхним седлом 4 золотника. Если стержень 2 опустится, входное отверстие прикроется, а выходное приоткроется; в результате давление в камере 3 золотника упадет. Таким образом, давление сжатого воздуха в камере золотника (командное давление, передающееся на поршень сервомотора) определяется положением стержня 2, которое изменяется импульсом от измерителя (в данном случае давлением).

Гидравлический усилитель со струйной трубкой показан на рис. 97, *б*. Он состоит из струйной трубки 1 и сопловой плитки с двумя каналами, через которые рабочая жидкость может поступать в ту или иную полость поршневого сервомотора. Трубка 1 поворачивается в результате перемещения стержня 2, связанного с датчиком-измерителем. Пружина 3 служит для настройки и обеспечивает среднее положение трубки при номинальном значении регулируемого параметра.

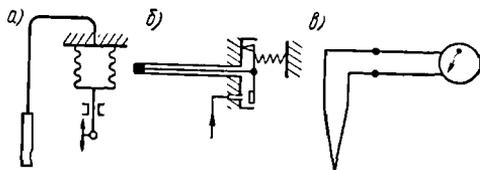


Рис. 96. Датчики

В некоторых системах автоматического регулирования применяется также усилительное реле с регулирующей заслонкой (рис. 98), использующее в качестве энергии для сервомотора давление питательной воды.

К соплам 3 подводится вода под давлением. Здесь энергия давления преобразуется в кинетическую энергию. Вода с большой скоростью выходит из сопел 3 и попадает в сопла 5, где скорость воды снова преобразуется в давление. Заслонка 4 распределяет воду в правые и левые сопла: чем меньше воды попадает в сопло, тем меньшее развивается в нем давление, действующее на пор-

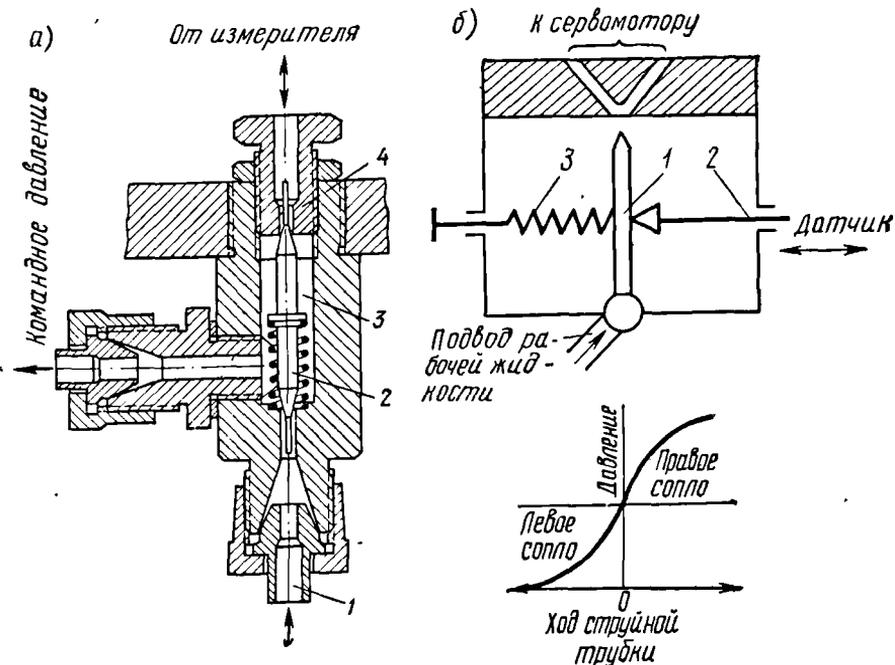


Рис. 97. Пневматический проточный золотник-усилитель и струйный усилитель

шень сервомотора 6. Перемещением заслонки 4 управляет сильфонный манометр 1, воспринимающий импульс от регулируемого параметра (2 — пружина).

Обычно питание котла водой, подача в котел топлива и воздуха и температура перегретого пара регулируются отдельно. Автоматизация питания котла с естественной циркуляцией сводится к автоматическому поддержанию уровня воды в пароводяном коллекторе в заданных пределах.

На рис. 99 показана схема одноимпульсного термогидравлического регулятора уровня.

Измеритель (датчик) уровня воды в барабане котла представляет собой трубку 12, сообщенную клапанами 1 и 10 с паровым

и водяным пространствами барабана. Трубка 12 в своей нижней части снабжена ребрами 3 для более интенсивного охлаждения. Верхняя часть трубки покрыта изоляцией (показана пунктиром).

В трубке 12 и в соединительной трубке 11 устанавливается уровень, соответствующий уровню воды в барабане котла. Трубка 12 окружена кожухом 2. Полость А внутри рубашки соединена с герметичной полостью сильфона 4, регулирующего открытие питательного клапана 6 (установлен между экономайзером 7 и барабаном котла).

В положении полного закрытия клапана 6 полость А и соединительная трубка к сильфону 4 заполнены конденсатом. Чем выше будет давление в замкнутой полости А, тем больше будет усилие, действующее на диск сильфона 4 и тем больше откроется клапан 6, регулирующий подачу воды в котел.

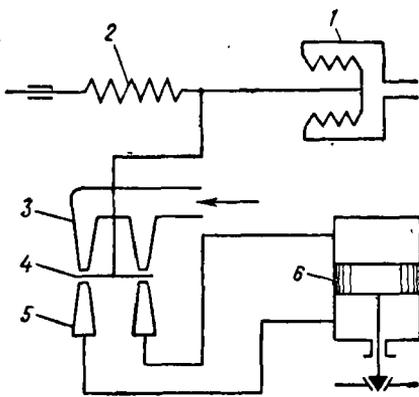


Рис. 98. Схема гидравлического усилительного реле с заслонкой

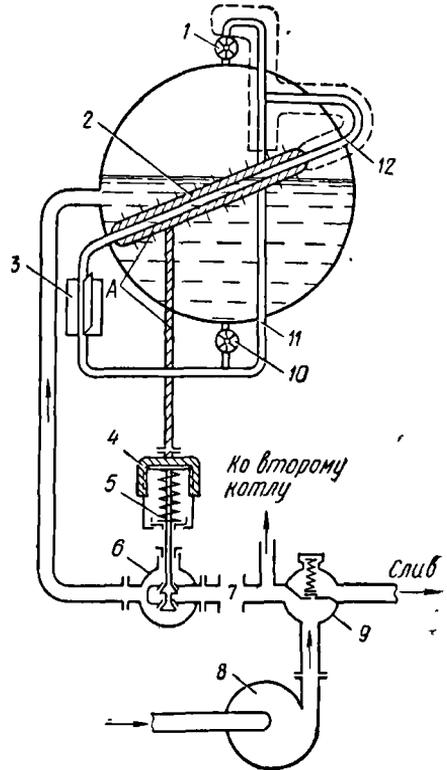


Рис. 99. Схема термогидравлического регулятора уровня

От уровня воды в барабане зависит заполнение трубки 12 паром, от чего зависит, в свою очередь, количество тепла, воспринимаемого конденсатом в полости А кожуха 2. При этом давление в полости и создаваемое им на сильфоне усилие изменяются в зависимости от уровня воды в барабане.

Пружина 5 служит для уравнивания усилия, передаваемого на диск, а сбрасывающий клапан 9 — для поддержания постоянного давления воды в питательной магистрали (8 — питательный насос).

Недостаток одноимпульсных регуляторов в том, что их действие не учитывает влияния на уровень изменения паросодержания

воды в котле. При быстрых изменениях уровня, происходящих в современных высоконапряженных котлах с малым относительным содержанием воды при изменении нагрузки, иногда невозможно сохранить неизменное положение уровня, даже при полном открытии или полном закрытии питательного клапана.

При снижении давления пара увеличивается его расход и повышается паросодержание воды. Происходит так называемое «набухание уровня», вызываемое дополнительно образующимися пузырьками пара. Тогда одноимпульсный регулятор, регулирующий только уровень, в первый момент уменьшает питание, в то время как его следовало бы увеличить. При уменьшении расхода пара паросодержание воды падает, уровень «садится» и регулятор увеличивает подачу питательной воды.

Чтобы избежать этого недостатка, регулятор питания делают двухимпульсным, добавляя к импульсу от уровня еще импульс от расхода пара.

При автоматическом регулировании процесса горения давление пара и соотношение между количеством топлива и воздуха, подаваемых в топку, поддерживаются в заданных пределах, т. е. поддерживаются наиболее выгодные значения коэффициента избытка воздуха при различных режимах работы котла.

При ручном управлении котельный машинист, заметив изменение давления пара, изменяет частоту вращения вентилятора и количество действующих форсунок. Такое регулирование является ступенчатым.

В автоматических системах регулирования механических форсунок достигают плавного изменения расхода топлива изменением количества действующих форсунок и количества топлива, подаваемого отдельными форсунками. Производительность современных паромеханических форсунок регулируют только изменением давления топлива перед форсунками.

Автоматика горения позволяет сократить штат обслуживающего персонала, повысить надежность работы котлов и за счет поддержания наиболее выгодного коэффициента избытка воздуха снизить расход топлива, а также уменьшить дымность и отложения сажи в газоходах.

На паровых судах применяют различные схемы регулирования горения. В одних системах регуляторы топлива и воздуха работают одновременно, в зависимости от изменения нагрузки котла (давления пара), в других основной импульс (давление пара) управляет лишь подачей воздуха. Подача топлива к форсункам котла устанавливается пропорционально действующему количеству подачи воздуха.

В разных системах в качестве вспомогательной энергии применяют воду под давлением, сжатый воздух и электроэнергию.

На рис. 100 показана гидравлическая система автоматического регулирования горения, примененная в котельных установках танкеров типа «София» отечественной постройки.

Главный регулятор 11 получает из главного паропровода 1 импульсы от давления пара перед главной турбиной и посредством главного сервомотора 10 поворачивает кулачковый вал 4. Обратная связь главного регулятора осуществляется через кулачковую шайбу 5, которая постепенно возвращает регулятор в нейтральное положение.

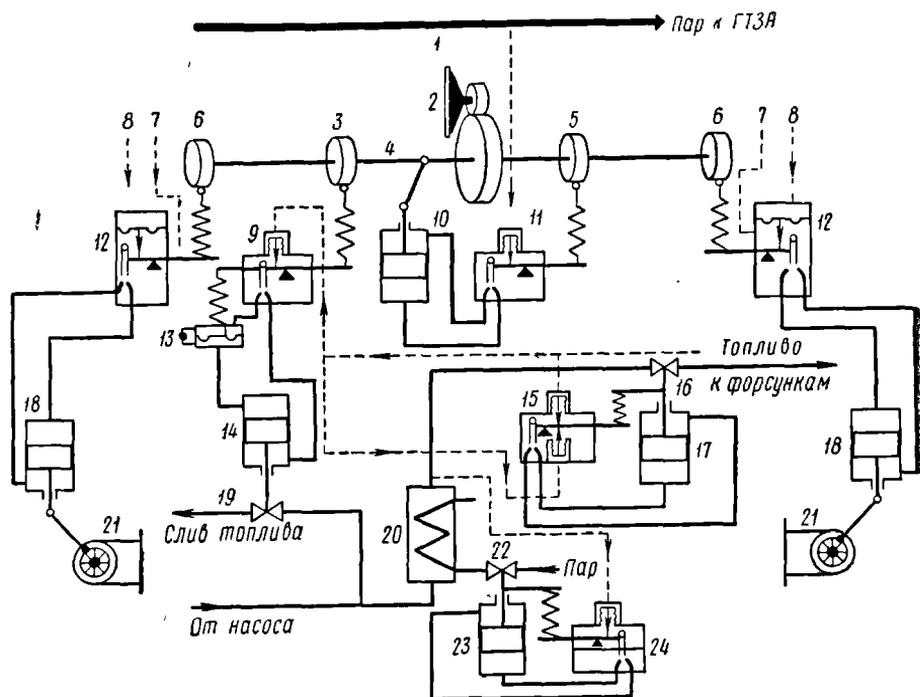


Рис. 100. Система автоматического регулирования горения

Главный регулятор 11 и остальные регуляторы 9, 12 и 15 имеют струйные усилители. Поворот вала 4 через кулачковые шайбы 3 и 6 нарушает равновесие регуляторов 12 подачи воздуха и регулятора 9 давления топлива.

Регуляторы 12 приводят в действие сервомоторы 18 воздушных заслонок на всасывающей стороне котельных вентиляторов 21. К регуляторам 12 подведены импульсные магистрали 7 и 8, передающие дополнительный импульс от напора воздуха перед топками обоих котлов.

Регулятор 9 давления топлива имеет так называемый изодром 13, т. е. гибкую обратную связь, действующую на регулятор так, что ее влияние убывает за время переходного процесса регулирования. В результате по окончании переходного процесса регулируемый параметр возвращается к прежнему значению. Регулятор 9,

получая импульс от давления топлива в магистрали, с помощью сервомотора 14 управляет главным топливным клапаном 19.

В контур топливоподачи включен также регулятор 15, который с помощью сервомотора 17 управляет клапаном 16, прикрывающим поступление топлива к форсункам при малых нагрузках. Регулятор 15 связан с регулятором 9 так, что при увеличении нагрузки и соответственно давления топлива в магистрали он фактически выводится из действия.

Регулятор 24 через сервомотор 23 и клапан 22 управляет подачей пара в подогреватель 20 топлива. Регулятор получает импульс от измерителя температуры, помещенного на топливопроводе за подогревателем.

Все импульсные трубопроводы показаны на схеме пунктирами. Подача конденсата к струйным усилителям регуляторов на схеме не показана.

С помощью маховика 2 возможно ручное регулирование.

На новейших судах постоянная вахта у котлов отсутствует, а котельной установкой управляют из ЦПУ.

Кроме устройств питания и горения, существуют автоматические регуляторы температуры перегретого пара (см. § 26), вязкости мазута перед форсунками, перепуска холодного воздуха мимо воздухоподогревателя (во избежание коррозии последнего на малых нагрузках котлов) и устройства для сажеобдувки.

Системы автоматического управления сажеобдувкой работают по заданной программе, последовательно включая сажеобдуватели и подавая в них пар в течение определенного времени.

Глава XI. ВОДНЫЙ РЕЖИМ КОТЛОВ

§ 37. Характеристика воды

Качество воды, подаваемой в котел и находящейся внутри него, имеет важнейшее значение для надежной и экономичной эксплуатации котла. Вопросы, связанные с контролем качества воды, изменением состава растворенных в ней солей и газов и другие, настолько обширны, что за последние 30—35 лет они выделились в специальную отрасль эксплуатации котельных установок.

Все паросиловые установки морских судов работают по замкнутому циклу, т. е. отработавший в главной машине (турбине) и вспомогательных механизмах пар конденсируется в конденсаторе. Конденсат перекачивается обратно в котел. При такой схеме неизбежны утечки пара и конденсата. Кроме того, пар и вода безвозвратно расходуются на хозяйственно-бытовые нужды, продувку котлов и т. д. На современном морском судне потери конденсата составляют 1—2%, а на небольших пароходах — до 4% паропроизводительности котлов.

Для пополнения конденсата в систему котлов необходимо вводить добавочную воду (добавочное питание), содержащую различные соли. Поступая вместе с водой внутрь котла, некоторые из солей под действием высокой температуры переходят в нерастворимое состояние. Соли, оседающие на внутренних стенках поверхности нагрева котла, снижают его паропроизводительность и вызывают перерасход топлива, так как накипь имеет очень малый коэффициент теплопроводности λ (в несколько раз меньший, чем λ стали) и может стать причиной аварии котла.

Если не принять мер, то в процессе эксплуатации концентрация солей внутри котла будет постепенно увеличиваться и котел придется очень скоро выводить из действия.

В настоящее время разработаны достаточно совершенные методы водного режима и водообработки, позволяющие увеличить срок между котлоочистками до 8000 и даже 10 000 ч.

В паросиловых установках морских судов различают воду:

котловую, находящуюся внутри котла при его работе;

питательную, подаваемую в котел;

конденсат (различают конденсат отработавшего пара поршневых машин и турбин);

добавочную, добавляемую к конденсату (смесь конденсата и добавочной воды образует питательную воду);

продувочную, удаляемую из котла при его верхнем и нижнем продувании;

береговую (пресная вода, принимаемая с берега в танки судна и предназначенная для питания котлов);

дистиллят — продукт испарения забортной или береговой воды (различают дистиллят и бидистиллят, т. е. продукт двойной перегонки воды);

умягченную — химически обработанную воду (для удаления из нее накипеобразующих солей);

катионированную, подвергшуюся фильтрации в специальных катионитовых фильтрах с заменой накипеобразующих солей на более безопасные для эксплуатации котла;

забортную, т. е. морскую.

Добавочное питание на большинстве судов, как правило, производится дистиллятом.

Качество воды определяют по нескольким характеристикам: сухому остатку, общему солесодержанию, содержанию масла и кислорода в воде, содержанию фосфатов и хлоридов, жесткости воды, щелочности воды, водородному показателю.

Сухой остаток, т. е. содержание нелетучих веществ, находящихся в воде в молекулярно-дисперсном или коллоидном состоянии (выражается в мг/л). Сухой остаток определяют выпариванием пробы воды с последующим просушиванием остатка. Сухой остаток не равнозначен общему содержанию солей в воде: он не учитывает летучих веществ, а также растворимых в воде газов.

Общее солесодержание — сумма всех растворенных в воде солей (выражается в мг-экв/л).

Содержание масла в воде (выражается в мг/л). Масло, попадающее в котел, может быть впитано накипью, в результате чего образуется продукт черного или темно-коричневого цвета, обладающий весьма малым коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,5 \div 0,1$ ккал/м·ч·°С. Конденсат турбин практически не содержит масла, но в конденсате паровых машин его количество может достигать до 50 мг/л, чем создается серьезная опасность при эксплуатации котла.

Содержание кислорода в питательной воде (выражается в мг/л). Растворимость кислорода в воде растет с понижением температуры и увеличением давления (и наоборот).

Содержание фосфата (выражается в мг/л), т. е. растворимых в воде солей фосфорных кислот — иона фосфата PO_4^{3-} или окисла P_2O_5 .

Содержание хлоридов, т. е. хлористых солей (NaCl , MgCl_2 и др.), оценивается по содержанию в воде хлор-иона Cl^- и выражается в мг/л. Содержание хлоридов является важной характеристикой для морских котлов, так как позволяет, например, контролировать степень засоления конденсата морской водой при нарушении герметичности конденсатора. Применяют еще выражение солености в градусах Брандта (°Бр). 1° Бр приблизительно соответствует 6 мг/л Cl^- .

Жесткость воды (выражается в мг-экв/л). Под общей жесткостью понимают содержание всех растворимых в воде солей Ca и Mg . Для воды с малой жесткостью (конденсат, дистиллят) жесткость выражают в мкг-экв/л, т. е. в тысячных долях миллиграмм-эквивалента.

Различают карбонатную (временную) жесткость, характеризующую содержанием в воде бикарбонатов Ca и Mg , и некарбонатную (постоянную) жесткость, определяемую содержанием всех других солей Ca и Mg , кроме карбонатных (т. е. CaSO_4 , MgSO_4 , CaCl_2 и т. д.).

Общая жесткость равна сумме карбонатной и некарбонатной жесткостей, т. е.

$$J_0 = J_k + J_n.$$

В СССР жесткость воды измеряют также в миллиграмм-эквивалентах концентрации катиона Ca^{2+} или Mg^{2+} .

Щелочность воды зависит от наличия в ней ионов (OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-}) и оценивается содержанием щелочных солей, пересчитанных на NaOH (т. е. щелочным числом $A_{\text{щ}}$, A_z или N_z), выраженным в миллиграммах на литр NaOH , т. е.

$$A_{\text{щ}} = \text{NaOH} + \frac{\text{Na}_2\text{CO}_3}{4,5} + \frac{\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 10 \cdot \text{H}_2\text{O}}{15} + \dots$$

Щелочность воды выражают также в миллиграмм-эквивалентах на литр, т. е. величиной $\frac{A_{щ}}{40}$ и относительной щелочностью (содержанием щелочей, выраженным в процентах от общего солесодержания воды).

Щелочность пресной воды обычно принимают численно равной ее временной жесткости (мг-экв/л).

Для расчета щелочности котловой воды используют формулу для $A_{щ}$.

Водородный показатель рН характеризует концентрацию ионов водорода в воде.

Опыт показывает, что молекулы воды диссоциируют на ионы, причем степень диссоциации

$$K = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]}.$$

При температуре 23°С величина ионного произведения воды

$$K_{H_2O} = [H^+][OH^-] = 10^{-14}.$$

Если $[H^+] = [OH^-]$, то реакция воды будет нейтральной. Водородным показателем рН называют отрицательный логарифм концентрации иона водорода, т. е.

$$pH = -\lg [H^+].$$

Таким образом, величина рН воды или раствора определяет ее реакцию. Щелочная среда, например, характеризуется $pH > 7$, кислая — $pH < 7$.

При добавлении в воду щелочей концентрация ионов OH^- будет расти, а ионов H^+ — уменьшаться, т. е. рН станет увеличиваться.

Из-за высокого солесодержания забортной морской воды ее попадание, даже в небольших количествах, в конденсат или пресную воду, находящуюся в танках и цистернах судна, резко ухудшает качество питательной воды и может сделать ее вообще непригодной для питания котлов. Поэтому содержание хлоридов в конденсате, дистилляте, береговой и котловой воде постоянно контролируют и регламентируют определенными нормами, зависящими от типа котла и параметров пара (табл. 8 и 9).

Соотношение между содержанием хлор-иона и солей в морской воде является примерно постоянным, поэтому контроль по хлоридам позволяет оценить и общее засоление конденсата или пресной воды.

В судовых котельных установках низкого давления, а также на некоторых судах с водотрубными котлами в качестве добавочной воды используют иногда пресную береговую воду (при условии дополнительной ее обработки). В этих условиях необходимо знать характеристики природных вод, применяемых судами в морских портах. Например, такая важная характеристика воды, как жесткость, изменяется в разных портах в несколько сот раз. Кроме

того, качество воды может быть различным даже для одного и того же порта в зависимости от ее происхождения (озерная, речная, артезианская и т. д.), времени года, метода хранения в порту (плавъемкость, водопровод) и т. д. Качество воды указывают в сертификате или определяют в судовой лаборатории водоконтроля (см. ниже).

Таблица 8

Вид воды	Контролируемый показатель	Рекомендуемая периодичность контроля
Котельная во всех цистернах Дистиллят и химически умягченная	Хлориды (хлор-ион) Хлориды, общая жесткость	Раз в сутки Раз за вахту
Конденсат главных и вспомогательных конденсаторов	Хлориды, масло	Раз в сутки
Питательная для котлов с давлением пара, кгс/см ² : до 20	Общая жесткость, хлориды, масло	Раз за вахту
до 60	То же и кислород	То же
свыше 60	То же и соединения железа и меди	"
Котловая	Щелочное число, хлориды, фосфатное число, нитратное число	Два раза в сутки

Примечание. Рекомендуемая периодичность контроля может изменяться в зависимости от инструкций по эксплуатации котлов.

Таблица 9

Вид воды	Показатель качества	Огнетрубные котлы	Водотрубные котлы с давлением, кгс/м ²			
			до 20	20—40	40—60	свыше 60
Добавочная	—	Сырая пресная			Дистиллят	
Питательная	Общая жесткость, мг·эquiv/л	<0,5	<0,3	<0,02	<0,002	<0,001
	Содержание масла и нефтепродуктов, мг/л	<3	<3	Отсутствует		
Конденсат	Содержание кислорода, мг/л	Не нормируется	<0,05	<0,03	<0,02	
	Содержание хлоридов, мг/л	<50	<10	<2	<0,2	<0,1
Сырая пресная	Общая жесткость, мг·эquiv/л	<8	<5	—	—	—
Дистиллят или химически умягченная	Общая жесткость, мг·эquiv/л	—	<0,05	<0,02	<0,001	<0,001

Различают следующие группы воды: очень мягкая (с общей жесткостью до 0,7 мг-экв/л); мягкая (0,7—2 мг-экв/л); средней жесткости (2—4 мг-экв/л); жесткая (4—8,6 мг-экв/л); очень жесткая (свыше 8,6 мг-экв/л).

§ 38. Накипеобразование и коррозия

Правильная организация водного режима должна предотвращать накипеобразование на внутренних стенках поверхности нагрева котла и коррозию элементов котельной установки. Кроме того, она должна обеспечивать надлежащую чистоту насыщенного пара, выдаваемого котлом.

При работе котла вода непрерывно выпаривается и пополняется питательной водой, включающей различные соли. Уже после нескольких часов работы котла, даже при небольшом соле-содержании питательной воды для многих солей будет достигнут предел насыщения и начнется выпадение твердой фазы в виде накипи или шлама.

В питательной воде, поступающей в котел, в основном содержатся катионы Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и анионы Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HSiO_3^- , OH^- , PO_4 . При этом соли натрия имеют высокий коэффициент растворимости¹, причем NaOH и NaCl — положительный, а Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , Na_2SiO_3 — отрицательный.

Соединения CaCl_2 , MgCl_2 , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ и MgSO_4 сравнительно высоко растворимы, соединения CaSO_4 , CaCO_3 , MgCO_3 , CaSiO_3 , MgSiO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $\text{Mg}(\text{OH})_2$ труднорастворимы, причем имеют отрицательный коэффициент растворимости (рис. 101).

Насыщенного состояния наиболее быстро достигают труднорастворимые соединения с отрицательным коэффициентом растворимости, т. е. соединениями CaSO_4 , CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и др.

Некоторые вещества (CaSO_4 , CaSiO_3 и др.) кристаллизуются преимущественно на поверхности, образуя опасную для работы котла накипь, другие — MgSiO_3 , $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ — в массе воды, образуя шлам, т. е. илообразный осадок, оседающий в нижнюю часть водяного пространства котла.

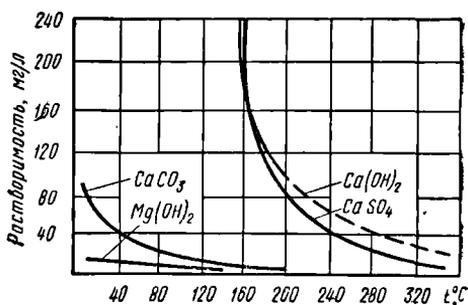


Рис. 101. Влияние температуры на растворимость некоторых соединений

¹ Коэффициентом растворимости называют количество вещества, образующее насыщенный раствор в 100 мл воды при заданной температуре. При положительном коэффициенте растворимость увеличивается с увеличением температуры, при отрицательном — уменьшается.

Некоторые соединения, например $Mg(OH)_2$, образуют прикипающий к стенкам шлам, не менее опасный для работы водогрейных труб, чем обычная накипь.

Таким образом, в зависимости от условий работы один и тот же катион может образовать различные вещества, которые будут выпадать из раствора либо в виде опасной и трудноудаляемой накипи, либо в виде легкоподвижного шлама. Например, $CaCO_3$ в нейтральной среде и некипящей воде (т. е. в характерных условиях для водяных экономайзеров) образует на поверхности их труб кристаллическую накипь, а в щелочной среде котловой воды выделяется преимущественно в виде шлама.

Водный режим внутрикотловых процессов должен быть организован так, чтобы были созданы условия для выделения всех попавших в котел с питательной водой солей жесткости только в виде легкоподвижного шлама, периодически (или непрерывно) удаляемого из котла. Появление в котле твердой накипи в настоящее время считается предаварийным состоянием.

Состав и строение накипи, как правило, сложны и разнообразны. Помимо химического состава котловой воды, на состав накипи влияют тепловая нагрузка поверхности нагрева водогрейных труб, интенсивность циркуляции воды в трубах, тип и конструкция котла, режим его работы.

Кроме того, часто невозможно сохранить постоянными характеристиками питательной воды. Если в качестве добавочной воды используют береговую воду, то состав ее меняется в каждом порту. Качество конденсата также не может быть неизменным, так как меняется не только состав забортной воды (при переходе из одного бассейна в другой), но и степень засоления конденсата (она может быть значительной, а после устранения подсосов в конденсаторе на стоянке судна — минимальной).

Как было отмечено, одной из основных задач организации водного режима является предотвращение коррозии, которая происходит в результате химических и электрохимических процессов.

В котлах может быть общая и местная коррозия. Последняя бывает язвенной, точечной, интеркристаллитной и транскристаллитной.

При язвенной коррозии металл разрушается на небольших участках, но на большую глубину. При диаметре язвин менее 1 мм коррозию называют точечной. При интеркристаллитной коррозии разрушение идет по границам зерен металла, при транскристаллитной — через зерна.

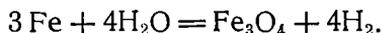
Избирательная коррозия, связанная с удалением из сплава какого-либо компонента, в котлах почти не встречается (но бывает в конденсатно-питательной системе).

Скорость коррозии определяют по уменьшению массы элементов котла (в $г/м^2 \cdot ч$) или по глубине разведения (в $мм/год$).

Сильная коррозия может быть следствием недостатков конструкции котла или (чаще) неправильной его эксплуатации (нарушения правил консервации и т. д.).

Предельно допустимые величины коррозионных повреждений элементов котла по площади, числу и глубине язвин устанавливает инспекция Регистра.

Обычно химическая и электрохимическая коррозия протекают совместно. Коррозия, возникающая при воздействии дымовых газов (газовая) или водяного пара (пароводяная) на стенках поверхностей нагрева котлоагрегата, является примером химической коррозии. Так, при пароводяной коррозии в пароперегревателях происходит непосредственная реакция между железом и паром по схеме:



В результате этой реакции образуется плотный черный слой окиси железа, защищающий металл труб от дальнейшего разрушения. До температуры пара 480—500°С скорость коррозии труб пароперегревателя относительно невелика, но затем резко возрастает.

Легирование стали элементами Mo, Cr и Ni значительно снижает скорость пароводяной коррозии.

Внутри котла в основном происходит электрохимическая коррозия. В местах соприкосновения металла с электролитами (котловой водой) возникают микрогальванические элементы, количество которых практически бесконечно велико. Их возникновению способствуют такие факторы, как незначительные различия в химическом составе металла, местная концентрация напряжений, наклеп, изменение концентрации электролита, качество обработки поверхности стали и ее состояние и т. п.

Между двумя участками поверхности металла, погруженного в электролит, возникает электрический ток, т. е. движение электронов e^- в направлении от участка с бóльшим электродным потенциалом (анод) к участку с меньшим потенциалом (катод).

На аноде ион-атомы переходят в раствор, а электроны, оставаясь в металле, сообщают последнему местный отрицательный заряд и движутся к катоду, где накапливаются.

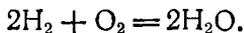
Через короткий промежуток времени после образования микрогальванозлемента его электродвижущая сила снижается, происходит так называемая поляризация.

Имеющиеся в воде анионы OH^- направляются к аноду, у которого, реагируя с ион-атомами железа, образуют $\text{Fe}(\text{OH})_2$. При этом поступление ион-атомов железа в раствор прекращается. Раствор возле анода насыщается железом, что препятствует дальнейшей гидратации последнего. Катионы H^+ направляются к катоду и, снимая с него электроны, образуют на нем слой H_2 , прерывающий ток.

Так обстоит дело в дистилляте, в котором диссоциация молекул воды невелика и в результате поляризации коррозия быстро прекращается.

Однако в котле всегда присутствуют вещества, способные удалять избыточные электроны с поверхности металла и разрушать защитные слои.

Наиболее сильным деполяризатором в присутствии диссоциированных молекул воды является кислород, который превращает водород, образовавшийся в виде слоя на катоде, в воду:



Кислород способствует также и анодной деполяризации, окисляя первичный окисел $\text{Fe}(\text{OH})_2$ в гидрат окиси железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$, который, обладая меньшей растворимостью, выпадает из раствора в осадок. При этом концентрация железа в растворе у анода снижается, что облегчает дальнейшее растворение железа.

Проникающие в раствор Cl^- и CO_2 разрушают защитную пленку окислов, образующуюся на поверхности стали.

Кислая реакция, при которой в воде содержится много катионов H^+ , снимающих с катода электроны и поддерживающих электрический ток в микроэlemente, также способствует коррозии. С другой стороны, щелочная реакция воды, способствующая избытку анионов OH^- и уменьшению концентрации H^+ , коррозию ослабляет, т. е. щелочи являются наиболее эффективным средством против коррозии. Поэтому величина концентрации водородных ионов (рН) в котлах должна быть около 10.

Электрохимическую коррозию с кислородной деполяризацией часто называют также кислородной коррозией, при которой наблюдается характерное язвенное разрушение металла.

Скорость коррозии увеличивается с повышением температуры и соответственно с повышением давления пара в котле.

Кислород поступает в котел с питательной водой, поэтому возможно более полное его удаление из воды является важнейшим условием снижения интенсивности коррозионных процессов. Опыт показал, что при содержании кислорода в питательной воде котлов высокого давления менее 0,02 мг/л процесс коррозии идет медленно. Такая концентрация кислорода может быть обеспечена при совершенной системе водоподготовки (см. ниже).

Иногда в котлах встречается накипь со значительным содержанием окислов железа и меди, способствующих развитию процесса электрохимической коррозии. Окислы железа и меди попадают в котел с питательной водой и являются продуктом коррозии и эрозии трубопроводов, крылаток питательных насосов и т. д.

Щелочная коррозия происходит при значительной концентрации NaOH , зависящей от рабочей температуры элемента котла (для барбанов — от давления пара).

У котлов высокого давления ($t_{\text{ст}} \geq 300^\circ \text{C}$) щелочная коррозия может быть при 5%-ной концентрации NaOH ; у котлов низкого давления этот предел повышается. Такие высокие концентрации NaOH могут возникнуть только в местах сильного упаривания воды, например в неплотных вальцованных соединениях труб, заклепочных швах, а также на стенках водогрейных труб при устойчивом нарушении циркуляции воды в них; кроме того, она может быть в местах упаривания воды под плотной пленкой шлама или накипи.

При щелочной коррозии наблюдается интеркристаллитное разрушение металла с резким снижением его ударной вязкости (щелочная хрупкость). При обнаружении щелочной хрупкости эксплуатацию котла прекращают до замены дефектных элементов.

Интеркристаллитная коррозия была распространена на морском флоте 20—30 лет назад, т. е. в период эксплуатации клепанных котлов. Она нередко была причиной взрыва котлов на судах. С появлением цельносварных котлов щелочная хрупкость встречается реже. Возникновению щелочной коррозии препятствует также широкое применение фосфатного водяного режима и нитратов.

Коррозионная усталость, также проявляющаяся в виде транскристаллитной коррозии, возникает из-за совместного действия переменных термических напряжений и электролитической коррозии. Транскристаллитная коррозия этого типа в судовых котлах наблюдается редко и является обычно следствием неправильного ввода питательных труб в барабан котла (подачи холодной воды на стенки барабана) или устойчивого расстройтва циркуляции воды в экранных и напряженных испарительных трубах котла.

§ 39. Водоконтроль

На морских судах обслуживающий персонал должен систематически контролировать качество воды (водоконтроль). Рекомендуются для данного судна (или серии судов) водный режим устанавливает парокотловодство. Общие нормы качества воды регламентируют Правила [10].

Методы водоконтроля изменяются с развитием водоподготовки и внутрикотловой обработки воды. Уже сейчас на судах морского флота применяют автоматические солемеры, непрерывно контролирующие содержание хлоридов в конденсате или питательной воде. В ближайшие годы будут автоматизированы все операции по подготовке и обработке воды.

Для водоконтроля регулярно в определенные сроки отбирают пробы различных вод и производят их упрощенный химический анализ.

Отбор проб воды. Пробы следует брать в тех местах, где они соответствуют действительному составу анализируемой воды. Посуду для пробы надо предварительно хорошо вымыть и дважды сполоснуть той же водой, которую берут для анализа. При отборе пробы из какой-либо трубы нужно предварительно спустить из последней часть воды.

Объем пробы для анализа на судне должен составлять около 0,5 л, в лаборатории — не менее 1 л. Для отправки в лабораторию рекомендуется отбирать две пробы по 1 л в чистые бутылки, которые следует плотно закупорить пробкой. На бутылки наклеивают ярлыки с названием судна, датой, местом взятия пробы и фамилией лица, производившего ее отбор.

При отборе конденсата необходимо (если добавочная вода подается непосредственно в конденсатор) прекратить поступление воды за 10 мин до взятия пробы.

Пробы питательной воды отбирают из трубопровода перед экономайзером. Пробы воды из котлов повышенного давления берут из коллекторов через особые холодильники, охлаждаемые обычно забортной водой (рис. 102). Перед взятием пробы такой холодильник следует пропустить в течение 1 мин.

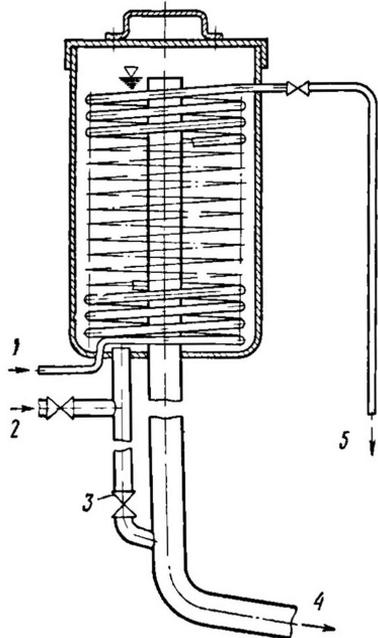


Рис. 102. Бачок для охлаждения пробы котловой воды

Позиции на рисунке означают: 1 — трубопровод к солемерному крану; 2 и 4 — вход и выход охлаждающей воды; 3 — регулировочный клапан охлаждения; 5 — выход пробы котловой воды.

Если воду берут непосредственно из барабана котла через кран солиности, то данные всех анализов следует умножить на поправку, учитывающую частичное испарение воды при отборе, но при этом точность анализа уменьшается.

Рекомендуемый порядок операций регулярного водоконтроля см. в табл. 10. Результаты анализов вносят в судовой журнал водоконтроля.

Для анализа воды морские суда снабжены переносными лабораториями СКЛАВ-1 (рис. 103). В состав ее оборудования входят: лабораторная посуда, реактивы, приборы и приспособления, необходимые для проведения анализа воды в судовых условиях. Все оборудование помещено в специальных гнездах и полочках.

Дверца лабораторного шкафчика состоит из двух частей: двух верхних, открывающихся обычным образом, и нижней, откидывающейся вперед. Нижняя часть дверцы в горизонтальном положении служит столиком, на котором устанавливают посуду для анализа воды.

Судовая комплектная лаборатория СКЛАВ-1 предназначена для анализа питательной, добавочной и котловой вод, конденсата и дистиллята. Определяют следующие показатели качества воды: жесткость; щелочность; содержание хлоридов, фосфатов, нитратов, нефтепродуктов и кислорода, растворенного в воде.

Лаборатория включается и выключается автоматически при открытии и закрытии правой дверцы лаборатории.

Посуда и приборы на полках и дверцах лаборатории устанавливаются в соответствии с рис. 103: 1 — верхняя панель; 2 — переключатель подачи растворов;

3 — бюретки; 4 — компаратор для определения фосфатов и нитратов; 5 — кювета; 6 — плата для определения кислорода; 7 — опора столика; 8 — пробоборник; 9 — емкости для реактивов; 10 — колба для титрования; 11 — воронка; 12 — емкости для порошков.

Емкости заполняют согласно нанесенным надписям и располагают в той последовательности, в какой расположены бюретки на верхней панели (первое гнездо — трилон Б, второе — серная кислота, третье — 0,1N раствор азотнокислой ртути и т. д.) и закрывают пробками.

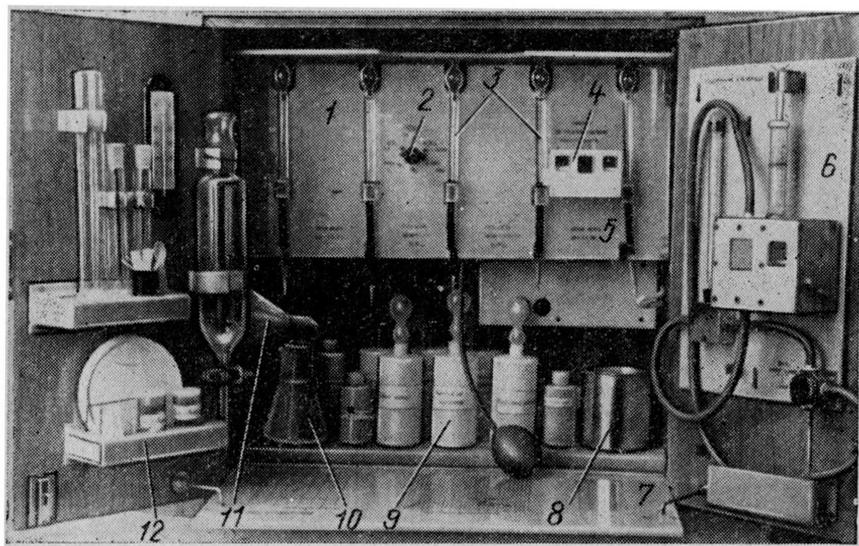


Рис. 103. Общий вид лаборатории СКЛАВ-1

Длинная трубка у пробки для емкости с трилоном Б должна быть соединена резиновым шлангом с бюреткой для трилона Б, а короткая — со штуцером № 1 переключателя 2 растворов. Длинная трубка у пробки для емкости с серной кислотой должна быть соединена резиновым шлангом с бюреткой для серной кислоты, а короткая — со штуцером № 2 и т. д.

Для проверки поступления растворов в бюретки переключатель 2 растворов ставят на нужный раствор, который при помощи груши накачивают в бюретку.

Емкости, находящиеся на нижней полке и дверце, заполняют реактивами в соответствии с надписями. Наименование, концентрация и назначение растворов и реактивов, применяемых для анализа, представлены в табл. 10.

Осветление воды. Перед анализом воды ее необходимо осветлить. Осветление воды основано на адсорбции размельченным активированным углем марки БАУ частиц, вызывающих ее окраску и мутность. Такое осветление влияет на химический состав воды.

Таблица 10

Реактив	Концентрация		Характеристика, определяемая с помощью реактива
	по отношению к нормальной N или в %	расчетная (соответствие 1 мл раствора)	
Трилон Б	0,01N	0,01 мк/экв общей жесткости воды	Общая жесткость
Аммиачный буферный раствор	20 г хлористого аммония и 100 мл 25%-ного аммиака в 1 л водного раствора		
Сухая смесь индикатора кислотно-хромтемно-синего	100 г NaCl и 1 г индикатора	—	Общая жесткость
Серная кислота	0,1N (децинормальный раствор)	0,1 мг-экв щелочности	Щелочность
Фенолфталеин	1% (спиртовой раствор)	—	»
Ртуть азотнокислая	0,1N по Hg	3,55 мг Cl ⁻	Хлориды в котловой воде
То же	0,0025N по Hg	0,08875 мг Cl ⁻	Хлориды в конденсате
Азотная кислота	0,05N	—	Хлориды
Индикаторная смесь № 1	1 г дифенилкарбазона, 8 г мочевины и 0,1 г бромфенолсинего	—	»
Реактив для определения:			
фосфатов	В 1 л водного раствора содержится 25 г молибдата аммония, 1 г ванадата аммония и 125 мл крепкой серной кислоты	—	Фосфаты
нитратов	В 300 мл 2N уксусной кислоты содержится 0,5 г сульфаниловой кислоты и 0,25 г альфа-нафтиламина	—	Нитраты
Цинковый порошок или мелкая стружка	Размер частиц не менее 0,2 мм (просеян через сито № 30)	—	»
Раствор метиленового голубого	В 1 л водного раствора содержится 0,246 г метиленового голубого, 2,6 г глюкозы	—	Кислород
Раствор едкого кали	В 1 л водного раствора содержится 500 г КОН	—	То же
Лейкосоединение красителя	19 мл раствора метиленового голубого и 1 мл раствора едкого кали	—	.
Активированный уголь БАУ	Размер частиц не более 0,2 мм (просеян через сито № 30, 40 или 50)	—	Степень осветления
Четыреххлористый углерод	—	—	Количество нефтепродуктов

Осветление воды можно проводить в судовых и лабораторных условиях.

Навеску размельченного угля (1 г) помещают в коническую колбу, наливают 100 мл котловой воды, колбу закрывают пробкой и содержимое энергично взбалтывают в течение 3 мин. После взбалтывания воду с углем фильтруют. Осветленная таким образом вода пригодна для анализов.

Подсчет результатов анализа воды, отбираемой не через холодильник. Если пробу из котла берут не через холодильник, то вследствие частичного испарения воды концентрация солей в пробе оказывается более высокой, чем действительная их концентрация в котловой воде. Для устранения этой погрешности, которая тем больше, чем выше давление пара в котле, вносят поправку (табл. 11) на хлориды, щелочное число, фосфаты, нитриты и жесткость (при умножении полученных результатов на поправочный множитель K).

Таблица 11

Давление в котле, кгс/см ²	Поправочный множитель K	Давление в котле, кгс/см ²	Поправочный множитель K	Давление в котле, кгс/см ²	Поправочный множитель K	Давление в котле, кгс/см ²	Поправочный множитель K
4	0,92	28	0,69	16	0,77	40	0,62
6	0,88	30	0,67	18	0,75	42	0,61
8	0,85	32	0,66	20	0,74	44	0,6
10	0,83	34	0,65	22	0,72	46	0,59
12	0,81	36	0,64	24	0,71	48	0,58
14	0,79	38	0,63	26	0,7	50	0,57

Пример. В момент отбора пробы воды из котла рабочее давление было 14 кгс/см². Количество фосфатов, найденное при колориметрировании, 50 мг/л PO_4^{3-} . Из табл. 9 находим поправочный множитель, равный 0,79.

Истинное значение фосфатов:

$$Q_{\text{ист}} = Q_{\text{колор}} K = 50 \times 0,79 = 39,5 \text{ мг/л } \text{PO}_4^{3-}.$$

Определение жесткости воды с помощью трилона Б. Этот метод основан на том, что трилон Б реагирует с солями кальция и магния, содержащимися в воде. Момент окончания реакции определяют по изменению окраски индикатора.

Общую жесткость воды выражают в миллиграмм-эквивалентах (мг-экв) или микрограмм-эквивалентах на литр (мк-экв/л).

В колбу наливают 100 мл испытуемой воды, вводят туда 5 мл аммиачного буферного раствора, щепотку индикатора кислотного хромтемно-синего и, интенсивно перемешивая, медленно титруют пробу трилоном Б до изменения розовой окраски раствора в синевато-сиреневую.

Общая жесткость (в мг-экв) численно равна количеству a трилона Б (в мл), пошедшего на титрование 100 мл испытуемой воды, умноженному на 0,1:

$$Ж_{\text{общ}} = a \times 0,1 \text{ мг} = \text{ЭКР/л}.$$

Пример. На титрование 100 мл пробы воды пошло 12 мл трилона Б:

$$Ж_{общ} = 12 \times 0,1 = 1,2 \text{ мг-экв/л.}$$

Определение щелочности воды (по фенолфталеину). Этот метод основан на нейтрализации кислотой котловой воды, которая содержит щелочи, окрашивающие фенолфталеин в малиново-красный цвет. Реакция кончается в момент добавки последней капли кислоты, когда малиновая окраска исчезает и вода принимает свою первоначальную окраску (до введения в нее фенолфталеина).

В колбу наливают 100 мл испытуемой воды, туда же вводят 2—3 капли индикатора (фенолфталеина). При наличии щелочи вода окрашивается в малиново-красный цвет. Затем осторожно, по каплям, пробу воды титруют раствором серной кислоты до исчезновения окраски.

Щелочность котловой воды (в мг-экв) численно равняется количеству миллилитров кислоты, затраченному на титрование 100 мл воды (щелочность выражают также щелочным числом).

Пример. На титрование 100 мл котловой воды пошло 5 мл кислоты. Щелочность воды равна 5 мг-экв/л.

Щелочное число котловой воды равняется количеству миллилитров кислоты, затраченному на титрование 100 мл котловой воды, умноженному на 40.

Пример. На титрование 100 мл котловой воды пошло 5 мл кислоты. Щелочное число воды равно 200 мг/л.

Определение содержания хлоридов в воде. Метод основан на способности солей ртути давать с хлор-ионом малодиссоциированное соединение ($HgCl_2$) и связывании избытка ионов ртути (Hg^{+2}) дифенилкарбазоном в комплексные соединения, окрашенные в розово-фиолетовый цвет.

Концентрацию хлор-иона от 0,1 до 10 мг/л определяют с помощью 0,0025N раствора азотнокислой ртути, а концентрации хлор-иона от 10 мг и выше — с помощью ее децинормального раствора.

Конденсат, питательная вода и дистиллят. В колбу наливают 100 мл испытуемого конденсата пара и добавляют щепотку индикаторной смеси № 1. При наличии в пробе хлор-иона вода синееет. Наливают по каплям, взбалтывая, раствор азотной кислоты до перехода синей окраски в желтую и еще 10 капель этой кислоты. Затем медленно, сильно взбалтывая, титруют 0,0025N раствором азотнокислой ртути до перехода желтой окраски в розово-фиолетовую.

Содержание хлоридов (в мг/л хлор-иона) численно равно количеству миллилитров раствора азотнокислой ртути, пошедшему на титрование 100 мл пробы, умноженному на 0,08875 и на 10 (0,08875 — количество миллиграмм хлор-иона, соответствующее 1 мл 0,0025N раствора азотнокислой ртути).

Пример. На титрование 100 мл конденсата пара пошло 0,25 мл раствора азотнокислой ртути.

Содержание хлоридов равно:

$$A = 0,25 \times 0,8875 = 0,22 \text{ мг/л хлор-иона.}$$

Котловая вода. В колбу наливают 10 мл котловой воды и добавляют 90 мл дистиллята или конденсата (для облегчения титрования).

К разбавленной пробе котловой воды добавляют щепотку индикаторной смеси № 1, которая в присутствии хлоридов окрашивает воду в синий цвет, затем добавляют по капле, взбалтывая, раствор азотной кислоты до перехода синей окраски в желтую и еще 10 капель этой кислоты. Затем медленно, сильно взбалтывая, титруют 0,1 N раствором азотнокислой ртути до перехода желтой окраски в розово-фиолетовую.

Содержание хлоридов (в мг/л хлор-иона) численно равно количеству миллилитров раствора азотнокислой ртути, пошедшему на титрование 10 мл котловой воды, умноженному на 3,55 и на 100. (3,55 — количество миллиграмм хлор-иона, соответствующее 1 мл 0,1 N раствора азотнокислой ртути).

В случае большой щелочности при добавлении индикаторной смеси № 1 к пробе котловой воды последняя окрашивается в малиновый цвет. В этом случае по мере добавления азотной кислоты проба вначале синее, а затем желтеет. Добавляют 10 капель кислоты и приступают к титрованию, как описано выше.

Если на титрование взято 100 мл испытуемой воды, то результат анализа умножают на 10.

Пример. На титрование 10 мл пробы котловой воды пошло 4,2 мл 0,1 N раствора азотнокислой ртути.

Содержание хлоридов равно:

$$A = 4,2 \times 355 = 1491 \text{ мг/л хлор-иона.}$$

Пример. На титрование 100 мл испытуемой воды пошло 3,8 мл 0,1 N раствора азотнокислой ртути.

Содержание хлоридов равно:

$$A = 3,8 \times 35,5 = 134,9 \text{ мг/л хлор-иона.}$$

Для упрощения расчетов в судовых условиях к приборам приложены таблицы.

Определение содержания фосфатов и нитратов в воде. Содержание фосфатов (в мг/л иона PO_4^{3-}) и содержание нитратов (в мг/л NaNO_3) измеряют в компараторе путем сравнения окраски испытуемой пробы с окраской эталонных пленок. Набор эталонных пленок имеет окраску, соответствующую 10, 20, 30, 40, 50 мг/л соответственно PO_4^{3-} и NaNO_3 .

Определение фосфатов основано на образовании растворимого соединения состава $\text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{V}_2\text{O}_5 \cdot 22\text{MoO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, окрашенного в интенсивно-желтый цвет.

В градуированную пробирку отбирают 10 мл пробы котловой воды и добавляют 2 мл реактива на фосфаты. Раствор тщательно перемешивают. Через 5 мин содержимое пробирки переливают в кювету, вставляя ее в средний паз компаратора, а в левом последовательно поднимают стандартные пленки желтого цвета до тех пор, пока окраска их не сравняется с окраской испытуемой пробы.

Пример. Установлено, что окраска пробы соответствует окраске пленки 50 мг/л PO_4^{3-} . Содержание фосфатов в пробе котловой воды равно 50 мг/л PO_4^{3-} .

Определение нитратов основано на реакции образования азокрасителя при действии нитритов на смесь равных объемов уксусно-кислых растворов сульфаниловой кислоты и альфанафтиламина. Перевод нитратов в нитриты происходит под действием цинкового порошка.

Содержание нитратов (в мг/л NaNO_3) измеряется в компараторе путем сравнения окраски испытуемой пробы с окраской эталонных пленок. Набор эталонных пленок имеет окраску, соответствующую 10, 20, 30, 40, 50 мг/л NaNO_3 .

В градуированную пробирку отбирают 146 мл пробы котловой воды до метки 11 мл и перемешивают. Прибавляют 2 мл реактива на нитраты и еще раз перемешивают. Прибавляют ложечку цинковой стружки или порошка, пробирку закрывают пробкой и содержимое тщательно перемешивают, затем оставляют ее на 5—10 мин, время от времени встряхивая. После этого содержимое пробирки (отстоявшуюся часть) переливают в кювету и вставляют ее в средний паз компаратора, а в правом пазу последовательно поднимают стандартные пленки красного цвета до тех пор, пока окраска испытуемой пробы сравняется с окраской одной из них или будет иметь промежуточную окраску между двумя соседними пленками.

Пример. Установлено, что окраска пробы котловой воды гуще окраски стандартной пленки 30 мг/л, но слабее окраски пленки 40 мг/л. Следовательно, содержание нитратов в пробе котловой воды равно 35 мг/л NaNO_3 .

В случае большого количества фосфатов и нитратов пробу котловой воды разбавляют в цилиндре в два или четыре раза и анализируют ее как описано, результат умножают на степень разведения.

После каждого определения кювету следует сполоснуть дистиллятом, а по окончании работы вставить ее в средний паз компаратора.

Определение содержания нефтепродуктов в воде. Метод основан на экстрагировании нефтепродуктов из воды органическим растворителем (четыреххлористым углеродом CCl_4) и последующим перенесении экстракта на фильтровальную бумагу «белая лента».

В делительную воронку отбирают 250 мл конденсата и добавляют 10 мл четыреххлористого углерода. Содержимое взбалтывают в течение 2—3 мин и оставляют до полного разделения слоев. Нижний слой (экстракт) сливают в пробирку. Из пробирки 1 мл экстракта с помощью пипетки с грушей переносят в стаканчик и вставляют в него полоску фильтровальной бумаги (55×5) под углом (так, чтобы нижний конец полоски упирался в противоположную стенку стакана).

После испарения четыреххлористого углерода на фильтровальной бумаге образуется темная полоска. Измеряют ее ширину

линейкой и с помощью эталонного графика, прилагаемого к приборам, определяют содержание масла в конденсате.

Определение содержания кислорода, растворенного в питательной воде. Метод основан на окислении бесцветной формы лейкосоединения метиленового голубого растворенным в воде кислородом. Окисленная форма лейкосоединения имеет синюю окраску, интенсивность которой пропорциональна содержанию кислорода.

Количество кислорода (в мг/л O_2) определяют визуально путем сравнения окраски испытуемой пробы с окраской стандартных пленок.

Шкала стандартных пленок позволяет измерять содержание растворенного в воде кислорода в диапазоне 0—0,1 мл/л O_2 .

На судне готовят бесцветную форму лейкосоединения метиленового голубого. Для этого в мерный цилиндр наливают 19 мл раствора метиленового голубого и 1 мл едкого кали (отмеривать едкий кали следует пипеткой с полиэтиленовой грушей). Содержимое цилиндра тщательно перемешивают стеклянной палочкой. Спустя 20—30 мин раствор должен полностью обесцветиться, что свидетельствует об окончании процесса восстановления метиленового голубого. Приготовленный раствор пригоден в течение суток. Затем переходят на прибор (рис. 104) для определения содержания кислорода в питательной воде.

Заполняют шприц 6 бесцветной формой метиленового голубого, для чего вынимают шприц из компаратора 7, снимают верхний колпачок, вынимают поршень и заливают в шприц раствор (немного выше верхней метки), нижнее отверстие зажимают пальцем. Затем вставляют поршень, поворачивают шприц и, нажимая на поршень, удаляют из шприца пузырьки воздуха и подводят уровень раствора к метке 10 мл.

После этого шприц вставляют в компаратор и закрепляют колпачок.

Подсоединяют прибор к месту отбора пробы на анализ при помощи резинового шланга, надетого на штуцер 9 (для соединения

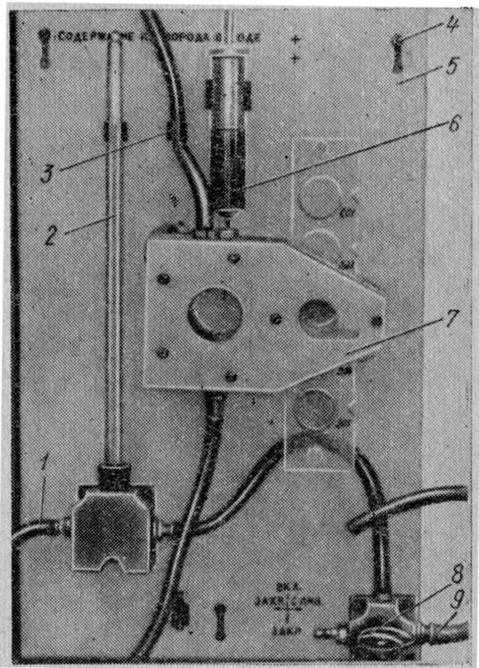


Рис. 104. Прибор для определения содержания кислорода в воде

с местом отбора проб на анализ) крана 8 (1 — штуцер для соединения компаратора с местом отбора проб).

Пробы отбирают через холодильник. Если лаборатория установлена далеко от деаэрата, то плату 5 снимают с болтов 4 и на время анализа укрепляют ее в наиболее удобном месте.

Ставят кран 8 в положение «Вкл» и пропускают воду с небольшой скоростью через компаратор в течение 3—4 мин. Избыточная вода выходит из компаратора по трубке 3. Затем зажимают трубку 3 и поднимают пробку с термометром 2. Когда из отверстия начнет вытекать вода, термометр вставляют на место.

В компараторе не должно быть пузырьков воздуха (в случае необходимости компаратор снимают с болтов 4 «на себя» и легким покачиванием удаляют пузырек воздуха, стараясь подвести его под трубочку 3).

Затем ставят кран 8 в положение «Выкл» и приступают к анализу. Нажатием на поршень шприца вводят 1—2 мл раствора в пробку воды в компараторе (нельзя очень сильно нажимать на поршень, так как скорость движения поршня зависит от скорости вытекания реактива из иглы).

Снимают компаратор с болтов 4 и осторожным покачиванием перемешивают содержимое. Затем вставляют компаратор на место.

Подбирают эталонные пленки, окраска которых одинакова с окраской испытуемой пробы. Содержание кислорода, растворенного в воде, определяется его количеством, указанным на одной или нескольких стандартных пленках.

По окончании анализа промывают компаратор, для чего кран 8 ставят в положение «Вкл» и пропускают воду через компаратор до тех пор, пока окрашенная вода не сольется по трубке 3.

Отключают воду от магистральной, снимают резиновую трубку со штуцера и при положении крана 8 «Слив» удаляют воду из компаратора; трубку 3 при этом поднимают вверх. Плату 5, если она была снята, снова укрепляют на правой дверце лаборатории.

Пример. В правом пазу компаратора подняты пленки, соответствующие содержанию кислорода 0,04 и 0,02 мг/л. Общее содержание кислорода в воде 0,06 мг/л.

Общие указания по технике безопасности при выполнении анализов. Кислоту или щелочь, попавшую на руки, необходимо смыть сильной струей воды. При попадании в глаза кислоты их промывают 2%-ным раствором соды, при попадании щелочи — слабым раствором борной кислоты.

Работать с четыреххлористым углеродом необходимо в месте с интенсивной вентиляцией воздуха. Остатки экстракта и воду, из которой производилось экстрагирование, нужно вылить в раковину и смыть сильной струей воды.

Пролитый раствор азотнокислой ртути и четыреххлористый углерод нужно собрать ветошью и вымыть руки; ветошь выбросить.

Хранить четыреххлористый углерод необходимо под слоем воды.

§ 40. Докотловая водоподготовка

Докотловая обработка воды (водоподготовка) должна обеспечивать нормальное качество питательной воды.

Питательная вода состоит из конденсата и небольшого количества добавочной воды (1—2%). Качество конденсата оценивают по жесткости, содержанию хлоридов и масла.

Применение обычной пресной воды в качестве добавочной разрешается только для огнетрубных и водотрубных котлов с давлением пара до 20 кгс/см². Во всех остальных случаях в качестве добавочной воды применяют только химически обработанную (умягченную) воду или дистиллят. Умягченную воду получают иногда при химической обработке береговой воды, а дистиллят — из забортной воды путем ее однократного или двукратного испарения (бидистиллят). На некоторых судах в качестве добавочной воды применяют дистиллят пресной воды.

К дистилляту или умягченной воде предъявляют определенные требования по общей жесткости. Для обеспечения норм, указанных в табл. 9, конденсат, поступающий из конденсатора, береговую и забортную воду подвергают различной обработке: фильтрации, деаэрации, дистилляции, электрохимическому и химическому обессоливанию и т. д. Принятая схема водоподготовки должна обеспечить нормы качества питательной воды, предусмотренные водным режимом для котлов данного судна.

С повышением давления в котлах нормы качества воды становятся более жесткими (см. табл. 9), а обработка воды более глубокой и более дорогой. Объясняется это в основном тем, что в современных водотрубных котлах толщины металла стенок малы, а его температуры и тепловые напряжения велики. Поэтому процессы коррозии усиливаются, а появление даже тонкого слоя накипи ведет к выходу котла из строя.

Фильтрация воды и очистка конденсата от масла особенно важны для паровых поршневых машин или вспомогательных котлов танкеров, выдающих пар для обогрева нефтегруза с прямым возвратом конденсата этого пара в котел. На современных судах пар, расходуемый для обогрева топлива, нефтегруза, масел и т. п., производится ИГК и попадание масла (или нефтепродуктов) в питательную воду котла почти исключено.

Эксплуатация паровых поршневых машин неизбежно связана с замасливанием конденсата.

Конденсат паровых турбин практически не содержит масла. Если при этом главный конденсатор находится в удовлетворительном техническом состоянии и не допускает засоления конденсата морской водой, то водоподготовка сводится только к освобождению питательной воды от кислорода (деаэрация) и подготовке добавочной воды необходимого качества.

Коэффициент теплопроводности накипи, пропитанный маслом или нефтепродуктами, составляет от 0,1 до 0,5—0,7 ккал/м·ч·°С в зависимости от состава накипи, т. е. весьма низок. Поэтому при

попадании в котел значительного количества масла Правила [10] требуют немедленного вывода его из действия и очистки.

Водотрубные котлы барабанного типа должны быть выведены из действия в том случае, если в питательной воде обнаружены нефтепродукты (масло) в количестве, превышающем предельно допустимые нормы.

Количество масла в котлах, превышающее его содержание в питательной воде, допускаемое нормами, может быть причиной повреждений котлов.

Минеральное масло почти не растворяется в воде и находится в ней в следующем состоянии:

плавающим — в виде сгустков и сплошных пленок;

взвешенном — в виде мелких и крупных капель, увлекаемых потоком воды;

эмульгированном, т. е. диспергированном до коллоидального размера частиц менее 0,0001 мм.

Плавающее масло может быть задержано в каскадных отсеках и удалено с поверхности воды в теплом ящике. Взвешенное масло отделяется при механическом фильтровании воды. Эмульгированное масло почти не задерживается механическими фильтрами и может быть удалено из воды только после предварительного деэмульгирования (разрушения коллоидных частиц) либо сорбционным фильтрованием.

Конденсат может быть частично очищен от масла еще до поступления в конденсатор — на магистрали отработавшего пара. В этом случае удается путем установки маслоотделителей на трубопроводах отработавшего пара (центробежных, отражательных, пленочных и др.) снизить содержание масла в конденсате почти наполовину (обычно до 20—30 мг/л). В основном же конденсат очищается от масла в теплом ящике, где имеются отстойные отделения и фильтры с коксом, древесной шерстью, сульфоглем и другими наполнителями.

На морских судах применяют следующие фильтрующие материалы: зернистые (кокс, активированный уголь, молотый антрацит); волокнистые (древесная стружка, манильская или сезальская пенька, люфа); тканевые (хлопчатобумажные, шерстяные).

Зернистые материалы применяют преимущественно в префильтрах, в которых капельки масла укрупняются и легче задерживаются следующими по ходу потока фильтрами. Кокс с более крупными кусками (12—25 мм) располагают в фильтрах в начале фильтруемого потока в качестве префильтра. Затем устанавливают фильтры с размерами кусков кокса 5—6 мм.

Кокс относится к фильтрующим материалам однократного использования. На практике коксовые фильтры быстро насыщаются маслом и становятся фактически префильтрами.

К материалам однократного использования, но большей, чем кокс, маслостойкости относится активированный уголь. Для фильтров применяют активированный уголь с зернами размером 1—3,5 мм.

Перед заполнением фильтра стружкой ее рекомендуется предварительно промыть холодной, а затем горячей водой. Древесная стружка также относится к материалам однократного использования. На древесно-стружечных фильтрах задерживаются крупные капельки масла, поэтому такие фильтры помещают в начальных (по ходу воды) отсеках теплых ящиков.

Применяемые для фильтров куски манильского или сезальского троса предварительно треплют на отдельные волокна. До загрузки в фильтры манилу или сезаль рекомендуется промыть и прокипятить в 2—3%-ном растворе соды или антинакипина.

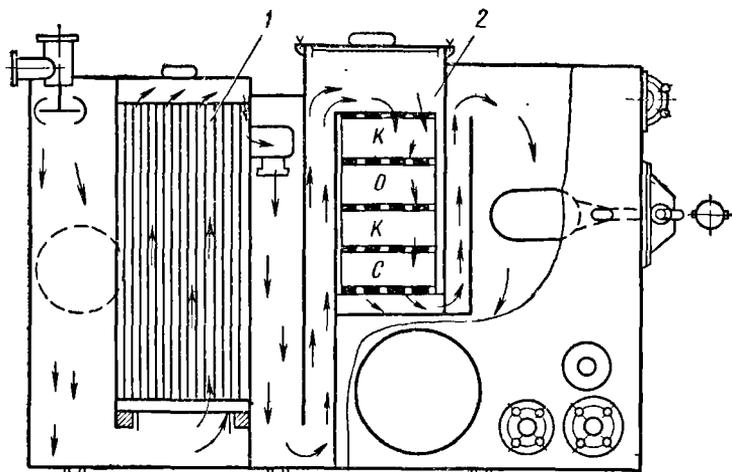


Рис. 105. Теплый ящик с коксовым фильтром

Высушенные каркасы (сетки) плодов люфы используют в фильтрах многократно. Для очистки люфы, насыщенной маслом, ее промывают в горячей воде с мылом.

Тканевые фильтрующие материалы должны быть устойчивы к нагреву и щелочным растворам. Для фильтров теплых ящиков пригодны льняные и хлопчатобумажные ткани, которые обладают высокой механической прочностью, имеют развитую поверхность и оказывают малое сопротивление фильтрованию.

Фильтрующие материалы устанавливают в теплом ящике обычно в следующем порядке: волокнистые материалы, зернистые, тканевые. В простейшем случае применяют только кокс или уголь (рис. 105). На рисунке 1 и 2—секции соответственно отстойная и фильтровальная.

На паровых поршневых машинах обычной конструкции при соблюдении правил эксплуатации удается снизить маслосодержание питательной воды до 3 и даже 2 мг/л, что соответствует предельным нормам для огнетрубных и секционных неэкранированных котлов.

На напорной магистрали питательной воды устанавливают дополнительные фильтры (обычно по два — основной и байпасный).

Фильтр (рис. 106) представляет собой латунную сетку 3, обтянутую специальной материей типа фланели. Клапанами 1 и 2 можно отключить фильтр для очистки.

При обслуживании фильтров нельзя допускать повышения давления в питательной магистрали до фильтра сверх установленного (что возможно при замасливание фильтра).

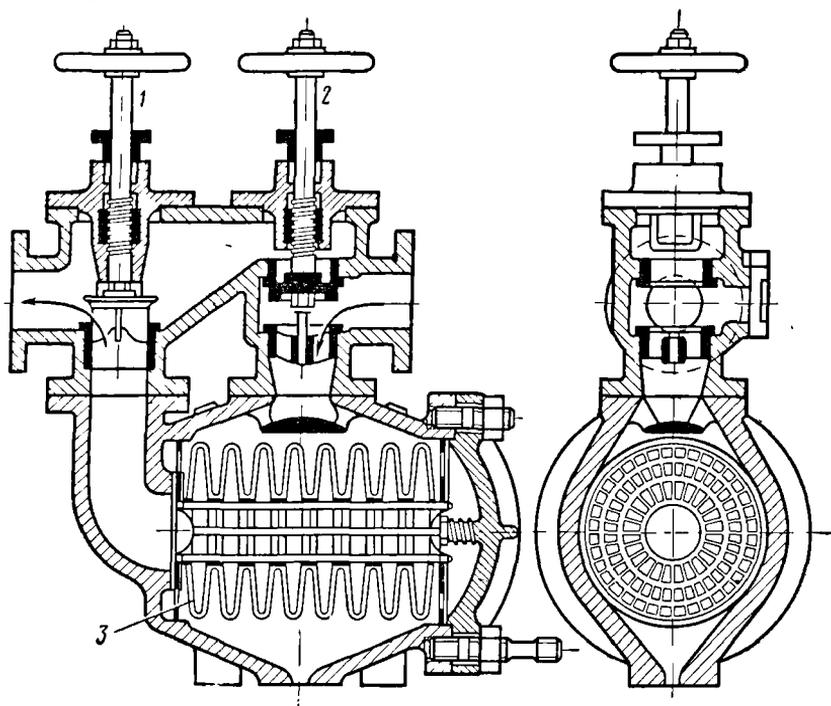


Рис. 106. Фильтр питательной воды

Дегазация питательной воды, т. е. освобождение ее от растворенных газов, является обязательной для всех котельных установок. Кислород, даже в очень малом количестве, растворенный в питательной воде, является главной причиной коррозии элементов котла.

Для снижения содержания кислорода в питательной воде огнетрубных, комбинированных и водотрубных котлов с избыточным давлением пара до 20 кгс/см^2 необходимо использовать открытую систему питания, при которой поверхность воды в теплом ящике соприкасается с атмосферой. Например, нельзя допускать переохлаждения конденсата, так как он способен удерживать около $0,06 \text{ мг/л}$ кислорода на каждый градус переохлаждения. Желательно, чтобы температура подогрева воды в теплом ящике была

не менее 50—60°С (что возможно при установке в теплом ящике змеевиков отработавшего пара). Надо следить за исправностью воздушных клапанов на водоподогревателях и экономайзерах.

Если эти методы не обеспечивают глубокой деаэрации питательной воды, требуемой для современных водотрубных котлов, то применяют только закрытую систему питания с термическими деаэраторами, принцип действия которых основан на нулевой растворимости кислорода в кипящей воде.

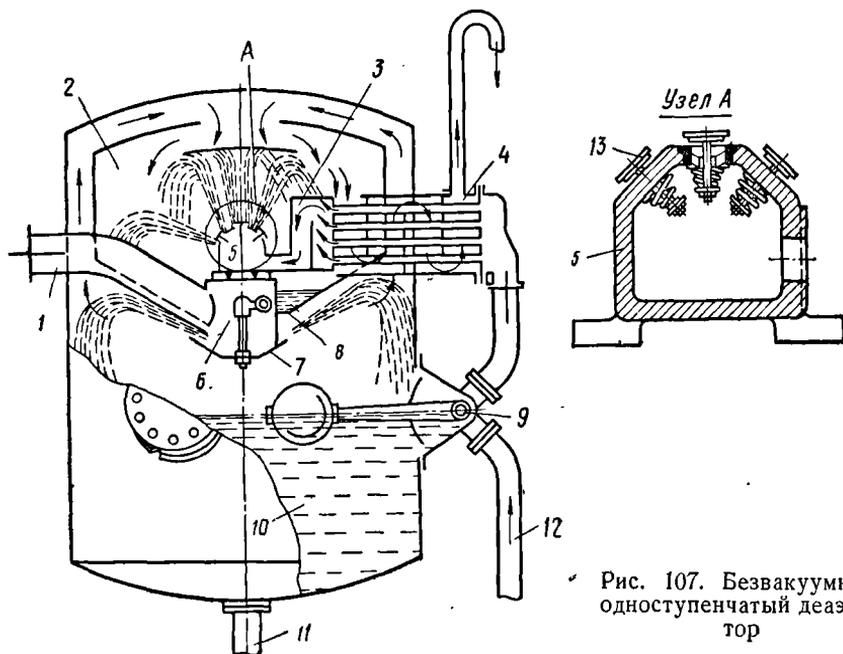


Рис. 107. Безвакуумный одноступенчатый деаэратор

Если деаэратор работает при давлении ниже атмосферного, т. е. температура кипения воды в нем менее 100°С, такой деаэратор называют вакуумным. На морских судах применяют вакуумные и безвакуумные деаэраторы, работающие при давлении 1,1—2,2 кгс/см². Они служат также водоподогревателями.

Схема простейшего безвакуумного одноступенчатого деаэратора представлена на рис. 107.

Уровень воды в деаэраторе поддерживается регулятором 9, который соединен с клапаном, установленным на трубопроводе 12. Вода поступает к разбрызгивающей головке 5 с клапанами 13 через холодильник 4 и камеру 3. Струи воды нагреваются в пространстве 2 за счет тепла находящегося здесь пара и воздуха. Нагретая вода стекает в воронку с кольцевой щелью 8. Одновременно в камеру 6 по трубе 1 подается греющий пар. Проходя через щель между тарелками 7 и камерой 6, он разбрызгивает воду, нагревая ее до кипения. Выделяющийся при этом воздух удаляется через

верхнюю часть 2 деаэрата и холодильник 4, в котором одновременно происходит конденсация пара. Конденсат стекает в пространство 10. Деаэрированная вода забирается насосом по трубе 11.

Система закрытого питания для современного морского судна с паротурбинной установкой показана на рис. 108.

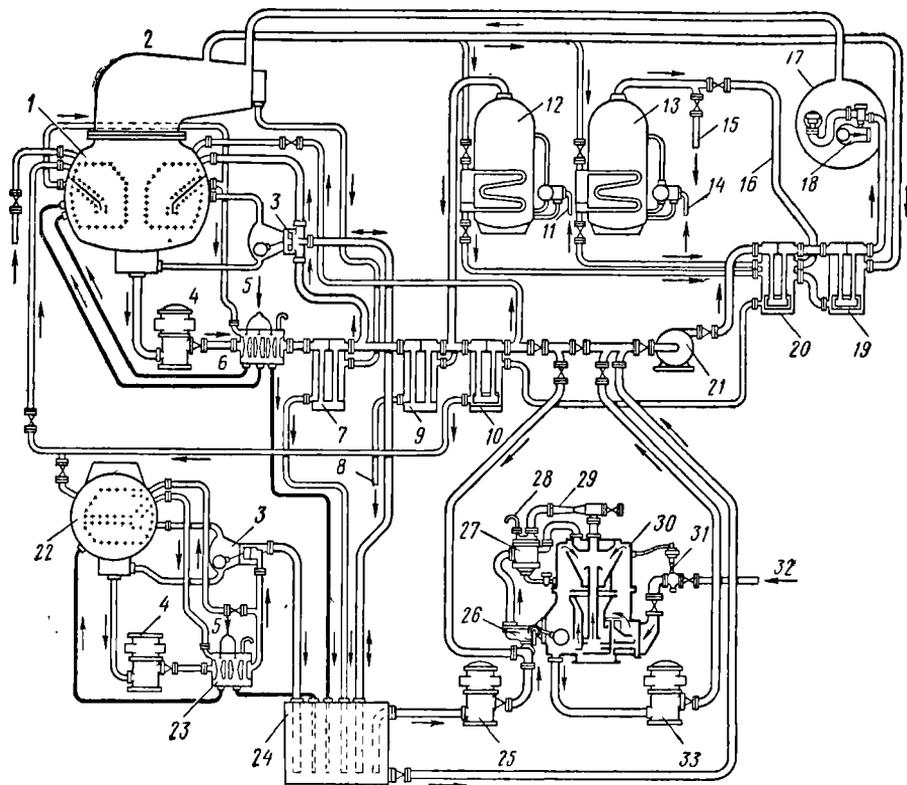


Рис. 108. Система закрытого питания

Из котла 17 пар поступает в главные 2 и вспомогательные турбины судна. Отработавший пар главных турбин конденсируется в главном конденсаторе 1, а турбин генераторов — во вспомогательном конденсаторе 22. Для отсоса воздуха из главного 1 и вспомогательного 22 конденсаторов установлены соответственно трехступенчатые 6 и двухступенчатые 23 эжекторы, к которым подводится пар по трубопроводам 5. Уровень воды в конденсаторах поддерживается постоянным при помощи регуляторов 3.

При снижении уровня воды регулятор открывает перепускной клапан и вода может поступать в конденсатор либо из закрытого сборника 24 горячих конденсаторов, либо из напорного конденсатопровода. Конденсатный насос 4 подает воду к деаэратуру 30 через подогреватели 7, 9 и 10.

Подогреватель 7 служит для конденсации пара, поступающего из лабиринтных уплотнений турбины и системы ее продувки. Подогреватель 9 конденсирует вторичный пар испарителя 12 морской воды, поступающей в последний по трубе 11. Подогреватель 10 использует тепло конденсата греющего пара водоподогревателя 20 первой степени.

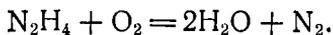
Вода подается из сборника конденсатов к регулирующему клапану 26 деаэратаora насосом 4 и подкачивающим насосом 25 и поступает в разбрызгивающую головку деаэратаora через холодильник 27. Воздух удаляется из деаэратаora эжектором 29 через холодильник 27 и трубку 28.

Греющий пар поступает по трубопроводу 32, причем его поступление регулируется автоматическим клапаном 31 в зависимости от давления в деаэратаоре. Бустерный насос 33 подает деаэрированную воду в приемную магистраль главного питательного насоса 21, который может также забирать воду непосредственно из сборника 24 горячих конденсаторов.

После питательного насоса вода проходит водоподогреватели 20 и 19 и поступает в котел через автоматический питательный клапан 18. Для работы водоподогревателя 19, испарителей 12 и 13 подается греющий пар от турбин при давлении 3—4 кгс/см². Конденсат греющего пара в виде дистиллята первого испарения направляется от испарителя 12 по трубе 8 в специальную цистерну опресненной воды, откуда по трубе 14 подается в испаритель 13.

Полученный вторичный пар либо направляется по трубопроводу 15 в вспомогательному конденсатору 22 (на стоянке судна), либо по трубопроводу 16 в водоподогреватель 20. Конденсат этого пара представляет собой бидистиллят, т. е. может быть использован в качестве добавочной воды.

В последнее время на судах все шире применяют глубокую деаэрацию воды путем добавки гидразина. При этом получается реакция:



Гидразин N_2H_4 вводят в питательную воду после деаэратаora на достаточном расстоянии от котла, так как если ввести гидразин непосредственно перед питательным клапаном, то часть его (гидразина) подвергнется разложению в котловой воде с образованием NH_3 , т. е. такое введение будет малоэффективным.

В настоящее время на судах применяют много способов обработки заборной и береговой воды для снижения ее жесткости и содержания до установленных пределов.

Наиболее простым способом обработки является электромагнитный (или просто магнитный).

При магнитной обработке состав питательной воды не меняется, а накипеобразующие ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} образуют соединения, выпадающие в виде шлама, а не накипи. Магнитная обработка воды не только уменьшает накипеобразование, но и способствует разъеданию старой накипи. Опыт показал, что при магнитной

обработке питательной воды на поверхности котла образуется только легкий чешуйчатый налет, легко удаляемый струей воды.

Аппараты для магнитной обработки воды устанавливают на питательной магистрали между фильтром и питательным насосом, т. е. после теплого ящика.

Для создания магнитного поля используют как постоянные магниты, так и электромагниты.

Магнитная обработка воды может быть рекомендована для вспомогательных котлов при условии, что жесткость добавочной воды не превышает 4—5 мг·эquiv/л, а количество ее — не более 3—5% часовой паропроизводительности котла.

Опыт показал, что при магнитной обработке воды значительно увеличивается количество шлама, что требует в свою очередь увеличения числа продувок котла. Увеличение содержания шлама в котловой воде особенно нежелательно для водотрубных котлов повышенного давления.

Химическое умягчение береговой пресной воды, заключающееся в ее обработке различными реактивами для снижения жесткости, не нашло широкого применения на морских судах.

Одним из способов умягчения служит катионирование, в последнее время распространенное на морских судах.

Сущность катионирования заключается в замене накипеобразующих ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} ионами Na^+ (или H^+) при фильтрации жесткой воды через особые материалы, склонные к такому обмену.

Жесткость обычной пресной воды после прохода через катионит весьма мала (не превышает 0,02—0,03 мг·эquiv/л).

Грубодисперсные органические и коллоидальные взвеси, находящиеся в воде, засоряют катионит, поэтому такую воду надо предварительно очистить в обычных фильтрах. В качестве Na -катионитовых материалов применяют сульфуголь, смолы и др. Наиболее распространен на морских судах дешевый сульфуголь.

После истощения фильтра, т. е. когда жесткость умягченной воды превысит 0,02—0,03 мг·эquiv/л, катионит подвергают регенерации, пропуская через него 5—10%-ный раствор поваренной соли. В результате регенерации ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} вновь заменяются катионитом Na^+ .

Перед регенерацией катионит взрыхляют током воды в течение 15—20 мин, удаляя мелкодисперсную взвесь и устраняя слеживание катионита.

После регенерации фильтр промывают пресной водой для удаления регенерационного раствора.

Продолжительность цикла работы и регенерации фильтра зависит от жесткости воды и объема катионита. В среднем фильтр работает 12—24 ч, а регенерируется и отмывается около 1 ч.

Схема катионитового фильтра представлена на рис. 109. Цилиндрический корпус 3 фильтра (обычно диаметром 450—800 мм) изготовляют из малоуглеродистой стали с толщиной стенок 4—5 мм. Верхнее 1 и нижнее 8 днища выполняют съемными для возможности смены катионита и ремонта фильтра. Внутреннюю по-

верхность катионитовых фильтров покрывают устойчивыми лаками или резиной.

Дренажное устройство 7 выполнено в виде ряда перфорированных труб или специальных фарфоровых (пластмассовых) колпачков с продольными щелями. Катионит 4 не должен содержать пыли и мелких фракций, чтобы не засорять дренажное устройство. Размер зерен катионита должен быть не менее 0,3 мм.

Клапаны 5 и 6 служат для подключения трубопроводов осветленной воды, а также для взрыхления и отмывки катионита. Через воронку 2 подается жесткая вода или регенерационный раствор. При противоточном катионировании верхнюю воронку 2 заменяют дренажным устройством такого же типа, как устройство 7.

Иногда применяют двухступенчатое катионирование, т. е. последовательное включение двух фильтров, что имеет несомненные преимущества.

При последовательном включении катионитовых и анионитовых фильтров может быть достигнуто почти полное обесоливание воды.

При использовании химической и катионитовой схем водоподготовки судно должно иметь запас береговой воды, что уменьшает его полезную грузоподъемность и увеличивает себестоимость перевозок. Для судов дальнего плавания с мощными энергетическими установками такое решение вообще неприемлемо, так как необходимый запас воды достиг бы нескольких сот тонн. Поэтому в качестве добавочной воды чаще всего применяют дистиллят или бидистиллят, получаемый при испарении забортной воды.

Общее солесодержание дистиллята морской воды обычно не превышает 10—20 мг/л, бывает до 2 мг/л, причем соли в основном состоят из хорошо растворимого соединения NaCl. При двойном испарении содержание хлор-иона может быть снижено до 1—2 мг/л, т. е. такой бидистиллят пригоден в качестве добавочной воды для большинства водотрубных котлов. Дистиллят получают в испарителях, используя для нагрева отработавший пар при давлении 1—2 кгс/см² или пар отбора от турбин.

Обычно на пароходах почти всегда имеется достаточное для испарителей количество отработавшего пара или пара отборов.

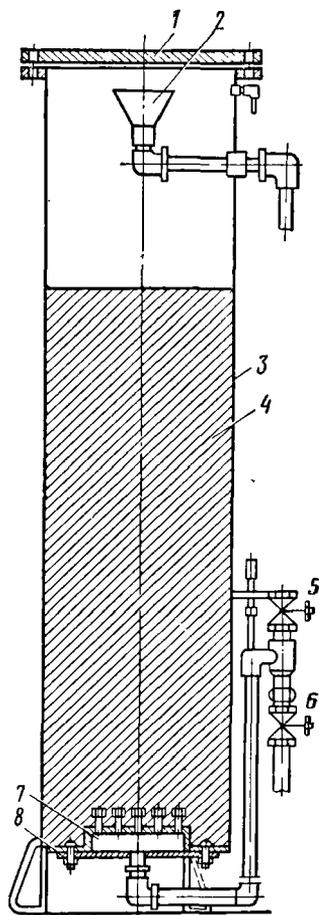


Рис. 109. Катионитовый фильтр

Масса испарителей в несколько раз меньше запасов береговой воды, которую пришлось бы брать в рейс.

В последнее время на больших морских судах обессоливают весь конденсат главных турбин и дистиллят испарителей, применяя катионитовый фильтр, а затем анионитовый, поглощающий кислотные радикалы.

Способ докотловой водоподготовки определяется типом судна и главного двигателя, конструкцией котла, параметрами пара, а также организацией водного режима для котельной установки. Кроме того, необходимо учитывать влияние принятого способа водоподготовки на себестоимость перевозок и провозоспособность судна.

§ 41. Водные режимы

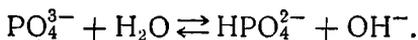
Водный режим — это такая организация докотловой водоподготовки, внутрикотловой обработки воды и продувки котла, которая обеспечивает минимальную коррозию, допустимую величину уноса солей паром и практически безнакипный режим работы котла. Последнее особенно важно, так как для современных котлов, работающих с тепловыми нагрузками труб радиационной поверхности нагрева, достигающими несколько сот тысяч ккал/м²·ч, наличие даже небольшой накипи вызывает большое повышение температуры стенок труб и аварию котла.

Так как полностью удалить из питательной воды ионы жесткости и газов практически невозможно, то для обеспечения безнакипного режима работы котла в котел вводят небольшое количество химических веществ, способствующих выделению накипеобразующих ионов Ca²⁺ и Mg²⁺ в виде соединений, дающих легкоподвижный шлам. Такой метод называется коррекцией. Одновременно в котловой воде поддерживаются условия, исключающие развитие коррозии.

В настоящее время в качестве коррекционного метода внутрикотловой обработки воды применяют фосфатный, фосфатно-нитратный и щелочно-фосфатный режимы с дополнительным введением в питательную воду в отдельных случаях (для защиты металла от коррозии) гидразина.

При всех трех видах обработки воды в ней стремятся создать избыток фосфатных ионов PO₄³⁻. При этом исключается выпадение накипеобразующих соединений Ca и Mg.

Для образования шламообразующих соединений и защиты от коррозии необходимо также, чтобы, кроме избытка фосфат-ионов, в котловой воде был избыток ионов OH⁻. Этот избыток может быть создан в котловой воде введением в нее вместе с фосфатами щелочей типа NaOH, Na₂CO₃ (щелочно-фосфатный режим) или только фосфатов (чисто фосфатный режим), так как последние образуют ионы OH⁻ в результате гидролиза фосфатных соединений по схеме:



Без добавочного ввода щелочей расход фосфатов получается значительным, поэтому чисто фосфатный режим применяют пока редко (только при питании котла водой с весьма малым содержанием ионов Са и Mg).

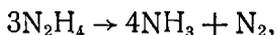
Чисто фосфатный режим рекомендуется для судовых водотрубных котлов высокого давления (свыше 90 кгс/см²). Добавочной водой в этих случаях могут быть бидистиллят или смягченный дистиллят.

Учитывая трудности, связанные с точным расчетом дозировки фосфатов, на практике избыток фосфатов в котловой воде поддерживают в пределах 30—50 мг/л фосфат-иона PO₄³⁻ путем введения в котел Na₃PO₄ (ГОСТ 201—58) и других фосфатов натрия. При этом за счет гидролиза части фосфатов в котловой воде образуется щелочность, достаточная для защиты котла от коррозии.

Щелочно-фосфатный режим для котлов высокого давления опасен, так как при высокой температуре (около 300°С) может возникнуть щелочная коррозия. При чисто фосфатном режиме такая опасность отсутствует, так как при повышенной температуре воды в котлах высокого давления степень гидролиза фосфатных соединений с образованием OH⁻ снижается.

В последнее время для судовых водотрубных котлов с давлением пара свыше 28—32 кгс/см² все шире применяют гидразин, который прекращает коррозию. Дозировка гидразина обычно не превышает 0,05—0,1 г на 1 т вырабатываемого котлом пара.

При высокой температуре гидразин разлагается по схеме:



поэтому вводить его непосредственно в котел или в питательную магистраль у питательного клапана не рекомендуется, особенно для котлов повышенного и высокого давлений.

Дозировку гидразина устанавливают по кислородосодержанию питательной воды (с запасом в 1,5—2 раза).

При работе с гидразином следует соблюдать меры предосторожности, так как он разъедает кожу и может вызвать экземные заболевания. Работа без защитных рукавиц не допускается.

Фосфатно-нитратный режим может быть рекомендован для всех котлов с давлением пара свыше 20 и до 90 кгс/см².

Нитрат NaNO₃ (ГОСТ 828—68), вводимый в котел в виде технической натриевой селитры, является пассиватором и образует на внутренних стенках котла защитную пленку, предупреждающую развитие коррозии.

При высокой температуре (т. е. при $P_k > 90$ кгс/см²) NaNO₃ разлагается и его введение в котел нерационально. Нитрат натрия не принимает участия во внутрикотловых процессах, поэтому его количество в котловой воде уменьшается только при уносе из котла паром и за счет продувки котла.

Содержание NaNO_3 в котловой воде поддерживают около 50% общей щелочности, пересчитанной на NaOH (например, при щелочности котловой воды 150 мг/л NaOH содержание NaNO_3 должно быть 75 мг/л).

Чисто фосфатный и фосфатно-нитратный режимы требуют высокого качества питательной воды, в противном случае в котле будет образовываться много шлама (пропорционально жесткости питательной воды). Большое количество шлама приводит к увеличению количества продувок, что нежелательно и, кроме того, может вызвать вспенивание и унос воды из котла.

При щелочно-фосфатном режиме, применяющемся преимущественно для огнетрубных котлов и водотрубных котлов низкого давления с добавочным питанием сырой пресной водой, в котел вводят фосфаты ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ и др.) и щелочи (NaOH , Na_2CO_3). При этом расход фосфатов по сравнению с чисто фосфатным режимом значительно сокращается, так как 1 кг NaOH эквивалентен, по создаваемой в воде щелочности, примерно 3—4 кг технического фосфата.

Щелочи и фосфаты вводят отдельно либо вместе в виде антинакипина, содержащего и щелочи, и фосфаты в определенном соотношении.

Раздельное введение щелочей и фосфатов, т. е. их соотношение и дозировка, зависит от качества питательной воды и контролируется по щелочному числу котловой воды, содержанию в ней фосфат-иона и, на отдельных судах, по водородному показателю рН. При щелочно-фосфатном режиме рекомендуемое значение рН котловой воды составляет 10,4—11, щелочность воды — 100—150 мг/л, содержание избыточного фосфат-иона — не менее 7—10 мг/л.

Начальную дозировку щелочей и фосфатов, зависящую от характеристик конденсата и добавочной воды, устанавливает лаборатория парохозяйства конкретно для каждого судна; во время эксплуатации ее корректируют по данным анализов котловой воды.

Для котлов низкого давления широко применяют готовые реагенты в виде антинакипинов. В состав антинакипинов входят Na_2CO_3 , NaOH , Na_3PO_4 , Na_2PO_4 , Na_2CrO_4 и коллоидообразующие вещества (дубильный экстракт, крахмал) для создания центров кристаллизации при шламообразовании. Примерное соотношение фосфатов, щелочей и органических веществ в антинакипинах составляет 4 : 3 : 1.

Соли и газы, проникающие в котел, следует удалять посредством внутрикотловой обработки. Затем следует регулярно брать пробы воды на анализ, периодичность которых указана в табл. 10.

В огнетрубных котлах при контроле обычно измеряют плотность котловой воды ареометром. Плотность связана с общим содержанием, которое не должно превышать 13 000 мг/л. Затем проверяют содержание хлоридов (не более 8000 мг/л Cl^-) и щелочное число (150—200 мг/л NaOH).

Для котлов с фосфатно-нитратным водно-химическим режимом примерные нормы качества котловой воды указаны в табл. 12.

Показатели качества	Значения показателей для котлов				
	огнетрубных	водотрубных с давлением до 20 кгс/м ²	водотрубных с давлением, кгс/см ²		
			20—40	40—60	60—90
Жесткость остаточная, мг-экв/л	<0,4	<0,2	<0,05	<0,02	<0,02
Общее содержание, мг/л	<13 000	<3000	<2000	<300	<250
Хлориды, мг/л Cl ⁻	<8 000	<1200	<500	<30	<30
Щелочное число, мг/л NaOH	150—200	150—200	100—150	10—30	10—15
Фосфатное число, мг/л PO ₄ ³⁻	10—30	10—30	20—40	30—50	10—20
Нитратное число, мг/л NaNO ₃	75—100	75—100	50—75	5—15	—

Необходимые для внутрикотловой водообработки химические реагенты подают в котел периодически или непрерывно обычно в 10%-ном растворе. Первый способ обычно применяют только для небольших огнетрубных котлов. В этом случае суточную или полусуточную дозу реагентов растворяют в горячей воде и вводят через теплый ящик или специальное вытеснительное устройство на питательной магистрали. При температуре питательной воды за водоподогревателями более 80°С реагенты следует вводить в питательную магистраль перед самым котлом или (что лучше) непосредственно в котел через специальный клапан и перфорированную трубу.

Начальные дозировки химических реагентов при пуске парового котла устанавливают для каждого судна в карте водного режима или другом документе, составляемом лабораторией парохозяйства. Они основаны на нормах.

Дозировка тринатрийфосфата, необходимая для достижения его нормы Φ_0 , может быть рассчитана по выражению

$$T = 4V (\Phi_0 - \Phi),$$

где T — дозировка тринатрийфосфата, г на котел;

V — водный объем котла, м³ (или масса воды, т);

Φ_0 и Φ — нормальное и фактическое фосфатные числа (по анализу котельной воды), мг/л PO₄³⁻.

Дозировка натриевой селитры, необходимая для получения нормы H_0 , равна:

$$C = V (H_0 - H),$$

где C — дозировка селитры, г на котел;

H_0 мг/л NaNO₃ — норма нитратного числа;

H мг/л NaNO₃ — фактическое нитратное число.

Для упрощения расчетов содержание чистых NaNO₃ и Na₃PO₄ в техническом продукте принимают за 100%. При расчете начальных дозировок принимают Φ и H равными нулю.

Потребность в реактивах определяют по выражениям:

$$T_c = \frac{Dp\Phi_0 \times 24 \times 4}{100 \times 1000};$$

$$C_c = \frac{DpH_0 \times 24}{100 \times 1000},$$

где T_c — расход тринатрийфосфата, кг/сут;

C_c — расход селитры, кг/сут;

D — паропроизводительность котла, т/ч;

p — величина воды, продуваемой из котла, в процентах от его паропроизводительности.

Дозировку антинакипина можно рассчитать по щелочности котловой воды по выражению

$$Q = 0,001\mathcal{E}(\mathcal{W}_0 - \mathcal{W}_{к.в})V,$$

где Q — дозировка антинакипина, необходимая для получения в котле нормы щелочного числа, кг;

\mathcal{E} — осадительный эквивалент антинакипина (для антинакипина М.Ф. равен 94);

\mathcal{W}_0 и $\mathcal{W}_{к.в}$ — нормальная и фактическая щелочность котловой воды (мг-экв/л),

либо по выражению

$$Q = 0,001\mathcal{E}\left(\frac{\mathcal{W}_0 - \mathcal{W}_{к.в}}{40}\right)V,$$

если \mathcal{W}_0 и $\mathcal{W}_{к.в}$ выражены в мг/л NaOH (т. е. представляют собой так называемые щелочные числа котельной воды).

§ 42. Продувание

В том случае, если показатели качества воды в котле превышают допускаемые нормы, вода должна быть частично удалена из котла и заменена более чистой — питательной.

На каждом котле есть устройства для верхнего и нижнего продувания. Верхнее продувание может быть непрерывным или периодическим, нижнее — только периодическим.

Для нижнего продувания краны и трубы располагают в нижней части барабанов котлов. При таком продувании удаляется шлам и часть котловой воды, в результате чего общее солесодержание, шламосодержание и другие характеристики воды снижаются (за счет поступления чистой питательной воды взамен удаленной). Нижнее продувание производят на судах обычно один раз в сутки и реже по графику водного режима, причем удаляют количество воды, примерно равное $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{2}$ ее нормального уровня по водоуказательному стеклу.

При верхнем продувании из котла вместе с водой удаляются соли, легкий взвешенный шлам и масло. Периодическое верхнее продувание производят чаще (до одного раза за вахту), причем уровень воды снижают примерно до 0,5% часовой паропроизво-

длительности котла, при этом не более чем на $1/4—1/3$ нормального уровня в стекле.

Продувание котлов производят в соответствии с Правилами [10]; бассейновые лаборатории затем корректируют его применительно к данному типу судна.

При нижнем продувании котла внутри него в местах ожидаемого наибольшего скопления шлама (под жаровыми трубами в нижней части барабана оборотных котлов, в нижней части водяных коллекторов) устанавливают трубы с отверстиями или щелями, обращенными вниз (см. рис. 68 и 69). Обычно трубу нижнего продувания располагают на расстоянии 20—30 мм от нижней стенки барабана или коллектора, а размещение отверстий в ней должно соответствовать ожидаемому скоплению шлама, т. е. количество отверстий должно быть наибольшим в местах максимального скопления шлама.

Диаметр трубы продувания, размещенной за краном продувания, определяют по Регистру СССР (должен быть больше 20, но меньше 40 мм во всех случаях).

Если живое сечение трубы продувания превышает суммарное сечение сделанных в ней отверстий или щелей в 4 раза, такая труба считается дросселирующей и продувать котел нижним продуванием можно при рабочем давлении с соблюдением следующих предосторожностей: по возможности уменьшить горение в топке, поддерживать уровень воды на РУВ и открывать клапан или кран не полностью на время не более 5 мин.

Сказанное в полной мере относится и к трубам верхнего продувания, которые, как правило, устанавливают только дроссельными с отверстиями диаметров 3—5 мм.

Трубы верхнего продувания располагают примерно на 50 мм ниже НУВ в верхнем барабане котла, по две или по одной на барабан, с симметричным присоединением ответвлений труб к клапану верхнего продувания.

В простейших случаях к трубе (или трубам) верхнего продувания крепят воронки, устанавливаемые на 50—100 мм ниже РУВ в котле. Рекомендуется вынести отметку верхнего края воронки на водоуказательную колонку для предотвращения выхода из котла пара вместо воды. Внутри воронки надо приварить радиальные ребра для того, чтобы избежать завихрений воды и поступления пара через воронку в трубопровод продувания.

Для верхнего продувания открывают клапан в течение примерно 5 мин.

Продувочная вода из огнетрубных котлов бывает загрязненной, поэтому ее, как правило, удаляют за борт.

Солесодержание продувочной воды водотрубных котлов обычно во много раз меньше, чем огнетрубных. Поэтому рационально осуществлять верхнее продувание котлов на испарители.

Для регулирования количества воды, удаляемой при непрерывном, верхнем продувании, на котле устанавливают регулирующий клапан.

Эксплуатация продувочных устройств сводится к поддержанию их в исправном техническом состоянии, своевременной притирке кранов и клапанов продувания, замене корродированных труб внутри котла и продувании в соответствии с инструкциями. Пропуск кранов или клапанов продувания легко обнаруживается по повышенной температуре трубы за краном (клапаном).

Количество продуваемой воды, определяемое установленными для данного котла нормами, контролируют по общему солесодержанию, щелочности и содержанию хлоридов в котловой воде. Продувание необходимо в случае превышения любым из этих показателей установленного предела.

Для приблизительного расчета величины продувки в процентах от паропроизводительности котла можно применить выражение

$$\varphi = \frac{D_{\text{пр}}}{D} 100,$$

где $D_{\text{пр}}$ — количество продуваемой из котла воды, кг;

D — паропроизводительность котла, кг.

Можно использовать выражение

$$S_{\text{к. в}} = \frac{100 + \varphi}{100k + \varphi S_{\text{п. в}}}, \quad (54)$$

где $S_{\text{к. в}}$ и $S_{\text{п. в}}$ — солесодержание котловой и питательной воды, мг/л;

k — постоянный коэффициент уноса солей паром,

$$k = \frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{к. в}}},$$

где $S_{\text{п}}$ — солесодержание пара (для судовых водотрубных котлов можно принять 0,1—0,2 мг/кг).

Подставив в выражение (54) величины допускаемого $S_{\text{к. в}}$ и фактического $S_{\text{п. в}}$ солесодержания можно определить величину φ (в процентах).

Для снижения содержания хлоридов или щелочности воды в котле продувание рассчитывают по формуле (54), но $S_{\text{к. в}}$ и $S_{\text{п. в}}$ в этом случае должны выражать содержание хлор-иона Cl^- или NaOH (в мг/л).

Количество продуваемой воды $G_{\text{пр}}$ (кг/сут) будет равно:

$$G_{\text{пр}} = 240\varphi D,$$

где D — паропроизводительность котла, т/ч.

Нормы котловой воды регулируют изменением количества продуваемой воды, а не сроков между продуваниями.

Учитывая, что нормы определяют предельные величины солесности конденсата 10—50 мг/л хлор-иона, а величина солесности морской воды составляет 15 000—20 000 мг/л хлор-иона, в эксплуатации недопустимы даже небольшие подсосы забортной воды в конденсаторе.

Выполнение продувания, показания приборов, результаты анализов конденсата, добавочной и котловой воды, качество принимаемой с берега пресной воды записывают в судовой журнал водоконтроля.

В случаях приемки воды в иностранных портах механик должен учитывать не только качество воды, но и ее стоимость, которая в иностранных портах отличается в 6—8 раз и зависит от времени дня, способа налива воды (с берега или с плавсредств) и т. д.

Глава XII. СЕПАРАЦИЯ ПАРА

§ 43. Чистота насыщенного пара

Котловая вода представляет собой сложную смесь растворов различных солей и взвесей. Одновременно в котле имеются и газообразные вещества — кислород, азот, углекислый газ и аммиак. Газообразные вещества поступают вместе с паром в пароперегреватель и турбину и не оказывают какого-либо влияния на образование в них отложений (кроме CO_2). Влияние кислорода и углекислого газа на коррозию пароперегревателя и конденсатно-питательной системы было рассмотрено выше.

Отложения на стенках труб пароперегревателя и лопатках турбин образуются вследствие уноса паром солей из котла. Чистоту насыщенного пара можно определить по степени влажности, общему солесодержанию $S_{\text{п}}$ (мг/кг) и содержанию в нем отдельных веществ ($S_{\text{п}}^{\text{NaCl}}$, $S_{\text{п}}^{\text{Na}_2\text{SO}_4}$ и т. п.).

Все современные паровые двигатели работают на перегретом паре, т. е. степень влажности пара, отбираемого из барабана котла, непосредственно влияет на работу пароперегревателя (температура перегрева с повышением влажности насыщенного пара будет уменьшаться).

Если бы влага насыщенного пара не содержала солей, то величина 1-х оказывала бы влияние только на тепловые характеристики двигателя или пароперегревателя. Практически насыщенный пар содержит соли, имеющиеся в котловой воде, и это представляет серьезную угрозу для пароперегревателя и турбины.

На морских судах степень чистоты пара официально не нормируется, в частности, из-за отсутствия надежных и достаточно точных приборов для измерения солесодержания. В качестве временных норм для общего солесодержания насыщенного пара можно рекомендовать менее 0,2 мг/кг при давлении пара 40—60 кгс/см² и до 0,3 мг/кг при давлении 15—40 кгс/см².

Пароперегреватель и турбину следует осматривать и промывать примерно через 10 000 рабочих часов. Поэтому для обеспечения требуемой чистоты пара его нужно очищать от влаги и солей.

Насыщенный пар при давлении до 80 кгс/см^2 загрязняется солями в основном вследствие капитального уноса, величина которого зависит от конструкций котла и паросепарирующих устройств. Кроме того, имеют значение условия эксплуатации котла, состояние моря, крен и дифферент судна, режимы нагрузки котла и скорость перехода от одного режима к другому.

Зависимость влажности пара от нагрузки котла показана на рис. 110, из которого видно резкое увеличение уноса при форсировке котла.

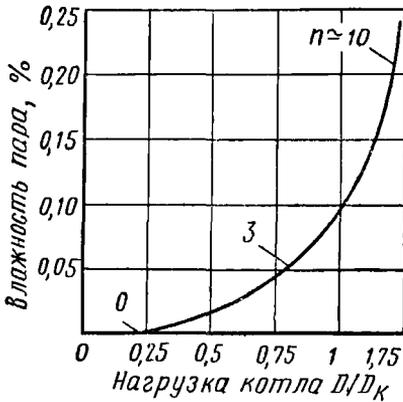


Рис. 110. Зависимость влажности пара от нагрузки котла

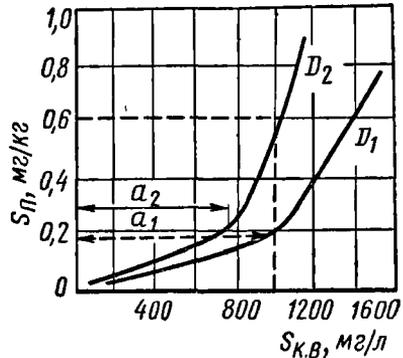


Рис. 111. Зависимость соле содержания пара $S_{\text{П}}$ от нагрузки котла D и соле содержания котловой воды $S_{\text{К.В}}$

При поступлении пара под зеркало испарения количество унесенной влаги будет пропорционально скорости пара. Часть капель воды, поднятых паром с поверхности зеркала испарения, будет падать вниз, так как средняя скорость пара в паровом пространстве барабана меньше скорости пара в момент выхода парового пузырька на поверхность воды. Тяжелые капли возвращаются в воду, а более легкие уносятся паром из котла.

Местная скорость выхода пара быстро снижается и сравнивается с некоторой средней скоростью пара в паровом пространстве. Если высота парового пространства достаточна для процесса снижения скорости пара, то унос будет небольшим. Опыты показали, что унос воды резко снижается при высоте парового пространства более $0,5-0,6 \text{ м}$.

С достижением некоторой нагрузки котла, которую можно назвать критической, унос начинает резко возрастать, т. е. величина влажности пара значительно увеличивается (см. рис. 110).

На рис. 111 видно, что при солёности котловой воды $S_{\text{К.В}} = 1000 \text{ мг/л}$ и заданном значении $S_{\text{П}} \leq 0,2 \text{ мг/кг}$ предельной нагрузкой для данного котла будет D_1 т/ч, так как при увеличении паропроизводительности до $D_2 > D_1$ соле содержание пара резко

возрастет и может достигнуть опасной для эксплуатации пароперегревателя величины. Следовательно, для D_1 , D_2 и т. д. существуют определенные докритические области a_1 , a_2 и т. д., характеризующие критическим содержанием $S_{к.в}$ при данной нагрузке.

Значительную роль в увлажнении пара играет пенообразование на поверхности зеркала испарения. Интенсивность пенообразования зависит от веществ, содержащихся в котловой воде. Поверхностно-активные вещества, например многие органические соединения, концентрируются в основном на границе раздела паровой и водяной фаз. Пузырек пара, всплывающий к поверхности зеркала испарения, оказывается окруженным двумя адсорбционными слоями, между которыми находится пленка жидкости. Чем больше вязкость жидкости и ее поверхностное натяжение, тем устойчивее пузырек пара.

Непрерывное поступление пузырьков из водяного пространства создает слои пены. Давление в пузырьке пара растет за счет теплоотдачи от внутренней стенки пузырька к пару. Когда оно превысит внешнее давление и силы поверхностного натяжения, пленка пузырька разорвется, и частицы воды распылятся в паровом пространстве. При большой вязкости жидкости околопузырьковая пленка будет более прочной и толстой и общая масса распыленных капелек возрастет.

Наибольшей вспенивающей способностью обладают щелочи, они вызывают устойчивое пенообразование и увеличение уноса, поэтому их излишек в котловой воде нежелателен.

§ 44. Паросепарирующие устройства

Принцип действия любого паросепарирующего устройства основан на различии плотности воды и пара. Сепарирующие устройства имеют две основные функции: гашение кинетической энергии мощных пароводяных струй, выходящих из водогрейных труб, и отделение мелких капель (влаги) от пара.

Для выполнения первой задачи необходимо устранить добавочное дробление струй при ударе о какую-либо поверхность, что увеличивает поверхность мелких капель и пенообразование.

При более тщательной, вторичной сепарации используют центробежный эффект или смачивание поверхности проходящим вдоль нее паром.

Наиболее простые сепарирующие устройства применяют у огнетрубных котлов. Пар из барабана оборотного котла отбирается через обычную трубу с отверстиями или щелями, размещенную вдоль верхней образующей барабана или в сухопарнике котла.

Более совершенны простейшие центробежные сепараторы (рис. 112), устанавливаемые в верхней части парового пространства котла. Пар поступает в верхние щели 2 шириной 5—10 мм и проходит в паросборную трубу 1, совершая на своем пути два поворота на 180°. Отсепарированная влага удаляется через дренажную трубку 3.

Для водотрубных котлов с высокими нагрузками парового пространства применяют более сложные сепарирующие устройства.

На рис. 113, а показано внутрибарабанное сепарирующее устройство судового котла «Ла Монт». Направляющие щиты 3 и 6 предназначены для плавного поворота струй пароводяной смеси, выходящей из водогрейных труб 8 и сборного коллектора 7 экранных труб котла.

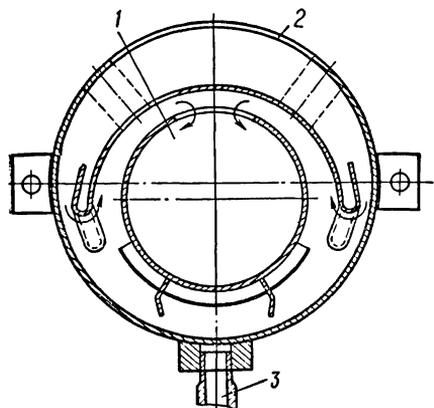


Рис. 112. Сепаратор пара

Для уменьшения пенообразования питательная труба 5 размещена в специальном корыте 4, откуда питательная чистая вода направляется по касательной к РУВ. Пар после выхода из-под щита 3 проходит вертикальный жалюзийный сепаратор 2 и поступает в паросборную трубу 1, прикрепленную к барабану 9.

В судовых котлах применяют как вертикальные, так и горизонтальные жалюзийные сепараторы. Они представляют собой гофрированные тонкие стальные щиты, собранные в пакеты.

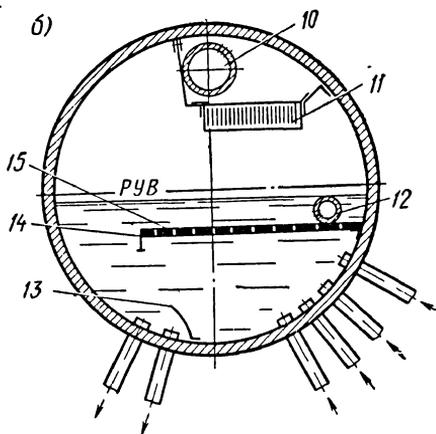
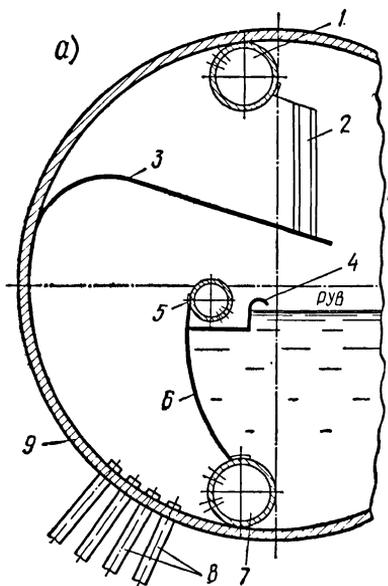


Рис. 113. Внутрибарабанные сепарирующие устройства

В пароводяных барабанах судовых котлов широко применяют дырчатые погруженные щиты (рис. 113, б), устанавливаемые обычно на 100—150 мм ниже РУВ. Позиции на рисунке означают: 10 и 12 — паросборная и питательная трубы; 11 — жалюзийный

сепаратор; 13 — направляющий лист; 14 — буртик щита; 15 — дырчатый щит.

Диаметр отверстий в щите обычно равен 10—15 мм. Количество отверстий принимают из расчета скорости пара.

Погруженный дырчатый щит противодействует повышению уровня, способствует равномерному распределению выходящего пара по площади зеркала испарения и служит успокоителем воды при качке судна. Поверх щита подается питательная вода для промывки пара. При этом солесодержание околопленочной жидкости пузырьков пара несколько снижается.

В современных судовых водотрубных котлах распространены внутрибарабанные циклонные сепараторы (рис. 114), уменьшающие унос паром солей из котла.

Сепаратор 5 установлен на группе водогрейных труб 7, объединенных общим направляющим щитом 1. Этот щит идет вдоль всего барабана 6 котла, а на нем установлены циклоны (из расчета по одному циклону на 3—3,5 т/ч пара). При такой производительности циклона диаметр его стакана 3 составляет около 300 мм.

Влага, содержащаяся в паре, отбрасывается на стенки стакана 3 благодаря интенсивному закручиванию пара неподвижными лопастями сердечника 2 в центре циклона. Поток пара влага увлекается по внутренним стенкам стакана 3 и, переливаясь через его край, поступает в водяное пространство котла. Пар дополнительно сепарируется в жалюзийном устройстве 4 и поступает к паросборной трубе.

Недостаточная эффективность паросепарирующих устройств может быть причиной поломки труб пароперегревателя. Например, сепарирующие устройства первых серий котлов КВГ не обеспечивали требуемой чистоты пара, поэтому солесодержание котловой воды приходилось снижать до 200—100 мг/л и менее, что намного ниже норм. При работе котлов с низким солесодержанием воды необходимы более частые продувки, что связано с большими потерями тепла и воды. Так, при снижении допускаемого солесодержания котловой воды от 1500 до 300 мг/л потери тепла и воды, удаляемой при продувке, эквивалентны перерасходу мазута около 500 т в год на одно судно с котлами паропроизводительностью 50 т/ч.

При первой возможности (т. е. при выводе котла из действия) необходимо проверять состояние паросепарирующих устройств и производить их профилактический ремонт.

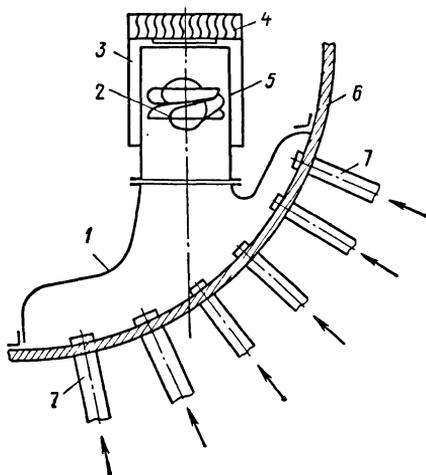


Рис. 114. Схема внутрибарабанного циклона

Во время работы котла нельзя быстро увеличивать его нагрузку по пару, так как вследствие быстрого снижения давления при увеличении отбора пара может повыситься уровень и вода попадет в паропровод и перегреватель.

Такое аварийное вспенивание воды возможно и в случае попадания в котел значительного количества солей (например, при аварии труб конденсатора). При вспенивании воды необходимо уменьшить горение в топке, продуть котел и проверить содержание хлоридов в конденсате. При значительном поступлении солей котел необходимо вывести из эксплуатации, заменить в нем воду и отремонтировать конденсатор.

В штормовых условиях унос, как правило, резко возрастает. В этом случае рекомендуется снизить солесодержание воды в котле внеочередными продувками, не допускать повышения уровня выше РУВ.

Глава XIII. ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОДЫ В КОТЛАХ

§ 45. Основные понятия и определения

Чистота внутренних стенок поверхности нагрева — обязательное условие надежной эксплуатации парового котла. Однако выполнение одного этого требования еще недостаточно.

В эксплуатации, особенно с началом применения на судах водотрубных котлов, наблюдались многочисленные повреждения водогрейных труб, несмотря на практически полное отсутствие накипи на их стенках. Повреждения происходили как при форсированных, так и при пониженных режимах работы котлов.

Исследования показали, что температура стенок водогрейных труб зависит не только от степени загрязнения их накипью, но также от условий циркуляции воды в котле, т. е. степени омыwania пароводяной смесью внутренней поверхности труб.

Если чистая поверхность трубы покрыта по всей длине непрерывной водяной пленкой, то температура стенки будет близка к температуре воды даже при весьма высоких тепловых нагрузках. Это явление объясняется физическими свойствами воды и процессом передачи тепла от газов к воде через металлическую стенку. Действительно, коэффициент теплоотдачи α_1 от газов к стенке обычно не превышает 40—60 ккал/м²·ч·°С. Величина же коэффициента теплоотдачи α_2 от стенки к воде составляет 8000—10 000 ккал/м²·ч·°С и более, т. е. все тепло, переданное от газов стенке, практически немедленно воспринимается водой. При этом температура самой стенки будет незначительно превышать температуру охлаждающей ее воды.

Сохранение непрерывной водяной пленки на испарительной поверхности нагрева зависит от циркуляции воды и пароводяной смеси в котле. При правильно организованной циркуляции водяная пленка обеспечивает хороший отвод тепла от стенок обогреваемых

труб, вследствие чего температура стенок не превышает опасных по условиям прочности пределов.

Если по каким-либо причинам циркуляция воды в пароводяной смеси будет нарушена даже на отдельном участке трубы, то возможно выпаривание, т. е. разрушение околостенной водяной пленки, и часть трубы (или труб) окажется заполненной движущимся с малой скоростью паром. Коэффициент теплоотдачи от стенки к перемещающемуся вдоль нее перегретому пару, как известно, весьма мал — в десятки раз меньше, чем коэффициент теплоотдачи от стенки к воде. Таким образом, условия нормального отвода тепла от стенки нагреваемой трубы будут нарушены и на данном участке возникнет аварийное состояние, стенка трубы окажется деформированной или разорванной.

Температура стенки может резко возрасти также в тех случаях, когда поток пароводяной смеси расслаивается, например при интенсивном обогреве горизонтальных и слабонаклонных труб.

Циркуляция воды может нарушиться в трубах, расположенных в любом месте газохода котла, но аварийное состояние труб возникает в том районе газохода, где газы имеют высокую температуру.

Нарушение циркуляции может быть следствием неправильного проектирования котла, а также нарушения правил технической эксплуатации на судне. Надежность циркуляции обычно рассчитывают при проектировании котла.

В настоящее время нет паровых котлов, ненадежных в отношении циркуляции при всех режимах работы.

Водотрубный котел состоит из ряда замкнутых циркуляционных контуров (рис. 115), каждый из которых может быть простым или сложным. Например, простой контур образован замкнутой кольцевой системой, состоящей из барабана 1, труб 12, коллектора 11 и труб 13. Каждая последовательно расположенная часть контура называется трубным элементом (например, трубы 12, 13, 4 и т. д.).

В сложных контурах отдельные элементы являются общими для ряда контуров. Например, трубы 6 будут общими для контуров 1—6—7—5 и 1—6—7—8—9—4. Если тепловосприятие или конфигурация трубного элемента неодинаковы на всем его протяжении, то элемент разделяют на отдельные участки, например 10, 3, 2 для трубного элемента 4 и т. д.

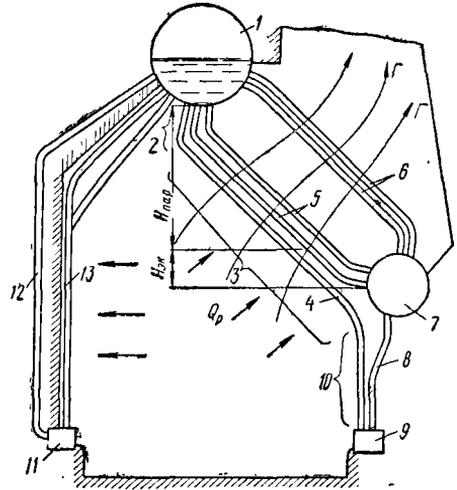


Рис. 115. Схема циркуляционных контуров котла

Тепловосприятие труб 13, 4, 5, 6 и т. д. за счет рационального и конвективного теплообмена с потоком газов G неодинаково. Например, в данном случае большее тепловосприятие будет для труб 13 и 4, меньшее — для труб 5, еще меньшее — для труб 6, а трубы 12, вынесенные за пределы газохода, вообще не получают тепла от газов

В тех участках труб, где количество воспринятого тепла превышает количество, потребное для доведения воды до кипения при данном давлении, начнется парообразование. В трубах этих элементов образуется пароводяная смесь. Под влиянием разности масс столбов воды в слабообогреваемых или необогреваемых трубных элементах 6, 8, 12 и пароводяной смеси в элементах 4, 5, 13 образуется движение воды в циркуляционных контурах котла. При этом можно отметить подъемные 4, 5, 13 и опускные 6, 8, 12 трубы контура.

Кратностью циркуляции K в каком-либо контуре (или котле в целом) называется отношение количества воды, проходящей через контур, к паропроизводительности этого же контура за равные промежутки времени (1 ч). Кратность циркуляции обычно составляет 20—40 для водотрубных котлов низкого давления и 10—12 для напряженных экранированных котлов среднего и повышенного давления.

Таким образом, количество воды, проходящей через подъемные и опускные трубы котла за 1 ч, в несколько раз превышает его паропроизводительность.

Скоростью циркуляции называется скорость воды на входе в подъемные трубы контура. Различают экономайзерную часть трубы, на которой подогревается движущая вода до температуры насыщения, и паросодержащую, в которой движется пароводяная смесь.

Циркуляция в контуре происходит под действием движущего напора — разности массы столба воды в опускных трубах контура и массы столба пароводяной смеси в подъемных трубах этого же контура. Часть движущего напора расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений участков контура.

Полезным напором паросодержащих подъемных труб называется разность движущего напора и гидравлических сопротивлений контура. Удельным движущим или полезным напором называется напор, отнесенный к единице высоты трубы (1 м).

Гидравлической характеристикой трубного элемента или контура называется зависимость полезного напора $S_{пол}$ от расхода воды G при неизменных обогреве труб и теплосодержании воды на входе в элемент (контур).

Комплекс гидравлических характеристик элемента, составленных для различных обогревов и теплосодержаний среды на входе в него, называется гидравлической диаграммой.

При расчете циркуляции определяют скорость воды и пароводяной смеси, кратность циркуляции и полезные напоры в контурах, оценивают надежность циркуляции при различных режимах

работы котла. Для расчета циркуляции необходимо иметь тепловой расчет котла, все конструктивные данные по котлу и по проектируемым к установке экранам (диаметры и длины труб, размеры коллекторов, соединительных и опускных труб и т. д.).

Полезные напоры подъемных элементов контура и гидравлические сопротивления опускных элементов определяют для трех предварительно задаваемых расходов воды данного контура. Обычно за исходную скорость воды на входе в подъемные трубы экранов и первые ряды водогрейных труб принимают 0,5—1—1,5 м/с и весь расчет ведут для этих трех режимов работы контура.

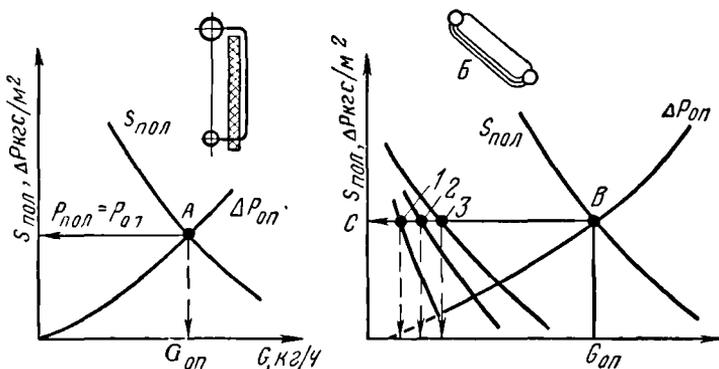


Рис. 116. Гидравлические характеристики циркуляционных контуров котла

Полученные расчетом значения полезных напоров и сопротивления опускных труб $\Delta p_{оп}$ наносят на график (рис. 116). Точка пересечения A кривых $S_{пол}$ и $\Delta p_{оп}$ будет характеризовать рабочий режим контура.

По полученному значению расхода воды $G_{оп}$ через контур определяют фактическую кратность циркуляции воды в контуре или для всего котла в виде:

$$K = \frac{G_{оп}}{D},$$

где $G_{оп}$ — расход воды через все опускные трубы котла при его паропроизводительности D .

При циркуляционных контурах типа B , состоящих из нескольких трубных элементов, точку B , которая характеризует рабочий режим контура, определяют при пересечении кривой $\Delta p_{оп}$ сопротивления опускных труб и суммарной кривой $S_{пол}$ полезных напоров всех подъемных труб. Кривую $S_{пол}$ строят по точкам путем суммирования абсцисс $c1 + c2 + c3$ для нескольких произвольно взятых ординат.

Расчет циркуляции наряду с тепловым расчетом котла, расчетом прочности его элементов и данными по установленному

водному режиму позволяет оценить надежность работы отдельных трубных элементов (рядов) и всего котла в целом, а также способствует выяснению причин повреждений труб при эксплуатации котла.

§ 46. Надежность циркуляции

Надежность работы парового котла зависит от надежности труб, образующих его поверхность нагрева, так как выход из строя даже одной трубы требует немедленного вывода котла из действия.

Надежность работы водогрейных труб зависит от температуры их стенок, так как материал труб и предельно допускаемые напряжения в них принимают в зависимости от допускаемой температуры стенки. Температуру наружной стенки трубы можно с достаточной точностью определить по формуле

$$t_{ст}^н = t_{ср} + q \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_н}{\lambda_н} \right),$$

где $t_{ср}$ — температура среды, протекающей в трубе, °С;

q — удельная тепловая нагрузка, ккал/м²·ч;

α_2 — коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки трубы к среде, ккал/м²·ч·°С;

$\delta_{ст}$, $\delta_н$ — толщины стенки трубы и отложений (накипи), м;

$\lambda_{ст}$, $\lambda_н$ — коэффициенты теплопроводности стенки трубы и накипи, ккал/м·ч·°С.

Величина $t_{ст}^н$ при любых условиях не должна превышать допустимой, принятой для данной трубы при расчете на прочность.

Рассмотрим влияние различных параметров, входящих в эту формулу, на фактическую температуру стенки испарительной трубы. Обычно $t_{ст} = t_s$, т. е. средняя температура равна температуре насыщения при данном давлении пара. Однако при нарушении гидродинамики пароводяного потока в трубе эти условия могут быть нарушены, а вместо сплошной водяной пленки, омывающей внутренние стенки трубы, может возникнуть неподвижный или перемещающийся с небольшой скоростью пар. Этот пар будет перегреваться за счет теплообмена со стенкой трубы, т. е. на данном участке $t_{ср}$ окажется больше t_s . Такие условия могут быть следствием гидравлической и тепловой неравномерности, характерной в той или иной степени для всех поверхностей нагрева котлоагрегата.

Любые поверхности нагрева котлоагрегата с естественной циркуляцией (испарительные трубы, трубы экранов, пароперегревателей, экономайзера) образованы рядами параллельно работающим труб, подключенных к соединительным барабанам. Аналогичные условия работы труб характерны и для котлов с многократно-принудительной циркуляцией (типа «Ла Монт»), имеющих ряд параллельно включенных змеевиков.

Вследствие различных тепловосприятий труб в ряду и разного гидравлического сопротивления параллельно включенных труб (или змеевиков) истинный расход среды через трубу будет отличаться от средней его величины для всего циркуляционного контура, в состав которого входят данные трубы. При этом будут и различные значения энтальпии среды на выходе из отдельных труб.

Тепловая неравномерность зависит от расположения труб по отношению к факелу, степени наружных загрязнений труб, аэродинамики потока газов и т. д. Она тесно связана с гидравлической

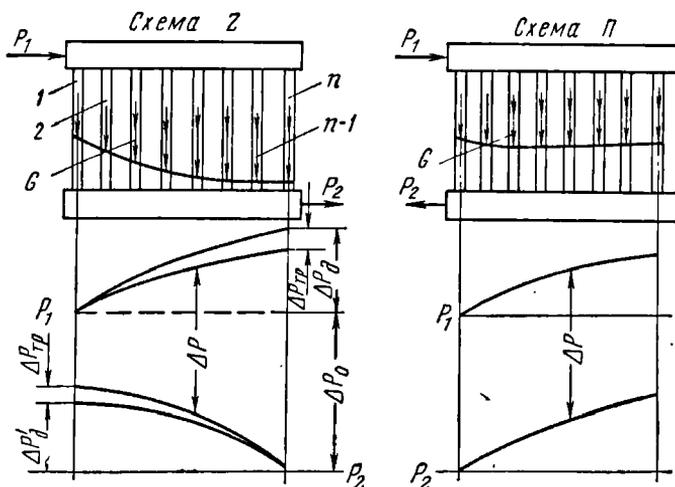


Рис. 117. Зависимость перепада давления по параллельно включенным трубам (или змеевикам) от схемы включения

неравномерностью, причем последняя, помимо отмеченных выше факторов, зависит от величины и состава внутренних отложений. Внутренние отложения на трубах в свою очередь тесно связаны с их гидравлической неравномерностью. Интенсивность отложений, как правило, резко возрастает в местах разрывов водяной пленки на стенках труб (вследствие местного выпаривания котловой воды и повышения температуры стенки).

Таким образом, анализ формулы показывает, что все параметры, входящие в нее, могут изменяться в широких пределах и привести к недопустимому повышению $t_{ст}$, если расчетные тепловые, гидравлические или водно-химические условия работы труб будут нарушены.

Величина гидравлической и тепловой неравномерности зависит также от метода подключения труб (змеевиков) к коллекторам экранов, экономайзеров, пароперегревателей и т. п.

На рис. 117 показано распределение перепадов давления по параллельно включенным трубам при так называемой схеме Z и

схеме *П*. В верхних раздаточных коллекторах давление среды будет расти вдоль коллектора по мере преобразования динамического напора Δp_d в статический. Этот прирост давления будет меньше Δp_d на величину потери на трение $\Delta p_{тр}$ в коллекторе.

При схеме *Z* левые трубы *1, 2* и т. д. будут работать с перепадом давлений $\Delta p = p_1 - p_2 - \Delta p_{вых}$, а правые *n, n-1* и т. д. — с перепадом $\Delta p = p_1 - p_2 + \Delta p_{вых}$, т. е. расход *G* в этих трубах будет больше, чем в трубах *1, 2* и т. д.

В схеме *П* левые трубы будут работать с перепадом давлений $\Delta p = p_1 - p_2$, а правые — с перепадом $\Delta p = p_1 - p_{вых} - \Delta p_{вых}$, т. е. примерно с постоянным перепадом давлений и при разном расходе *G* в отдельных трубах.

Наилучшей является схема с рассредоточенным подводом и отводом среды к коллекторам, но конструктивное выполнение ее связано с некоторыми трудностями.

Причиной перегрева труб в водотрубных котлах с естественной циркуляцией может быть запаривание труб при опрокидывании потока, появление в трубах свободного уровня и застоя. При запаривании трубы пар не может преодолеть динамического воздействия движущейся вниз воды и выйти в сборный коллектор или барабан котла.

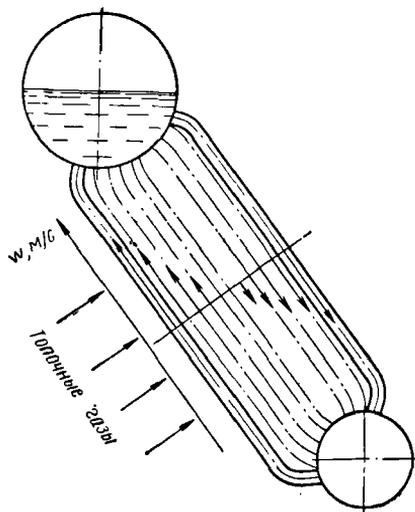


Рис. 118. Контур циркуляции в сложном пучке водогрейных труб

На практике опрокидывание потока недопустимо. Оно может, например, произойти в средних трубах пучка (рис. 118) при изменении нагрузки котла. Поэтому в современных котлах стараются избежать такой комбинации подъемных и опускающих труб путем установки необогреваемых опускающих труб, соединяющих барабан котла с нижним коллектором.

При разрыве замкнутой циркуляции в контуре (если невозможно поднять пароводяную смесь до места ввода подъемной трубы в барабан) в такой трубе, выведенной в паровое пространство котла, образуется свободный уровень, причем на участке выше этого уровня будет медленно двигаться сухой пар.

Застоем циркуляции называется медленное движение воды в обогреваемой трубе (вверх или вниз) с кратностью циркуляции, равной единице. При этом возможен застой паровых пузырей на отдельных участках трубы (особенно в местах изгибов).

Исследования циркуляции и опыт эксплуатации водотрубных котлов показывает, что при давлении пара в подъемных трубах менее 100 кгс/см^2 обеспечиваются достаточно надежные условия

их работы. С увеличением давления расширяется область ухудшенного теплообмена (вследствие перехода от пузырькового режима кипения к пленочному, срыва паровым потоком пристенного жидкого слоя и его выпаривания).

Режим работы обогреваемых подъемных труб может быть нарушен срывами в работе опускных труб данного контура. Нормальное поступление воды в опускные трубы может нарушаться при появлении в них пара (например, в результате образования вихревых воронок во входных сечениях, сносе пара водой из барабана или закипания воды в опускных трубах).

Вихревые воронки отсутствуют над входными сечениями опускных труб при достаточной величине столба воды над этими сечениями, минимально допустимая величина которой зависит от диаметра труб и скорости воды в них.

В котлах с принудительной циркуляцией при неравномерном обогреве змеевиков в них образуются различные количества пара, хотя потеря напора может быть одинаковой. Исследования показали, что величину всех изменений сопротивления, вызванных неравномерностью обогрева змеевиков, можно ослабить, сделав гидравлическую характеристику более устойчивой путем значительного увеличения сопротивления входа в змеевики. Тогда все изменения сопротивления будут очень малы относительно общего сопротивления и будут мало на него влиять. Практически этого достигают установкой на входе в змеевики дроссельных шайб.

Большое влияние на надежность циркуляции оказывает скорость падения давления, определяемая скоростью увеличения нагрузки по пару при работающих форсунках. В этих случаях падение давления пара в котле может вызвать парообразование в опускных трубах. Кипение воды в опускных трубах увеличивает гидравлическое сопротивление контура, и в слабообогреваемых подъемных трубах этого контура может возникнуть застой или опрокидывание циркуляции. Резкое увеличение нагрузки по пару категорически запрещается Правилами [10], так как, помимо нарушения циркуляции, это может повлечь за собой вскипание воды и выброс ее в пароперегреватель.

Циркуляция в водотрубных котлах достаточно надежна для всех типов котлов, установленных на судах при всех режимах работы. Во избежание местных нарушений циркуляции, приводящих к поломкам труб, нельзя допускать:

значительных отложений (зашлакования) на всех испарительных трубах, работающих в газоходе с температурой газов свыше 500°C ;

отложений солей на внутренних стенках труб;
резких изменений давления пара в котле.

Необходимо поддерживать:

в полной исправности внутриварабанные и сепарационные устройства;

уровень воды в котле между НУВ и РУВ при качке судна.

Эксплуатация огнетрубных котлов отличается малой интенсивностью циркуляции в нижней части барабанов. Действительно, наблюдения показывают, что при работе огнетрубного котла с полной нагрузкой разница между температурами стенок нижней и верхней частей его барабана составляет 5—15°С и увеличивается до 50—70°С по мере снижения нагрузки. Аналогичное явление возникает при растопке котла: температура нижней части барабана, как правило, оказывается ниже на 60—70°С температуры верхней его части и выравнивается весьма медленно. Это, безусловно, вызывает увеличение термических напряжений в элементах котла и требует его медленной растопки (или остановки) во избежание расстройств вальцованных соединений.

Наиболее простым и давно известным способом снижения разности температур воды между нижней и верхней частями барабана при растопке котла является продувка на $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{2}$ уровня по водоуказательному стеклу. В этом случае перед началом растопки котел заполняют водой до нижнего среза верхней части водоуказательного прибора.

При уменьшении нагрузки огнетрубного котла следует выключать первыми форсунки крайних топок и включать первыми форсунки средних (или средней в трехтопочном котле) топок, что улучшает прогрев воды в нижней части котла.

Глава XIV. ПРОЧНОСТЬ КОТЛОВ

§ 47. Материалы для ремонта и постройки

Прочность имеет важнейшее значение для безопасности эксплуатации не только самого котла, но и всего судна. Известны случаи, когда суда терпели бедствие при выходе из строя одного из двух котлов.

Прочность котла зависит как от соблюдения правил эксплуатации, так и от выполнения определенных требований при его постройке и ремонте, правильного выбора материала, технологии изготовления и т. д.

Части корпуса и детали котла испытывают значительные механические напряжения под воздействием сил давления пара, поэтому материал котла должен обладать большой прочностью.

Детали котла подвержены также воздействию высоких температур (температура стенок и труб доходит до 300°С, а у пароперегревателей — до 450—500°С и выше). Следовательно, материал котла должен сохранять достаточную механическую прочность и при высоких температурах.

Под влиянием тепловых и механических нагрузок в деталях котла могут возникнуть местные напряжения, значительно превышающие средние значения. Чтобы детали не разрушались, материал должен быть пластичным, т. е. обладать достаточным относительным удлинением. Кроме того, отдельные детали котла под-

вергаются ударным нагрузкам (при продувке котла, быстром перекрытии клапанов и т. д.). Следовательно, материал должен обладать высокой ударной вязкостью.

Материал котла в процессе эксплуатации подвергается совместному действию воды (содержащей растворенные соли), пара и дымовых газов при высокой температуре, поэтому он должен обладать достаточной стойкостью против термического и химического воздействий. Наконец, материал должен быть дешевым, легко обрабатываемым и хорошо свариваемым.

Большинству перечисленных условий удовлетворяют малоуглеродистые качественные мартеновские стали и в отдельных случаях легированные стали.

Примерный характер изменения основных механических характеристик малоуглеродистых сталей в зависимости от температуры представлен на рис. 119 (σ_B — предел прочности; σ_T — предел текучести; σ_p — допускаемое напряжение на разрыв).

Все материалы, идущие на ремонт или изготовление котла, должны удовлетворять правилам Регистра СССР (в других странах — правилам соответствующих классификационных обществ). Регистр СССР предъявляет следующие основные требования к котельной стали:

временное сопротивление разрыву σ_B при $t=20^\circ\text{C}$ должно быть 40—47 кгс/мм² (не менее 38 кгс/мм² для корпуса котла и не менее 36 кгс/мм² для труб);

относительное удлинение нормального образца $\delta \geq 18\text{—}22\%$ (повышенные значения относятся к трубам);

ударная вязкость a_H при температуре, до 200°C не менее 6—8 кгс/см²;

содержание углерода не более 0,24% (при бльших значениях ухудшается свариваемость сталей).

Малоуглеродистые стали можно применять при рабочей температуре детали не выше 430°C . При более высоких температурах используют легированные стали или специальные сплавы.

Требования Регистра в основном сводятся к определению минимально допустимых механических характеристик σ_B , δ и a_H при качественно однородной структуре хорошо раскисленной стали мартеновской плавки. Отдельные виды проката (листы, трубы), поковки и литые подвергают технологическим испытаниям на изгиб, сплющивание, раздачу концов труб и т. д., а также гидравлическим испытаниям.

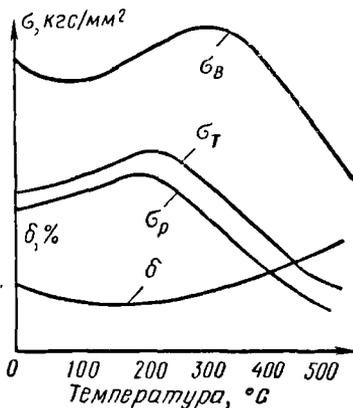


Рис. 119. Изменение механических характеристик малоуглеродистой стали в зависимости от температуры; σ_p — предел пропорциональности; σ_T — предел текучести

Малоуглеродистая сталь в процессе изготовления или эксплуатации котла иногда приобретает отрицательные свойства, которые могут явиться причиной аварии: наклеп, старение, ползучесть, хрупкость, усталость, коррозия, эрозия и т. п.

Наклеп — это изменение свойств и структуры металла под влиянием пластической деформации и температуры ниже температуры рекристаллизации (т. е. для малоуглеродистой стали $t \leq \leq 650—700^\circ\text{C}$). В результате наклепа увеличивается временное сопротивление разрыву, но резко падают относительное удлинение и ударная вязкость, металл становится хрупким. Наклеп может возникнуть при постройке или ремонте котла. Он опасен не только из-за снижения механических характеристик α и δ , но также из-за усиленной коррозии и ускорения процесса старения наклепанных зон.

Старением называется изменение свойств металла вследствие распада твердых растворов железа с углеродом, кислородом и азотом (так называемое дисперсионное твердение). Старение после наклепа (механическое старение) выражается в том, что наклепанный металл приобретает склонность к дальнейшему падению вязкости.

При низких температурах (до 100°C) старение нарастает медленно, но быстро прогрессирует при температуре $200—300^\circ\text{C}$ (искусственное старение). Следовательно, старение после наклепа особенно опасно для деталей котлов. Стали с содержанием углерода выше $0,18\%$ почти не подвергаются старению, поэтому их применяют при постройке и ремонте котла.

Дисперсионное твердение бывает после нагрева и охлаждения стали. При изготовлении, ремонте и эксплуатации котла деталь может нагреваться до $500—600^\circ\text{C}$, а затем быстро охладиться и работать при $200—300^\circ\text{C}$. При этом в результате дисперсионного твердения (т. е. выделения из пересыщенного твердого раствора углерода, кислорода и азота) резко падает вязкость стали. Твердение объясняется различной растворимостью углерода, составляющей при 700°C около $0,04\%$ и при 20°C — $0,006\%$. Для того чтобы избежать старения при нагреве, рекомендуется производить высокий отжиг после изготовления детали и избегать местных перегревов при эксплуатации котла.

Ползучестью называется непрерывное нарастание остаточных деформаций при напряжениях, меньших предела упругости. Такой дефект особенно заметно проявляется при температуре свыше 400°C . В результате ползучести вытягиваются шпильки и болты, уменьшается толщина стенок труб и т. д.

Скорость ползучести, соответствующая 10^{-7} мм/мм·ч, принята в СССР за предельно допустимую (для элементов котлоагрегата).

Ползучесть особенно характерна для малоуглеродистой стали (при температуре $400—500^\circ\text{C}$ скорость ползучести возрастает примерно вдвое с повышением температуры на $10—12^\circ\text{C}$).

Тепловая хрупкость появляется в случае длительной работы некоторых сталей (например, легированных сталей с при-

садками Ni, Cr и Mn) при температуре 400—500° С. Присадки Mo, W, V способствуют устойчивости стали против тепловой хрупкости.

Особенно склонны к тепловой хрупкости хромоникелевые легированные стали, поэтому для крепежа и других неохлаждаемых водой и паром деталей (например, подвесок пароперегревателей) применяют хромомолибденовые, хромовольфрамовые и хромомолибденованадиевые легированные стали.

Каустическая хрупкость заключается в резком снижении ударной вязкости вследствие развития мелких волосяных трещин, возникающих под действием щелочных солей высокой концентрации. Концентрация щелочей резко увеличивается в тех местах, где в результате небольшой течи котловая вода «упаривается». При сварных соединениях появление щелочной хрупкости почти исключено.

Усталостью называется потеря металлом прочности под действием многократных повторно-переменных нагрузок. Величина предела усталости, т. е. наибольшее напряжение, которое допускает образец при определенном числе циклов переменной нагрузки, во многом зависит от состояния поверхности (наличия зазубрин, рисок, вмятин). В котлостроении усталость металла наблюдается редко.

Следует отметить, что усталость не связана с «возрастом» металла, т. е. продолжительностью работы детали. Опыт показывает, что котлы при нормальных условиях эксплуатации имеют вполне удовлетворительные характеристики металла, несмотря на 40—50-летнюю работу. Между тем при нарушении циркуляции в трубах котла и переменных термических напряжениях наблюдались разрушения в течение короткого времени.

Коррозией называется разрушение металла под действием химических и электрохимических процессов. Котел подвергается действию газовой, пароводяной и водяной коррозии (см. гл. XI).

Эрозия — это механическое разрушение металла частицами воды в паре. Большая скорость насыщенного пара может привести к «паровой» эрозии, особенно в местах сужения потока (дрессельных шайбах, клапанах и т. д.). Паровая эрозия возникает иногда при образовании трещины в трубе. Вытекающий из нее с большой скоростью пар быстро разрушает соседние трубы.

Отмеченные дефекты не позволяют использовать даже качественную малоуглеродистую сталь при температуре свыше 430° С. В этих случаях применяют легированные стали. Присадка молибдена повышает прочность и антикоррозийность стали, никеля — вязкость и коррозионную стойкость, алюминия — жароупорность, ванадия — вязкость, титана — жаро- и кислотоупорность, прочность, вязкость и т. д.

Механические свойства и химический состав малоуглеродистых и специальных легированных сталей регламентируются соответствующими ГОСТами или техническими условиями (ТУ) заводо-поставщиков. Размеры заготовок (листа, труб, прутка) соответствуют ГОСТам на сортамент.

К котельной стали предъявляют также дополнительные требования (отсутствие внутренних дефектов, равномерность структуры, чистота поверхности, сохранение определенных свойств при указанных температурах и т. д.).

Горячекатаная и кованая сортовая сталь марок 10, 20, 20П и т. п. поставляется по ГОСТ 1050—60, который предусматривает две подгруппы (группа II — стали с повышенным содержанием марганца марок 15Г, 20Г и т. д.).

Котельные стали марок 15К, 20К, 22К и т. д., регламентируемые ГОСТ 5520—69, являются основными для ремонта и постройки котлов. Для изготовления котлов высокого давления (барabanов, днищ, коллекторов) применяют сталь 22К или среднемарганцовистую сталь 24Г2.

Общие технические требования к стальным бесшовным трубам также регламентируются ГОСТами.

ГОСТ на сортамент устанавливает браковочные характеристики для труб в виде допускаемых отклонений по наружному диаметру и толщине δ стенки. Например, при диаметре труб до 50 мм отклонения по диаметру допускаются в пределах $\pm 0,35$ мм. Механические свойства материала труб и виды испытаний также регламентируются соответствующими ГОСТами.

Легированные стали, широко применяющиеся в современном котлостроении, разделяются на низколегированные (при общем содержании легирующих элементов менее 2,5%), среднелегированные (2,5—10%) и высоколегированные (более 10%).

По характеру структуры легированные стали делятся на четыре класса: ферритный, перлитный, мартенситный и аустенитный.

Большинство низколегированных котельных сталей относится к перлитному классу (12ХМ, 12Х1МФ и др.). Основным легирующим элементом этих сталей является молибден.

Высокохромистые стали, как правило, относятся к ферритному классу. Ферритные и аустенитные стали наиболее дороги.

Для паропроводов высокого давления и труб пароперегревателей применяют высоколегированную сталь Х18Н10Т. Для опор и подвесок труб пароперегревателей применяют жаростойкие стали, содержащие, например, 25% хрома, 20% никеля и 3% ванадия. Такие стали выдерживают длительную работу под нагрузкой при температуре газов 950—980°С (при содержании в золе мазута ванадия их стойкость значительно снижается).

Допускаемые напряжения $\sigma_{\text{доп}}$ (кгс/мм²) при расчетах на прочность определяют по формуле вида

$$\sigma_{\text{доп}} = y \sigma_{\text{доп}}^*$$

где y — коэффициент, зависящий от типа конструкции и условий ее работы;

$\sigma_{\text{доп}}^*$ — установленное допускаемое напряжение для данного материала и элемента котла.

§ 48. Расчеты на прочность

Цель расчета на прочность — установить минимальные размеры элементов котла при заданных условиях эксплуатации и сроке службы или определить допускаемое рабочее давление пара при известных конструктивных элементах и материале котла.

В начальный период развития котлостроения размеры основных деталей котла (корпуса, труб, связей) определяли исключительно на основании опытных данных. По мере накопления опыта создались предпосылки для постройки котлов более высокого давления. Данные эксплуатации позволили установить наименьшие и вместе с тем надежные величины коэффициентов запаса прочности, при которых работа котла не вызывает опасений.

Размеры основных деталей котла или величина наибольшего допускаемого рабочего давления регламентируются расчетными формулами Регистра СССР, помещенными в «Правилах классификации и постройки морских судов». Эти Правила применимы для расчета всех огнетрубных котлов с рабочим давлением пара до 22 кгс/см² и всех деталей водотрубных котлов с расчетной рабочей температурой стенки до 500°С. При более высокой температуре расчет элементов на прочность подлежит особому рассмотрению Регистра СССР.

При температуре детали выше 400°С требуется также расчет детали по пределу ползучести $\sigma_{\text{п}}$ (кгс/см²). Эти требования вытекают из свойств основных котлостроительных материалов.

Таким образом, для определения методики расчета необходимо в первую очередь знать рабочую температуру для данной детали котла.

Расчетную температуру стенки принимают, в соответствии с Правилами Регистра СССР, равной наивысшей температуре нагреваемой воды с добавлением величины Δt , зависящей от условий эксплуатации. Температуру труб и коллекторов, защищенных от непосредственного действия лучистого тепла, принимают: $t = t_{\text{ср}} + 30^\circ\text{С}$, а труб, подверженных этому действию, $t_{\text{ср}} + 50^\circ\text{С}$ (где $t_{\text{ср}}$ — наибольшая температура нагреваемой среды, °С). Температуру стенки всех трубопроводов считают равной температуре протекающего в ней рабочего агента (пар, вода и т. д.).

В соответствии с установленной рабочей температурой детали и условиями эксплуатации выбирают материал для изготовления и рассчитывают его на прочность по минимальному значению допускаемого напряжения:

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{\sigma_{\text{в}}}{n},$$

где $\sigma_{\text{в}}$ — предел прочности при $t = 20^\circ\text{С}$;

n — коэффициент запаса прочности.

В тех случаях, когда температура стенки выше 220°С и ниже 350°С,

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{\sigma_{\text{т}}}{n},$$

где $\sigma_{\text{т}}$ — предел текучести при рабочей температуре детали.

При более высоких температурах

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{\sigma_{\text{п}}}{n},$$

где $\sigma_{\text{п}}$ — предел ползучести при рабочей температуре детали.

Коэффициенты запаса прочности устанавливают в зависимости от назначения детали и ее конструкции.

Марки детали по установленной категории Регистра СССР можно принимать в соответствии с рекомендациями, приведенными в § 47. Основные указания Регистра по расчету на прочность элементов водотрубных котлов сводятся к следующим.

1. Все сварные соединения должны быть выполнены встык с одно- или двусторонней разделкой кромок и рассчитаны по формуле

$$P \leq hl\sigma_{\text{доп}}\varphi,$$

где P — сила, действующая на сварной шов в плоскости соединенных элементов, перпендикулярно шву, кгс;

h — высота шва, равная наименьшей толщине соединяемых листов, мм;

l — длина шва, мм;

$\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение, зависящее от температуры стенки, кгс/мм²;

φ — коэффициент прочности шва (для стыковых швов 0,95).

Допускаются вырезы в корпусе котла при условии, что диаметр отверстия не превышает $2,5\delta + 70$ мм. Все остальные вырезы должны иметь подкрепления, причем прочность подкрепления должна быть не меньше прочности целого листа.

2. Толщина стенки s (мм) барабанов или цилиндрических коллекторов должна быть не менее определенной по формуле

$$s = \frac{D_{\text{в}}P}{200\sigma_{\text{доп}}\varphi - p} + 1,$$

где $D_{\text{в}}$ — внутренний диаметр барабана или коллектора, мм;

p — расчетное давление, кгс/см².

Напряжение $\sigma_{\text{доп}}$ определяют по п. 1. Коэффициент φ для ослабленного отверстия сечения принимают по п. 1, а для трубных решеток и других ослабленных вырезами сечений — по наименьшему значению φ_1 или φ_2 , но не менее 0,3:

$$\varphi_1 = \frac{t-d}{t};$$

$$\varphi_2 = \frac{t_{\text{к}} - d}{t_{\text{к}}} \cdot \frac{1 + m^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{m^2}{2}\right) + m^2}}.$$

Здесь

$$t_{\text{к}} = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{\left(\frac{t}{2}\right)^2 + \left(\frac{t_1}{2}\right)^2}; \quad m = \frac{t_1}{t}.$$

Элементы t , t_1 , $t_{\text{к}}$, d , a , b определяют по рис. 19.

3. Толщина стенок труб пароперегревателя, экономайзера и водогрейных при диаметре свыше 28 мм должна быть не менее 2,5 мм.

Толщину стенки труб любого диаметра определяют по той же формуле, что и толщину стенки барабанов с расчетами по пределу текучести и по пределу ползучести в зависимости от расчетной температуры.

Пример. Для водотрубного котла, работающего при давлении пара 48 кгс/см², наружный диаметр испарительных труб первого пучка составляет 51 мм. Ряд труб этого пучка необходимо заменить. В распоряжении имеются трубы требуемого диаметра, изготовленные из стали Ст. 10, но с толщиной стенки, отличной от установленных, и равной 3 мм. Предел прочности материала труб согласно сертификату составляет $\sigma_b = 36$ кгс/мм². Необходимо решить вопрос о возможности постановки таких труб в котел.

Рабочая температура стенки водогрейных труб по требованиям Регистра СССР:

$$t_{ст} = t_s + 50.$$

Температура насыщения t_s при давлении 48 кгс/см² составляет 256°. Следовательно,

$$t_{ст} = 256 + 50 = 306^\circ \text{С}.$$

Минимальную толщину стенки трубы можно определить по формуле для определения s , принимая добавку на коррозию 1 мм.

Коэффициент $\phi = 1$ (см. п. 1), так как трубы не имеют сварных швов и отверстий.

Рабочая температура стенки превышает 220°С, но менее 400°С, поэтому величину $\sigma_{доп}$ определяют с учетом предела текучести:

$$\sigma_{доп} = \frac{\sigma_T}{n}.$$

Для стали Ст. 10 величина δ_T при $t \approx 350^\circ \text{С}$ равна 12,5 кгс/мм², а коэффициент запаса n по Правилам Регистра составляет 1,7. Поэтому

$$\sigma_{доп} = \frac{12,5}{1,7} = 7,35 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$\delta \geq \frac{48 \times 45}{200 \times 7,35 - 48} < 2,5 \text{ мм},$$

т. е. имеющиеся в распоряжении трубы можно установить в котле.

Глава XV. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС

§ 49. Уравнение теплового баланса

Для анализа работы котельного агрегата необходимо знать его тепловой баланс, т. е. соотношение между приходом и расходом тепла. Сопротивление приходной и расходной частей энергии, выраженное в тепловых единицах, позволяет не только оценить работу действующего котла, но и наметить пути ее улучшения, полнее использовать внутренние резервы для повышения производительности или к. п. д.

Тепловой баланс определяют путем проведения теплотехнических (балансовых) испытаний котла (см. гл. XVI). Тепловой баланс можно отнести к 1 ч работы котла или 1 кг израсходованного топлива.

Приход тепла (в ккал/ч) при установившемся режиме работы парового котла будет состоять из следующих величин:

BQ_n^p — количество тепла, заключенное в B кг топлива при его низшей теплоте сгорания Q_n^p ккал/кг;

$BQ_{x.в}$ — количество тепла, внесенное в топку парового котла холодным воздухом;

$BQ_{ф.т}$ — количество тепла, внесенное в топку с физическим теплом самого топлива.

Таким образом, полное количество внесенного тепла равно $B(Q_n^p + Q_{x.в} + Q_{ф.т})$.

Величина $Q_{x.в}$ характеризует тепло, вносимое в топку холодным (неподогретым) воздухом, отнесенное к 1 кг топлива:

$$Q_{x.в} = c_v t_{x.в} V_a,$$

где c_v — удельная теплоемкость воздуха при температуре $t_{x.в}$, ккал/н.м³·°С;

$t_{x.в}$ — температура холодного воздуха, поступающего в воздухоподогреватель котла или, при отсутствии подогрева воздуха, непосредственно в топку, °С;

V_a — фактическое количество воздуха, подаваемого в топку на 1 кг топлива, н.м³/кг.

Величина $Q_{ф.т}$ выражает физическое тепло 1 кг топлива:

$$Q_{ф.т} = c_t t_t,$$

где c_t — удельная теплоемкость топлива (при температуре t_t), ккал/кг·°С;

t_t — температура поступающего в топку топлива, °С.

При особо точных испытаниях следует определить еще и приход тепла с паром, поступающим в топку при работе паромеханических форсунок.

Расход тепла в килокалориях за 1 ч работы котла будет равен:

$$Q_1 = D_{п.п} (i_{п.п} - i_{п.в}) + D_{охл} (i_{охл} - i_{п.в}) + D_{нас} (i_x - i_{п.в}), \quad (55)$$

т. е. полезному количеству тепла, заключенному в перегретом, охлажденном и насыщенном паре, который выдает котел при соответствующей энтальпии $i_{п.п}$, $i_{охл}$, i_x и $i_{п.в}$ (ккал/кг) перегретого, охлажденного, насыщенного пара и питательной воды и сумме всех тепловых потерь $\Sigma Q_{пот}$.

У современных главных котлов, не производящих насыщенный пар, третье слагаемое (55) отсутствует. Наоборот, в расходной части теплового баланса вспомогательных и утилизационных котлов могут отсутствовать два первых слагаемых.

Таким образом, расходную часть теплового баланса котла можно записать в виде

$$Q_1 + \Sigma Q_{\text{пот.}}$$

Потери тепла принято рассматривать по отдельным составляющим. Сумма $\Sigma Q_{\text{пот}}$ состоит из следующих величин потери тепла (в ккал/ч):

Q_2 — с уходящими газами;

Q_3 — от химической неполноты горения топлива в топке;

Q_4 — наружными стенками котла в окружающую среду.

Суммарное теплосодержание уходящих газов, покидающих котел за 1 ч его работы, можно определить по уравнению

$$Q'_2 = B \Sigma V \bar{c} t_{\text{yx}}, \quad (56)$$

где $\Sigma V \bar{c} t_{\text{yx}}$ — энтальпия продуктов горения 1 кг топлива с объемом V н.м³/кг, теплоемкостью \bar{c} ккал/н.м³.°С при температуре t_{yx} °С.

Однако всю величину Q'_2 нельзя считать потерей тепла. Для определения действительной потери тепла с уходящими газами необходимо вычесть из величины Q'_2 «бесплатное» тепло, вносимое в топку холодным воздухом $BQ_{\text{x. в}}$ и физическое тепло топлива $BQ_{\text{ф. т}}$.

Приравнявая приход и расход тепла, получим выражение (в ккал/ч) для теплового баланса котла:

$$B(Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{x. в}} + Q_{\text{ф. т}}) = Q_1 + \Sigma Q_{\text{пот.}} \quad (57)$$

Выразим $\Sigma Q_{\text{пот}}$ через Q'_2 , Q_3 и Q_5 и перенесем величины $BQ_{\text{x. в}}$ и $BQ_{\text{ф. т}}$ в правую часть уравнения. Тогда получим:

$$BQ_{\text{н}}^{\text{р}} = Q_1 + Q'_2 - BQ_{\text{x. в}} - BQ_{\text{ф. т}} + Q_3 + Q_5. \quad (58)$$

Обозначив потерю тепла с уходящими газами

$$Q_2 = Q'_2 - BQ_{\text{x. в}} - BQ_{\text{ф. т}}, \quad (59)$$

окончательно получим:

$$BQ_{\text{н}}^{\text{р}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_5. \quad (60)$$

Выражение (60) является основным уравнением теплового баланса котла¹.

Разделив все члены уравнения на приходную часть баланса, получим:

$$1 = \frac{Q_1}{BQ_{\text{н}}^{\text{р}}} + \frac{Q_2 + Q_3 + Q_5}{BQ_{\text{н}}^{\text{р}}}. \quad (61)$$

Первый член в правой части уравнения представляет собой к. п. д. котла, а второй — потери тепла, отнесенные к теплоте сгорания 1 кг топлива.

¹ При сжигании твердых топлив в правую часть уравнения входит также потеря Q_4 от механической неполноты горения.

Коэффициентом полезного действия котла называется отношение его часовой теплопроизводительности к количеству тепла, заключенному в сожженном за этот же промежуток времени количестве топлива.

Таким образом,

$$\eta_{\text{к}} = \frac{Q_1}{BQ_{\text{н}}^{\text{п}}} \quad (62)$$

или, подставляя значение Q_1 ,

$$\eta_{\text{к}} = \frac{D_{\text{п.п}}(t_{\text{п.п}} - t_{\text{п.в}}) + D_{\text{охл}}(t_{\text{охл}} - t_{\text{п.в}}) + D_{\text{нас}}(t_{\text{x}} - t_{\text{п.в}})}{BQ_{\text{н}}^{\text{п}}} \quad (63)$$

Это уравнение является общим выражением для к. п. д. котла по прямому балансу.

Потери тепла принято определять в процентах от теплоты сгорания, т. е. уравнение (61) можно записать в виде

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_5, \quad (64)$$

где $q_1 = \eta_{\text{к}} 100$ — к. п. д. котла, %;

q_2, q_3, q_5 — потери тепла (в процентах) соответственно с уходящими газами, от химического недожога, в окружающую среду;

$$q_2 = \frac{Q_2}{BQ_{\text{н}}^{\text{п}}} = \frac{\Sigma V \bar{c} t_{\text{yx}} - \bar{c}_{\text{в}} t_{\text{x.в}} V_{\alpha} - \bar{c}_{\text{г}} t_{\text{г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}} \cdot 100; \quad (65)$$

$$q_3 = \frac{Q_3}{BQ_{\text{н}}^{\text{п}}} 100; \quad (66)$$

$$q_5 = \frac{Q_5}{BQ_{\text{н}}^{\text{п}}} 100. \quad (67)$$

Из уравнения (64) можно определить величину к. п. д. η (%) котла по обратному балансу, т. е.

$$\eta_{\text{к}} = 100 - \Sigma Q_{\text{пот}} = 100 - q_2 - q_3 - q_5. \quad (68)$$

Это уравнение имеет большое значение для теплотехнических испытаний котла, при которых определяют $\eta_{\text{к}}$ и величины потерь тепла $\Sigma Q_{\text{пот}}$.

Для определения потери тепла с уходящими газами необходимо в выражении (65) заменить величину $\Sigma V \bar{c}$ (ккал/кг $^{\circ}$ С) ее значением, вычисленным по анализу газов (см. гл. IV), т. е.

$$\Sigma V \bar{c} = V_{\text{с.г}} \bar{c}_{\text{с.г}} + V_{\text{H}_2\text{O}} \bar{c}_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (69)$$

Величины $V_{\text{с.г}}$ и $V_{\text{H}_2\text{O}}$ определяют по формулам гл. IV. Среднюю удельную теплоемкость сухих газов $\bar{c}_{\text{с.г}}$ (ккал/н.м 3 · $^{\circ}$ С), входящую в выражение $\Sigma V \bar{c}$, можно определить по средней тепло-

емкости основных составляющих газов при их температуре, т. е. в виде

$$\bar{c}_{с.г} = \frac{V_{RO_2} \bar{c}_{RO_2} + V_{CO} \bar{c}_{CO} + V_{O_2} \bar{c}_{O_2} + V_{N_2} \bar{c}_{N_2}}{V_{с.г}}, \quad (70)$$

где \bar{c}_{RO_2} , \bar{c}_{CO} , \bar{c}_{O_2} , \bar{c}_{N_2} — средние удельные теплоемкости RO_2 , CO , O_2 и N_2 при $t = t_{yx}$, определяемые по специальным таблицам (приложение II).

При приближенных расчетах можно принять

$$\bar{c}_{с.г} \approx 0,323 + 0,000018 t_{yx}. \quad (71)$$

Величину \bar{c}_{H_2O} для водяных паров также можно определить по таблицам приложения II или приближенно: $\bar{c}_{H_2O} \approx 0,37$ ккал/н.м³·°C. Тогда

$$\Sigma V \bar{c} \approx 0,32 V_{с.г} + 0,37 V_{H_2O}, \quad (72)$$

где $\bar{c}_{с.г}$ принята равной 0,32.

При этих допущениях расчеты можно еще более упростить, причем выражение для q_2 (в процентах) примет вид:

$$q_2 \approx \frac{0,32 V_{с.г} + 0,37 V_{H_2O} (t_{yx} - t_{x.в})}{Q_H^p} 100. \quad (73)$$

Этим выражением пользуются для так называемых прикидочных расчетов при испытаниях котлов. Величина $Q_{ф.т}$ здесь не учитывается.

Потеря тепла q_3 от химической неполноты горения (химического недожога) является результатом содержания в уходящих газах продукта неполного горения углерода (окси углерода CO) и не успевших сгореть в котле горючих газов водорода H_2 и летучих типа $C_n H_m$. Величину этой потери (в процентах) можно определить по формуле

$$q_3 = \frac{V_{CO} Q_{CO} + V_{H_2} Q_{H_2} + V_{C_n H_m} Q_{C_n H_m}}{Q_H^p} 100, \quad (74)$$

где объемы газов V_{CO} , V_{H_2} , $V_{C_n H_m}$ определяют по газовому анализу (см. гл. IV), а теплоту сгорания 1 н.м³ Q_{CO} , Q_{H_2} , $Q_{C_n H_m}$ данного газа находят по справочным таблицам.

Если анализ газов на судах производят обычным прибором Орса́, то величину q_3 определяют с учетом только CO , т. е.

$$q_3 = \frac{V_{CO} Q_{CO}}{Q_H^p} 100\% = \frac{CO V_{с.г} Q_{CO}}{Q_H^p}, \quad (75)$$

где CO — процентное содержание окиси углерода в дымовых газах, определяемое по газовому анализу.

При ориентировочных расчетах, считая, что потеря от химического недожога происходит только вследствие содержания СО в уходящих газах, принимают $Q_{CO}=3050$ ккал/н.м³; объем V_{CO} н.м³/кг можно определить из формул, приведенных в гл. IV. Подстановка V_{CO} и Q_{CO} в формулу дает возможность оценить величину q_3 .

Потерю q_5 во внешнюю среду обычно включают в остаточный член баланса при испытаниях.

При расчетах принимают $q_5=0,8-2\%$ для главных судовых котлов и $q_5=2-5\%$ — для небольших вспомогательных.

Величина тепловых потерь, так же как и к. п. д., определяет одну из основных характеристик котла — экономичность работы. При эксплуатации необходимо добиваться наивысшей экономичности работы, т. е. максимального к. п. д., а следовательно, минимальных тепловых потерь q_2 , q_3 и q_5 .

Потеря тепла q_2 с уходящими газами — одна из основных тепловых потерь. Величина q_2 зависит от системы котла и его конструктивных особенностей: развития поверхности нагрева по ходу газов и размеров хвостовых поверхностей нагрева — экономайзеров и воздухоподогревателей.

С увеличением температуры уходящих газов и коэффициента избытка воздуха величина потери с уходящими газами растет, так как увеличивается температура уходящих газов или их объем.

Судовые котлы часто работают с излишне высоким коэффициентом избытка воздуха, уменьшение которого дает возможность снизить потерю q_2 . Наименьшие потери тепла с уходящими газами наблюдаются при автоматическом регулировании горения с поддержанием заданного наивыгоднейшего соотношения между топливом и воздухом.

При загрязнении поверхности нагрева сажей и накипью ухудшается теплопередача, что вызывает рост температуры уходящих газов и, следовательно, величины q_2 .

Из сказанного ясно, что экономичность работы котельной установки во многом зависит от котельного машиниста. Судовой механик должен контролировать полноту горения топлива путем периодических анализов уходящих газов или по показаниям автоматических газоанализаторов и приборов, измеряющих температуру уходящих газов.

В современных котлах с развитой поверхностью нагрева воздухоподогревателей и экономайзеров температура уходящих газов $t_{yx}=110-160^\circ\text{C}$, что примерно соответствует $q_2=3-7\%$. В огнетрубных котлах t_{yx} нередко доходила до $300-350^\circ\text{C}$, а q_2 — до $20-25\%$.

Потеря тепла от химической неполноты горения теоретически полностью устранима. В мазутных топках водотрубных котлов возможно вести горение так, чтобы величина q_3 не превышала долей процента. Как правило, наивыгоднейший коэффициент избытка воздуха должен соответствовать минимуму суммы потерь q_2+q_3 .

Потеря тепла q_5 в окружающую среду происходит через наружные поверхности топочных фронтонов, барабанов, бочек и обшивки, которые при работе котла нагреты до температуры более высокой по сравнению с температурой окружающей среды. Абсолютная величина Q_5 этой потери зависит от качества и состояния изоляции, а относительная величина q_5 — от величины котла (для малых котлов q_5 больше). При увеличении нагрузки котла величина q_5 снижается, что следует из выражения

$$q_5 = \frac{Q_5}{BQ_H^P} 100. \quad (76)$$

При увеличении расхода топлива B (кг/ч), а следовательно, и знаменателя, Q_5 не увеличивается, так как давление в котле и температура его поверхности практически не изменяются. При весьма малых нагрузках потеря q_5 сильно растет, а при работе котла на режиме поддержки пара почти все тепло, выделенное в топке, расходуется на покрытие этой потери и на поддержание заданной температуры внутри котла.

Величины потерь теплового баланса и к. п. д. котельного агрегата зависят от его нагрузки. При малых нагрузках к. п. д. котла снижается вследствие увеличения потери тепла q_3 , %, от химического недожога (в результате низкой температуры в топке), а также вследствие увеличения относительной потери тепла q_5 , %, на внешнее охлаждение котла.

При нормальной нагрузке значение к. п. д. котла близко или равно наибольшему. При дальнейшем увеличении нагрузки потеря от химического недожога вновь увеличивается вследствие перегрузки топочного объема; растет и потеря с уходящими газами из-за повышения их температуры. В результате к. п. д. котла при форсировке уменьшается.

Наибольшее значение к. п. д. у разных котлов различно. Оно зависит от типа, системы и размеров котла, рода топлива, конструкции топочных устройств, расположения и размеров паробразующей поверхности нагрева, величины хвостовых поверхностей нагрева (экономайзеров и воздухоподогревателей), а также от условий эксплуатации и качества обслуживания (качества распыла топлива, величины коэффициента избытка воздуха, состояния поверхности нагрева и изоляции котла).

Небольшие водотрубные котлы старых систем, работающие на жидком топливе, имеют к. п. д. 80—85%, а современные котлы с развитой хвостовой поверхностью нагрева и автоматическим управлением горением жидкого топлива — 92—96%.

Изложенная методика составления теплового баланса и анализа потерь тепла пригодна для котлов, работающих на топливе.

Для проверки работы утилизационного котла составляют два уравнения.

Уравнение теплового баланса по газовой стороне:

$$Q = B(I_1 - I_2)\eta, \quad (77)$$

где Q — полезно использованное в котле тепло газов, ккал/ч;
 B — расход топлива на двигатель, кг/ч;
 I_1 и I_2 — энтальпия газов перед котлом и за ним; ккал/кг (топлива);
 η — коэффициент, учитывающий потерю тепла котлом во внешнюю среду (обычно $\eta = 0,96 \div 0,98$).

Уравнение теплового баланса по пароводяной стороне:

$$Q = D (i'' - i_{п.в}), \quad (78)$$

где D — паропроизводительность котла, кг/г;
 i'' и $i_{п.в}$ — энтальпия насыщенного пара и питательной воды, ккал/кг;

Величины I_1 и I_2 определяют по данным анализа выпускных газов двигателя и их температуре перед утилизационным котлом по формулам гл. IV и для приближенных расчетов — по формуле (72).

Из этих уравнений можно определить величину η , затем степень использования тепла выпускных газов в котле (условный к. п. д. утилизационного котла):

$$\eta_{кк} = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \quad (79)$$

или приближенно

$$\eta_{кк} = \frac{t_1 - t_2}{t_1},$$

где t_2 — температура выпускных газов, °С.

Величина $\eta_{кк}$ характеризует потери тепла в окружающую среду и с уходящими из котла газами. Основная потеря тепла (с уходящими газами) зависит от степени чистоты поверхности нагрева. При образовании накипи на водяной стороне поверхности нагрева и отложении сажи — на газовой растет t_2 и потеря тепла с уходящими газами.

§ 50. Основы теплового расчета

В практике расчета судовых котлов встречаются два типа задач.

1. Определение основных технико-экономических характеристик работы котла при заданном топливе. Эти характеристики необходимо знать при оценке качества эксплуатации и степени совершенства работы котла или при установке на судне нового котла, переводе котла с одного вида топлива на другое.

2. Определение наивыгоднейшей конструкции нового котла при заданных параметрах и паропроизводительности.

Методика расчетов зависит от поставленной задачи. Наиболее просто решается задача первого типа, которая представляет и наибольший практический интерес для судового механика. Осталь-

ные задачи несколько сложнее, но выполняются аналогичными расчетами.

В первом случае, помимо конструкции котла, необходимо знать следующие величины: род топлива; температуру топлива $t_{\text{т}}$, питательной воды $t_{\text{пв}}$, холодного воздуха $t_{\text{хв}}$; рабочее давление пара в котле p кгс/см²; паропроизводительность котла D кг/ч, в том числе перегретого $D_{\text{п.п}}$ и охлажденного $D_{\text{охл}}$ пара (либо насыщенного для вспомогательных и утилизационных котлов).

Соответствующим тепловым расчетом определяют к. п. д. η котла, расход топлива B , температуру уходящих газов $t_{\text{ух}}$ и перегретого пара $t_{\text{п.п}}$ при разных режимах работы котла.

Иногда приходится устанавливать котел без чертежей и других технических документов. В этом случае в первую очередь следует снять эскизы корпуса котла, пароперегревателя и экономайзера, затем вычертить общий вид котла и его узлов (в масштабе не менее 1:10), рассчитать его на прочность и представить эти материалы в Регистр СССР для согласования и определения наибольшего допускаемого рабочего давления пара.

Временное сопротивление материала отдельных деталей, которое необходимо знать для расчетов на прочность, определяют по результатам испытаний образцов, вырезанных из этих деталей.

После определения рабочего давления пара в котле, которое должно соответствовать наибольшему допускаемому для машины или турбины, приступают к проверочному тепловому расчету котла.

Наивыгоднейшую конструкцию нового котла с обязательным условием — надежностью эксплуатации (при всех режимах работы) разрабатывают специальные конструкторские бюро в соответствии с проектным заданием заказчика. Обычно в проектном задании указывают параметры пара, вид топлива, к. п. д. при номинальной нагрузке, паропроизводительность и наибольшую массу котла.

При проектировании прежде всего устанавливают тип котла, зависящий от типа судна и условий его эксплуатации, параметров пара, паропроизводительности и требуемого к. п. д. Затем по заданным к. п. д. и паропроизводительности котла определяют расход топлива, ориентировочно определяют размеры котла и величину его поверхности нагрева (для того, чтобы составить необходимый для дальнейших расчетов эскиз котла). По предварительному эскизу производят расчеты и уточняют размеры топки, расположение пароперегревателя, экономайзера и т. д., используя приведенные основные расчетные формулы и соотношения.

После ориентировочных расчетов отдельных узлов выполняют полный тепловой и аэродинамический расчеты котла на трех режимах его работы, соответствующих номинальной, максимальной и минимальной (стояночной) производительности. При этом может понадобиться дополнительная корректировка отдельных узлов. Если корректировка значительна, все расчеты приходится повторять, изменив эскиз котла.

При тепловом расчете парового котла решают две основные задачи: обеспечение наиболее полного сгорания топлива (т. е. перехода располагаемой химической энергии топлива в тепловую) и эффективное использование полученной тепловой энергии топочных газов. От степени совершенства этих процессов зависит и эффективность работы котла, т. е. его к. п. д.

Выше были рассмотрены условия, необходимые для полного сгорания топлива в топке и удаления продуктов горения из котла. В данном случае необходимо более подробно остановиться на условиях теплообмена в паровых котлах, т. е. на вопросах, связанных с передачей тепла от газов к воде и пару.

Если степень совершенства топочного процесса можно охарактеризовать величинами топочных потерь q_3 , q_4 , q_5^T и коэффициентом α избытка воздуха, то качество работы поверхностей нагрева можно оценить по величине потери тепла с уходящими газами q_2 и температуре уходящих газов $t_{ух}$.

Идеальными условиями для парового котла как теплообменного аппарата были бы такие, при которых все располагаемое тепло топлива Q_B^P (ккал/кг) было бы полностью, без потерь превращено в тепловую энергию водяного пара. Практически этого осуществить нельзя, так как температура уходящих газов в любом котле заведомо выше температуры конденсации влаги, получаемой при сгорании топлива. Поэтому к. п. д. котла определяют не по высшей, а по низшей величине теплоты сгорания топлива, т. е. по Q_H^P .

Однако и располагаемое количество тепла Q_H^P также полностью использовать не удастся. Даже в наиболее совершенных котельных агрегатах потери тепла в топке составляют 1—2%, а потери с уходящими газами — 3—5%.

Кроме основных показателей работы поверхностей нагрева котлоагрегата η_K , q_2 и $t_{ух}$, большое значение имеют и некоторые конструктивные характеристики. При проектировании и постройке стремятся добиться минимальных габаритов, массы и стоимости котла. Создание малогабаритных и легких конструкций в сочетании с высокой паропроизводительностью приводит к увеличению тепловой нагрузки (теплового напряжения) поверхностей нагрева котлоагрегата, которая характеризует интенсивность процесса передачи тепла. Современные судовые паровые котлы работают с высокими тепловыми напряжениями поверхностей нагрева, при этом срок службы котлов, как правило, превышает 15—20 лет.

Сочетание высоких экономичности и надежности работы современных котлоагрегатов с интенсивным теплообменом, обеспечивающим относительно малые габариты и массу, стало возможным после глубоких исследований и развития теории теплопередачи. Исключительные заслуги в этом деле принадлежат советским ученым В. И. Гриневецкому, М. В. Кирпичеву, Л. К. Рамзину и многим другим, а также коллективам научно-исследовательских ин-

ституты: Всесоюзного теплотехнического им. Ф. Э. Дзержинского и Центрального котлотурбинного им. И. И. Ползунова.

На основе современной теории теплопередачи и многочисленных экспериментов в СССР разработан нормативный метод теплового расчета котлоагрегатов и отдельных участков их поверхностей нагрева. Тепловой расчет позволяет заранее, еще в стадии проектирования определить все необходимые конструктивные элементы котла и построить его на заданные паропроизводительность и параметры пара или решить обратную задачу: по данным построенного котла определить основные характеристики его работы.

При тщательном выполнении тепловых расчетов полученные характеристики весьма близки фактическим (отклонения обычно составляют $\pm 2-3\%$ по к. п. д. и паропроизводительности). Это свидетельствует о достаточной для практики точности нормативного метода расчета.

Тепловой расчет используют также для исследования и оценки производительности и качества работы действующих котлов и их отдельных элементов.

Основой для теплового расчета котла служат закономерности, формулы и определения, известные из курса теплопередачи. Длительный опыт эксплуатации и испытаний котлов различных типов позволяет уточнить эти теоретические зависимости введением поправочных коэффициентов и использованием рекомендаций по применению различных формул теплопередачи в каждом отдельном случае.

Применение теоретических зависимостей в «чистом виде» при тепловых расчетах паровых котлов не всегда возможно из-за многообразия и сложности протекающих совместно процессов горения, теплообмена, переноса газов, частиц и т. п. На любом участке котлоагрегата происходит сложный теплообмен. Тепло от газов передается воде или пару одновременно излучением (радиацией), конвекцией и теплопроводностью (конвекцией). Соотношения же между количествами тепла, передаваемыми излучением и конвекцией, изменяются по длине газохода котла в зависимости от температуры газов. Например, экран 5 (рис. 120) воспринимает основное количество тепла излучением, роль которого еще значительна в передаче тепла от газов фестону испарительных труб 4 и пароперегревателю 3. В экономайзере 2 и воздухоподогревателе 1 основную роль будет играть уже конвективный теплообмен.

Топочные стены, окружающие топочное пространство, могут быть экранированы или неэкранированы. Общую поверхность топочных стен $F_{ст}$ (m^2) определяют обычным суммированием площадей всех поверхностей, окружающих топочное пространство. Например, для котла, представленного на рис. 120,

$$\begin{aligned} F_{ст} &= l_T b + Ab + b(h_1 + h_2) + 2l_T \frac{h_1 + h_2}{2} = \\ &= b(l_T + A + h_1 + h_2) + l_T(h_1 + h_2). \end{aligned}$$

Поверхности нагрева котла, расположенные в топочном пространстве, называют радиационными. Радиационные поверхности нагрева, размещенные на стенах топки, называются экранами (см. поз. 5 на рис. 120).

Полностью экранированной называют топку, если на всех ее стенках, за исключением пода, установлены радиационные поверхности нагрева.

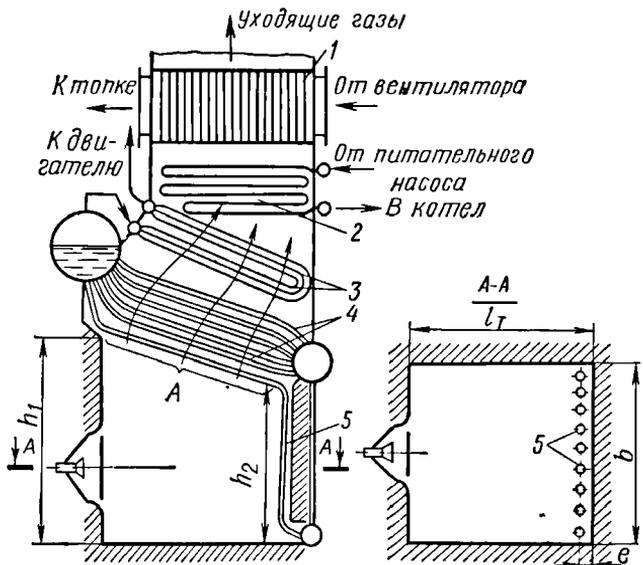


Рис. 120. Схема водотрубного котла

Радиационную поверхность H_p (м²) определяют как сумму всех поверхностей нагрева, расположенных в топочном пространстве и освещаемых тепловыми лучами, по формуле

$$H_p = \chi \Sigma F_{\text{пл}}, \quad (80)$$

где $\Sigma F_{\text{пл}}$ — суммарная площадь всех стен, на которых расположены радиационные поверхности, включая обращенную в топку поверхность первого пучка труб, м².

Величину $F_{\text{пл}}$ подсчитывают отдельно для каждой стены по формуле

$$F_{\text{пл}} = bl, \quad (81)$$

т. е. площадь $F_{\text{пл}}$ равна площади стены, на которой расположен пучок труб или экран с трубами длиной l и шириной b пучка (определяемой как расстояние между осями крайних труб экранов или пучка).

Угловой коэффициент χ в формуле представляет собой отношение количества тепла, воспринимаемого трубной поверхностью,

к количеству тепла, которое восприняла бы сплошная стальная стенка котла (за которой находится котловая вода) равной поверхности. Для многорядных и сплошных однорядных пучков и сплошных экранов водогрейных труб $\chi=1$. Для разреженных экранов и так называемых фестонов коэффициент вычисляют.

Степенью, или коэффициентом, экранирования топки называют отношение радиационной поверхности нагрева к полной поверхности всех стен топки, т. е.

$$\psi = \frac{H_p}{F_{ст}}. \quad (82)$$

Топочный объем V_T (m^3) определяют с помощью обычных геометрических соотношений по эскизу топочного пространства.

При расчете теплообмена в топке необходимо определить количество тепла Q_m , воспринятого радиационными поверхностями нагрева в топочном пространстве, за 1 ч работы котла. Это количество тепла (в ккал/ч) можно представить в виде разности полного количества тепла, выделенного в топке при сгорании топлива, и теплосодержания газов, покидающих топку, т. е.

$$Q_m = B \left(Q_H^p \frac{100 - q_3}{100} + Q_v + Q_{ф.т} \right) - B I_0, \quad (83)$$

где I_0 — теплосодержание газов, покидающих топку.

Если отнести все члены этого равенства к 1 кг топлива, что удобно для дальнейших расчетов, и обозначить

$$Q_p = \frac{Q_m}{B}, \quad (84)$$

то

$$Q_p = Q_T - \Sigma V \bar{c} t_0, \quad (85)$$

где Q_p — количество тепла, переданного в топке, ккал/кг;

Q_T — полезное тепловыделение в топке за вычетом тепловых потерь и с учетом физического тепла воздуха и топлива, ккал/кг.

$$Q_T = Q_H^p \frac{100 - q_3}{100} + Q_v + Q_{ф.т},$$

$\Sigma V \bar{c} t_0 = I_0$ — суммарное теплосодержание газов при выходе из топки, ккал/кг.

Отношение количества тепла, переданного в топке, к полезному тепловыделению называют коэффициентом прямой отдачи топки:

$$\mu = \frac{Q_p}{Q_T}. \quad (86)$$

Теоретической температурой горения t_T называют температуру, которую имели бы продукты горения, если бы все полезное тепло-выделение было затрачено на их нагревание:

$$t_T = \frac{Q_T}{\Sigma V c_{t_T}}. \quad (87)$$

Индекс t_T указывает, что при расчете величины $\Sigma V c$ удельные теплоемкости газов c необходимо брать из таблиц (приложение II) при температуре t_T °С.

Из уравнения (85) следует, что если речь идет о действующем котле, то определить величину Q_p относительно легко. Для этого необходимо замерить температуру t_0 газов при выходе из топки, т. е. перед конвективной поверхностью нагрева котла, и выполнить соответствующие подсчеты (определив одновременно топочные потери, род топлива и т. д.).

Однако задача значительно усложняется при проектировании новых котлов или их элементов. В этом случае в уравнении будут два неизвестных Q_p и t_0 , т. е. необходимо определить t_0 или μ , или Q_p из каких-то других уравнений.

Опыт показал, что теоретические уравнения теплообмена (например, Стефана — Больцмана) для этой цели непригодны, так как фактическая картина излучения факела намного сложнее. Поэтому еще недавно широко применяли чисто эмпирический путь решения задачи, т. е. формулы, содержащие зависимости Q_p от H_p и t_0 , выводили на основе сопоставления опытных данных по нескольким топкам одинаковой конструкции. К недостаткам этого метода следует отнести невозможность распространения его результатов на любую группу топок, не подвергавшуюся исследованиям.

Затем был разработан метод, соединяющий в себе применение физических законов лучистого теплообмена и большого количества опытных данных испытаний современных топок. В этом методе для расчета теплопередачи в топках исходными служат формулы, полученные на основе применения теории подобия к топочным процессам. Так как расчет по этим формулам требует много времени, то на практике применяют специальные номограммы (основные приведены в приложениях III, IV и VI).

Последовательность расчета теплопередачи в топке следующая.

1. Определение полезного тепловыделения 1 кг топлива в топке:

$$Q_T = Q_H^p \frac{100 - q_3 - q_5}{100} + Q_v + Q_{ф.т.} \quad (88)$$

2. Расчет геометрических характеристик топки $F_{ст}$, H_p , ψ , V по приведенным выше соотношениям,

3. Предварительная оценка температуры газов на выходе из топки t_0 или $T_0 = t_0 + 273^\circ \text{K}$.

4. Определение степени черноты топочной среды (коэффициент a , см приложение VI) по величинам kps (здесь p абсолютное давление газов в топке, которое для обычных котлов без наддува равно 1 кгс/см^2 ; s — так называемая эффективная толщина излучающего слоя газов; k — коэффициент ослабления лучей, который определяется для светящегося пламени мазута).

$$s = 3,6 \frac{V_{\tau}}{F_{\text{ст}}} ; \quad (89)$$

$$k = 1,6 \frac{T_0}{1000} - 0,5. \quad (90)$$

Если полученное значение s больше $2,5 \text{ м}$, то величину k не определяют, а коэффициент a принимают равным единице.

5. Определение эффективной степени черноты факела по формуле

$$a_{\phi} = 0,75a. \quad (91)$$

6. Определение по номограмме приложения III степени черноты топки. При этом величину $\psi\zeta$ подсчитывают с учетом условного коэффициента загрязнения ζ радиационных поверхностей нагрева, который для мазутных топок и обычных гладкотрубных экранов принимают равным $0,9$.

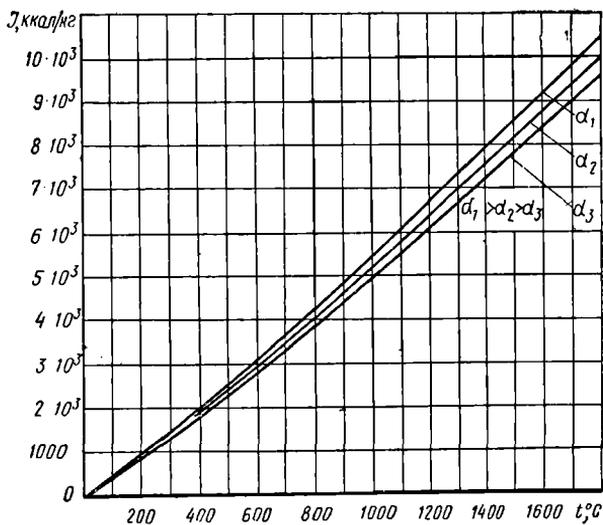


Рис. 121. Диаграмма $J - t$ дымовых газов

7. Определение по номограмме приложения IV фактической температуры газов t_0 на выходе из топки. Теоретическую температуру горения t_{τ} определяют по формуле (87) или по диаграмме $J - t$ дымовых газов (рис. 121), в зависимости от величины полезного тепловыделения в топке Q_{τ} .

Полученное значение t_0 должно отличаться от предварительно принятого (см. п. 3) не более чем на $\pm 50^\circ\text{C}$. В противном случае расчет повторяют.

8. Определение по величине t_0 , пользуясь диаграммой $J-t$ дымовых газов, теплосодержания газов на выходе из топки (в ккал/кг):

$$J_0 = \sum V \bar{c} t_0. \quad (92)$$

9. Определение количества тепла, переданного в топке 1 кг топлива (в ккал/кг):

$$Q_p = \varphi (Q_T - J_0), \quad (93)$$

где $\varphi = 1 - \frac{q_5^T}{100}$ — коэффициент „удержания“ тепла, (q_5^T — учитывает потери тепла топки во внешнюю среду).

Общее количество переданного в топке тепла (ккал/ч)

$$Q_T = B Q_p. \quad (94)$$

Действительная температура факела газов в топке находится в пределах между температурой t_0 газов на выходе из топки и теоретической температурой горения t_T . При этом радиационный теплообмен между раскаленным факелом газов, нагретых до $1300-1500^\circ\text{C}$ и выше, и относительно холодными поверхностями нагрева котла (экранами) происходит с большой интенсивностью.

Естественно, что развитие радиационных поверхностей нагрева способствует уменьшению габарита, массы и стоимости котла. Однако чрезмерное развитие объема топки приводит к обратным результатам: температура газов за топкой падает, средняя температура факела и интенсивность теплообмена снижаются, общие размеры и стоимость котла возрастают.

Практика показала, что наиболее выгоднейшее значение температуры газов за топкой для судовых котлов с мазутным отоплением газов $1200-1350^\circ\text{C}$. Тепло газов с температурой ниже 1100°C экономически более целесообразно использовать в конвективных поверхностях нагрева, предназначенных для возможно более полного использования теплоты газов при охлаждении их от t_0 до t_{yx} .

Исследования процессов конвективного теплообмена, проведенные в основном отечественными учеными, позволили определить главные факторы, влияющие на теплообмен.

Было установлено, что интенсивность конвективного теплообмена зависит от: температурного напора, т. е. разности средних температур греющей и нагреваемой сред; скорости движения этих сред вдоль разделяющей их поверхности; геометрических характеристик самой поверхности нагрева и других факторов.

В общем виде количество тепла, передаваемое через какую-либо стенку (поверхность нагрева) от одной среды к другой, на-

пример, от газов к воде или пару, определяется известным из курса теплопередачи уравнением (в ккал/ч):

$$Q = k\Delta tH, \quad (95)$$

где k — коэффициент теплопередачи, ккал/м²·ч·град;

Δt — температурный напор, °С;

H — поверхность нагрева, м².

Коэффициентом теплопередачи называется количество тепла, передаваемое от одной среды к другой через стенку площадью 1 м² за 1 ч при разности температур между обеими средами в 1°С.

Температурный напор Δt , представляющий собой разность средних температур между греющей и нагреваемой средами, подсчитывают по средней логарифмической разности температур:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{2,3 \lg \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}, \quad (96)$$

где Δt_6 и Δt_m — соответственно большая и меньшая разности температур между греющей и нагреваемой средами, определенные в начале и конце рассматриваемого участка поверхности нагрева.

В котельном агрегате нагреваются вода, пароводяная смесь, пар (или воздух). Для поверхности нагрева собственно котла, т. е. при нагревании газами кипящей воды и пароводяной смеси, формула упрощается, так как температура кипящей воды постоянна, равна t_s и зависит только от давления пара в котле. Для этого случая температурный напор определяют по формуле

$$\Delta t = \frac{t_1 - t_2}{2,3 \lg \frac{t_1 - t_s}{t_2 - t_s}}, \quad (97)$$

где t_1 и t_2 — температуры газов соответственно при входе в данную поверхность нагрева и выходе из нее.

Если t_1 и t_2 мало отличаются друг от друга (на 50÷100°С), то для ориентировочных расчетов температурный напор можно определить по формуле

$$\Delta t = 0,5(t_1 + t_2) - t_s, \quad (98)$$

т. е. как разность средних температур сред на данном участке.

Величину поверхности нагрева H , входящую в формулу, определяют по обычным геометрическим соотношениям со стороны, омываемой газами. Например, для пучка водогрейных, экономайзерных труб и труб пароперегревателя поверхность нагрева

$$H = z\pi d_n l, \quad (99)$$

где z — число труб в пучке (одинаковой длины и диаметра);

d_n — наружный диаметр труб, м;

l — длина труб, омываемых газами, м.

Для воздухоподогревателя вместо d_n принимают величину $0,5(d_n + d_{вн})$, т. е. полусумму наружного и внутреннего диаметров трубы.

Интенсивность конвективного теплообмена во многом зависит от коэффициента теплопередачи k (ккал/м²·ч·°С), учитывающего суммарную передачу тепла путем конвекции, излучения и теплопроводности. Коэффициент теплопередачи для котельных поверхностей нагрева в общем случае определяют по выражению

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_M}{\lambda_M} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (100)$$

где α_1 и α_2 — соответственно коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке и от стенки к нагреваемой среде (определяют по графикам и формулам, приведенным ниже, ккал/м²·ч·°С); $\delta_M, \delta_c, \delta_n$ и $\lambda_M, \lambda_c, \lambda_n$ — соответственно толщины и коэффициенты теплопроводности слоя металла стенки труб наружных загрязнений (сажи), и слоя внутренних загрязнений (накипи).

Коэффициентом теплоотдачи называется количество тепла, передаваемое за 1 ч от стенки площадью 1 м² среде (или наоборот) при разности температур между стенкой и средой в 1°С. Величина этого коэффициента зависит от многих факторов: температуры среды, скорости омывания, типа нагреваемой (охлаждаемой) среды, геометрической формы поверхности и т. д. Коэффициент теплоотдачи определяют по опытным данным для конкретного вида омываемой поверхности (плоской стенки, пучка труб и т. д.).

При обработке опытных данных используют теорию подобия, поэтому они могут быть распространены только на подобные поверхности теплообмена. Так, коэффициент теплоотдачи α_1 от газов к стенке для судовых котлов обычно находится в пределах 35—100 ккал/м²·ч·°С; коэффициент теплоотдачи α_2 от стенки к воде составляет 8000—10 000 ккал/м²·ч·°С.

Как было сказано, накипь и сажа обладают исключительно низкими коэффициентами теплопроводности $\lambda = 0,1—0,5$ ккал/м²·ч·°С. Таким образом, сопротивление переходу тепла от газов к воде внутри котла в основном зависит от величины коэффициента теплоотдачи и степени загрязнения поверхности нагрева.

Для повышения коэффициента α_1 применяют тесные пучки труб, трубы малого диаметра, высокую скорость омывания труб газами. Повышение коэффициента α_1 и устранение загрязнения труб накипью и сажой способствует повышению коэффициента теплопередачи k , а следовательно, более эффективному использованию поверхностей нагрева.

В процессе эксплуатации котла необходимо поддерживать расчетную величину коэффициента k для всех элементов поверхности нагрева. Уменьшение величины k (вследствие эксплуатационных

причин, особенно при плохом обслуживании и уходе) вызывает рост потерь тепла с уходящими газами и перерасход топлива, а также может снизить паропроизводительность котла.

У большинства современных котлов в последнем газоходе устанавливаются приборы, измеряющие температуру уходящих газов. Увеличение температуры газов при неизменной паропроизводительности котла указывает на снижение коэффициента теплопередачи, которое может быть вызвано отложениями сажи и золы с газовой стороны поверхности нагрева и накипи с ее внутренней стороны.

Для сохранения расчетной величины коэффициента k в эксплуатации необходимо поддерживать правильный водный режим и регулярно очищать поверхность нагрева котла.

При проектировании котельного агрегата тепловой расчет производят для определения размеров и наиболее выгодной компоновки поверхностей нагрева, т. е. собственно котла, перегревателя, экономайзера и т. д. После выполнения теплового расчета топки и определения поверхности нагрева экранов по приведенным ниже формулам и соотношениям определяют необходимые поверхности нагрева и расположение конвективных пучков испарительных труб (если они есть), перегревателя и т. д. Такие расчеты обычно выполняют в специальных конструкторских бюро.

Механику судна иногда приходится решать обратную задачу: по размерам и расположению поверхностей нагрева и других элементов котельного агрегата определять тепловые характеристики работы котла. Такие расчеты делают при переходе на другой режим работы, когда необходимо предварительно проверить ожидаемые значения температуры перегретого пара, газов и других параметров, а также при намечаемой переделке котла и его элементов (установке экономайзера, воздухоподогревателя и т. д.). В настоящее время практически для всех встречающихся в котлостроении видов поверхностей нагрева разработаны расчетные выражения и зависимости, дающие удовлетворительные результаты.

В основу теплового расчета конвективных поверхностей нагрева положены уравнения (в ккал/ч):

Теплопередачи

$$Q = k\Delta tH, \quad (101)$$

теплового баланса

$$Q = B(1 - 0,01q_5)(I_1 - I_2), \quad (102)$$

где I_1 и I_2 — теплосодержание газов на входе в данную поверхность нагрева и на выходе из нее, ккал/кг¹:

$$I_1 = \sum V\bar{c}t_1; \quad I_2 = \sum V\bar{c}t_2.$$

Для определения характеристик рабочего вещества (температуры перегретого пара, подогрева воды, воздуха и т. п.), кроме основных соотношений, используют уравнения для количества тепла, воспринятого данным нагреваемым веществом. Например,

¹ Напоминаем, что и здесь теплосодержание газов отнесено к 1 кг топлива.

для пароперегревателя количество воспринятого от газов тепла $Q_{п.п}$, определенное по формулам (101) и (102), будет израсходовано на перегрев пара. Следовательно,

$$Q_{п.п} = D_{п.п} (i_{п.п} - i_x), \quad (103)$$

где $D_{п.п}$ — количество пара, проходящего через пароперегреватель, кг/ч;

$i_{п.п}$, i_x — соответственно энтальпия перегретого и насыщенного пара, ккал/кг.

Для водяного экономайзера количество воспринятого от газов тепла будет израсходовано на подогрев питательной воды (в ккал/ч):

$$D_{эк} = D (i_{эк} - i_{пв}), \quad (104)$$

где D — паропроизводительность котла, равная количеству воды, поступающей в экономайзер, кг/ч;

$i_{эк}$, $i_{пв}$ — теплосодержание воды соответственно на выходе из экономайзера и на входе в него, ккал/кг.

Для воздухоподогревателя будет справедлива формула (в ккал/ч):

$$Q_{взд} = BV_{\alpha} \bar{c}_v (t_v - t_{x.v}), \quad (105)$$

где $t_{x.v}$ и t_v — температуры воздуха соответственно до воздухоподогревателя и после него, °С;

V_{α} — действительное объемное количество воздуха на 1 кг топлива.

Величину удельной теплоемкости воздуха можно принимать постоянной, равной $\bar{c}_v \cong 0,31$ ккал/н.м³·°С, так как она относительно мало изменяется в пределах температуры воздуха 20—200°С.

Решая уравнения (101) и (102) и одно из уравнений (103), (104) или (105), можно определить все основные характеристики какой-либо поверхности нагрева котлоагрегата. В этих уравнениях наиболее сложно определить коэффициент теплопередачи k (ккал/м²·ч·°С).

Коэффициент k , входящий в формулу (101), определяют одинаково как для плоской, так и для цилиндрической стенки трубы, поскольку толщина стенки весьма мала по сравнению с диаметром водогрейных, экономайзерных и других котельных труб.

Коэффициент теплопередачи для загрязненной стенки определяют по формуле (100). Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке, входящий в уравнение (100), равен:

$$\alpha_1 = \omega \alpha_k + \alpha_l, \quad (106)$$

где ω — коэффициент омывания, учитывающий уменьшение тепловосприятия при неполном омывании газами поверхности нагрева (рассчитывают по опытным данным для определенного типа котла);

α_k , α_l — коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке соответственно конвекцией и излучением, ккал/м²·ч·°С.

Коэффициент теплоотдачи α_2 от стенки к нагреваемой среде (воде, пару или воздуху) определяют по номограммам нормативного метода (см. приложение V).

Тепловой расчет и методика определения коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи для парообразующей поверхности нагрева котла, поверхности нагрева пароперегревателя, экономайзера и воздухоподогревателя имеют свои особенности. Поэтому более подробно рассмотрим приведенные общие уравнения теплообмена.

Для парообразующей поверхности нагрева котла или отдельной ее части (например, пучка труб до пароперегревателя или за ним, дымогарных труб и т. д.) теплопередачу рассчитывают, решая совместно уравнения (101) и (102). При этом поверхность нагрева H_K определяют отдельно для каждого пучка труб с одинаковыми геометрическими характеристиками. Если, например, первый конвективный пучок водогрейных труб состоит из шести рядов, причем первые два имеют больший, а следующие четыре — меньший диаметр, то расчет надо выполнять отдельно для первых двух рядов, а потом для четырех и т. д.

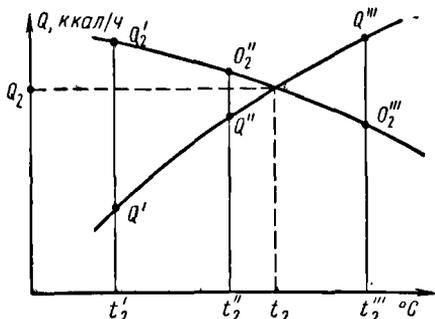


Рис. 122. График для расчета теплообмена в пучке труб

При расчете теплопередачи в пучке водогрейных труб остается неизвестной температура газов за данным пучком. Поэтому предварительно задаются тремя значениями этой температуры t_2', t_2'', t_2''' и выполняют три расчета, получая три значения количества тепла, отданного газами:

$$Q_2' = B(1 - 0,01q_5)(\sum V\bar{c}t_1 - \sum V\bar{c}t_2'); \\ Q_2'' = B(1 - 0,01q_5)(\sum V\bar{c}t_1 - \sum V\bar{c}t_2'') \text{ и т. д. ,}$$

где t_1 — температура газов перед пучком труб, °C.

Одновременно получают три величины для количества тепла, воспринятого данной поверхностью нагрева, т. е. $Q' = k'\Delta t'H$, $Q'' = k''\Delta t''H$ и т. д.

По величинам Q_2', Q_2'', Q_2''' , Q', Q'', Q''' строят вспомогательный график (рис. 122).

Фактическое количество воспринятого тепла и действительную температуру газов за данной поверхностью нагрева, равные Q_2 и t_2 , определяют по пересечению кривых.

При определении коэффициента теплопередачи k для парообразующей поверхности нагрева котла можно допустить некоторые упрощения, т. е. пренебречь величинами $\frac{1}{\alpha_2}$ и $\frac{\delta_M}{\lambda_M}$, как было сказано выше.

Очень трудно с достаточной точностью оценить влияние загрязнений, т. е. величин $\frac{\delta_c}{\lambda_c}$ и $\frac{\delta_n}{\lambda_n}$, на коэффициент теплопередачи. Эти величины во многом зависят от условий эксплуатации котла обслуживаемым персоналом, рода топлива, системы водообработки, наличия обдувочных устройств и т. д.

Влияние этих факторов учитывают введением коэффициента загрязнения (или коэффициента использования газахода) в формулу для коэффициента теплопередачи. Тогда расчетная формула приобретает вид:

$$k = \xi \alpha_1. \quad (107)$$

Величину ξ для судовых котлов принимают в пределах 0,7—0,9, отсюда большие значения k высококачественной водоподготовке и интенсивной сажеобдувке.

Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке α_1 определяют по формуле (106), причем величину ω принимают в пределах 0,7—1 (по опытным данным в зависимости от типа котла и расположения в нем рассматриваемой поверхности нагрева). Например, для пакетов труб $\omega \cong 1$, для первых пучков труб двухбарабанных котлов (без газовых перегородок в пучках) $\omega = 0,8 \div 0,85$, для пучка труб за пароперегревателем этих же котлов $\omega = 0,7 \div 0,75$ и т. д.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k определяют по формулам или номограммам, приведенным в нормативных материалах теплового расчета котельных агрегатов. В приложении V приведена номограмма для определения величины α_k при поперечном омывании газами шахматных гладкотрубных пучков. Для снабженных плавниками или ребрами труб (например, экономайзера) значение α_k рассчитывают по специальным формулам.

Коэффициент α_k определяют с учетом поправок c_z на число рядов c_z труб в пучке, главных характеристик c_s пучка и физических свойств самих газов c_ϕ в виде

$$\alpha_k = c_z c_s c_\phi \alpha_n, \quad (108)$$

где величину α_n (ккал/м²·ч·°С) определяют с помощью номограммы по известному диаметру труб d (мм) и скорости V (м/с) омывания их газами. Последнюю величину определяют по формуле

$$V = \frac{BV_r(\theta + 273)}{3600F \cdot 273}, \quad (109)$$

где B — часовой расход топлива, кг/ч;
 V_r — объем продуктов горения 1 кг топлива, н. м³/кг;
 θ — средняя температура газового потока на данном участке, °С;
 F — свободное (живое) сечение для прохода газов через данную поверхность нагрева, м².

Расчетная средняя температура газов ϑ равна сумме средней температуры обогреваемой среды и температурного напора, т. е. для поверхности нагрева собственно котла

$$\vartheta = t_s + \Delta t. \quad (110)$$

Определив величину α_n по номограмме, умножают ее на коэффициенты κ_z , c_s и c_ϕ и находят искомое значение α_k для данной поверхности нагрева.

Объемная доля водяных паров r_{H_2O} в дымовых газах, численно равная их парциальному давлению при абсолютном давлении газов 1 кгс/см^2 , необходима для определения поправочного коэффициента c_ϕ . Величину r_{H_2O} принимают по данным расчетов по топливу (см. гл. IV).

Коэффициент теплоотдачи излучением α_L , входящий в формулу (106), также определяют по соответствующим номограммам нормативного метода (приложение VI).

При расчете величин α_1 и α_2 для конвективных пучков труб, расположенных за пароперегревателем, труб экономайзера и воздухоподогревателя коэффициент α_L обычно не учитывают, т. е. $\alpha_1 \cong \alpha_k$ (от газов к стенке) и $\alpha_2 \cong \alpha_k$ (от стенки к воздуху).

Последовательность теплового расчета водотрубного котла приведена для котла КВГ-34 при нагрузке 34 т/ч .

Перед выполнением теплового расчета рекомендуется составить сводку геометрических характеристик котла (табл. 13).

Т а б л и ц а 13

Элемент	Обозначение	Числовое значение
Объем топки, м^3	V_T	29,3
Полная поверхность стен топки, м^2	$F_{ст}$	57,2
Поверхность нагрева, м^2 :		
радиационная по формуле (80)	H_p	37,5
первого пучка	H_1	55,4
Диаметр и толщина стенки, мм/мм:		
пароводяного коллектора	D/δ	1300/28
труб первого пучка	d_1/δ_1	445/3
труб пароперегревателя	$d_{пп}/\delta_{пп}$	25/2
Число рядов труб:		
в первом пучке (по ходу газов)	z_1	2
в пароперегревателе	$z_{пп}$	10
Поперечный и продольный шаги труб в первом пучке, мм/мм	S_1/S_2	91/60
Сечение для прохода газов через первый пучок труб, м^2	f_1	6,88

Расход топлива (в кг/ч) определяют по формуле

$$B = \frac{D_{п.п} (t_{п.п} - t_{п.в}) + D_{охл} (t_{охл} - t_{п.в}) + D_{нас} (t_x - t_{п.в})}{Q_H^p}, \quad (111)$$

где $D_{нас}$ — часовое количество насыщенного пара, производимого котлом.

После определения ориентировочного расхода топлива приступают к оценке тепловых потерь для данного типа котла. Эти предварительные расчеты удобно выполнять в форме таблицы (табл. 14).

Таблица 14

Характеристика	Обозначение	Расчетная формула или обоснование	Числовое значение
Расход топлива, кг/ч	B	Формула (111)	2500
Потеря тепла, % от химического недожога	q_3	Опытные данные	0,5
во внешнюю среду	q_5	(гл. V)	1,8
в том числе топкой	q_5^T	То же	0,9
суммарная топкой	Σq_T	»	1,4
Видимая тепловая нагрузка топочного объема, ккал/м ³ ·ч	qv		811×10^3
Ориентировочный к. п. д. котла, %	η_k	Принимают предварительно	92
Паропроизводительность, кг/ч	D	Задано	34 000

Расчеты по топливу и продуктам горения также удобно производить в форме таблицы (табл. 15).

Таблица 15

Характеристика	Обозначение	Расчетная формула или обоснование	Числовое значение
Расход топлива, кг/ч	B	Табл. 14	2500
Коэффициент избытка воздуха	α	α	1,25
Количество воздуха на 1 кг топлива, н.м ³ /кг:			
теоретическое	V_0	Формулы гл. IV	—
фактическое	V_α	αV_0	13
Объем, н.м ³ /кг:			
трехатомных газов	V_{RO_2}	Формулы гл. IV	—
двухатомных	V_{R_2}	То же	—
водяных паров	V_{H_2O}		—
продуктов горения	V_T	$V_{RO_2} + V_{R_2} + V_{H_2O}$	13,76
Парциальное давление, кгс/см ² :			
трехатомных газов	p_{RO_2}	V_{RO_2}/V_T	0,113
водяных паров	p_{H_2O}	V_{H_2O}/V_T	0,102

После определения объема воздуха и продуктов горения необходимо рассчитать теплосодержание последних (в соответствии с приложением II) для каждого режима работы котла и выполнить расчеты по форме табл. 16, построив диаграмму $I-t$ дымовых газов (см. рис. 121).

Таблица 16

t°, C	$V_{RO_2}(ct)_{RO_2}$	$V_{R_2}(ct)_{R_2}$	$V_{H_2O}(ct)_{H_2O}$	$J - \Sigma \bar{V}ct$	ΔJ
100					
200					
...					
1700					
1800					

Суммарное теплосодержание продуктов горения 1 кг топлива определяют по формуле (в ккал/кг):

$$\Sigma \bar{V}ct = V_{RO_2}(ct)_{RO_2} + V_{R_2}(ct)_{R_2} + V_{H_2O}(ct)_{H_2O}. \quad (112)$$

Величина ΔI (ккал/кг), необходимая для интерполяции, равна разности величин двух соседних строк, т. е.

$$\Delta I = I_{t+100^{\circ}C} - I_t.$$

Теплопередачу в топке рассчитывают в соответствии с указаниями, приведенными выше. Расчет удобно выполнять в форме табл. 17.

Таблица 17

Характеристика	Обозначение	Расчетная формула или обоснование	Числовое значение
Расход топлива, кг/ч	B	Табл. 14	2500
Температура, °C:			
воздуха, поступающего в топку	t_B	Принимают ориентировочно	130
мазута перед форсунками	$t_{топл}$	Принимают	80
Тепло, вносимое в топку, ккал/кг:			
воздухом на 1 кг топлива	Q_B	$c_B t_B V_a$	525
топливом	$Q_{ф.т}$	$c_T t_{топл}$ при $c \approx 0,5$	40
Полезное тепловыделение 1 кг топлива, ккал/кг	Q_T	Формула (88)	9940

Характеристика	Обозначение	Расчетная формула или обоснование	Числовое значение
Теоретическая температура горения, °С	t_T	Формула (87) или диаграмма дымовых газов	1845
Предварительно принятая температура газов за топкой	t'_0	Принимают	1250
Средняя суммарная теплоемкость газов, ккал/кг·°С	$\Sigma V \bar{c}$	$\frac{Q_T - J'_0}{t_T - t'_0}$ I' — по диаграмме $J-t$ в зависимости от t'_0	5,8
Коэффициент сохранения тепла	φ	$1 - 0,01q_3^T$	0,995
Условный коэффициент загрязнения радиационных поверхностей нагрева	ξ	Принимают	0,9
Радиационная поверхность нагрева, м ²	H_p	Табл. 13	37,5
Степень: эффективная черноты факела экранирования топки	$a_{\text{ф}}$	Формула (91)	0,735
черноты топки	ψ	$\frac{H_p}{F_{\text{ст}}}$	0,655
Фактические характеристики газов на выходе из топки: температура, °С	a_T	Приложение III	0,676
теплосодержание, ккал/кг	t_0	Приложение IV Диаграмма $J-t$ в зависимости от t_0 , °С	1275
	J_0		6545
Количество переданного в топке тепла, отнесенное к 1 кг ккал/кг: топлива	Q_p	$\varphi (Q_T - J_0)$ $B_p Q_p$	3310
полное	Q_T		$8,28 \times 10^6$
Коэффициент прямой отдачи топки	μ	$\frac{Q_p}{Q_T}$	0,337

Теплообмен в конвективных пучках водогрейных труб, пароперегревателе, экономайзере и воздухоподогревателе рассчитывают по формулам, приведенным в этом параграфе.

Расчет теплообмена в пучках обычно ведут в форме табл. 18, в которой в качестве примера приведен расчет первого трубного пучка при следующих данных: диаметр труб 44,5 мм; толщина стенки 3 мм; число рядов труб 2; шаги труб: $S_1=91$ мм; $S_2=60$ мм; живое сечение газохода $f=6,88$ м²; конвективная поверхность нагрева пучка 41,6 м².

Таблица 18

Характеристика	Обозначение	Расчетная формула или обоснование	Числовые значения
Расход топлива, кг/ч	B	Табл. 14	2500
Характеристики газов до пучка труб:			
температура, °С	t_1	Расчет предыдущей поверхности нагрева (топки)	1275
теплосодержание, ккал/кг	J_1	Таблицы или диаграмма газов $J-t$	6545
Предварительно принятая температура газов за пучком труб, °С	t_2', t_2'', t_2'''	Принимают предварительно	1000; 1100; 1200
Теплосодержание газов при t_2', t_2'', t_2''' , ккал/кг	J_2', J_2'', J_2'''	Таблицы или диаграмма газов $J-t$	5005; 5560; 6105
Количество тепла, отданного газам, ккал/ч	Q_2', Q_2'', Q_2'''	Формулы (101), (103), (104)	$3,85 \times 10^6$ $2,46 \times 10^6$ $1,1 \times 10^6$
Температурный напор, °С	Δt	Формула (97) или (98)	873; 926; 975
Средние характеристики газов:			
температура, °С	ϑ	Формула (110)	1130; 1183; 1202
скорость, м/с	w	Формула (109)	7,15; 7,41; 7,66
Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке, ккал/м ² ·ч·°С конвекцией	α_k	Номограмма приложения V	47,6; 48,9; 50,1
излучением	α_l	Номограмма приложения VI	12,3; 12,9; 13,4
Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке, ккал/м ² ·ч·°С	α_1	Формула (106)	46,85; 48,3; 49,75
Коэффициент теплопередачи	k	Формула (100) или (107)	31,9; 32,6; 33,2
Количество тепла, воспринятого нагреваемой средой	Q_1	$k\Delta tH$	$1,16 \times 10^6$; $1,25 \times 10^6$; $1,35 \times 10^6$
Фактические характеристики газов за пучком труб:			
теплосодержание, ккал/кг	J_2	$J_1 - \frac{Q}{B(1-0,01q_s)}$	6000
температура, °С	t_2	Величина J_2 и диаграмма $J-t$ или таблица газов	1180

После расчета конвективной поверхности нагрева котла, пароперегревателя, экономайзера и воздухоподогревателя составляют тепловой баланс котла по форме табл. 19. По данным таблицы строят график тепловой работы котла (рис. 123).

После теплового расчета производят аэродинамический расчет котла и определяют необходимую мощность тягодутьевых устройств.

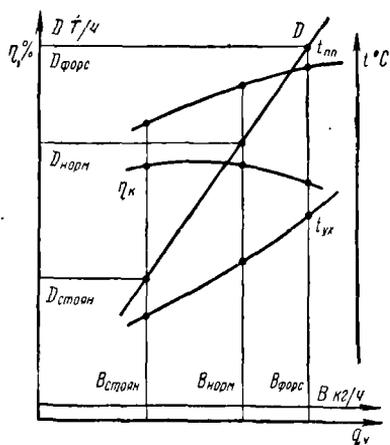


Рис. 123. График тепловой работы котла

Таблица 19

Характеристики	Обозначение	Расчетная формула или обоснование	Числовое значение
Расход топлива, кг/ч	V	Табл. 14	2500
Количество тепла, ккал/ч, переданное:			
в топке	Q_T	Тепловой расчет	$8,28 \times 10^6$
конвективной поверхности нагрева котла	Q_K	То же	$6,84 \times 10^6$
экономайзеру	$Q_{Эк}$	»	$2,67 \times 10^6$
Количество тепла, израсходованное на нагрев и испарение воды, ккал/ч	$Q_{исп}$	$Q_1 + Q_K + Q_{Эк}$ При наличии внутрибарабанного парохладителя добавляют $Q_{охл} = D_{охл} (i_{п.п} - i_{охл}) = 0,65 \times 10^6$	$18,155 \times 10^6$
Паропроизводительность котла, кг/ч	D	Задано	34 000
Количество перегретого пара, кг/ч	$D_{п.п}$	$D - D_{нас} - D_{охл}$	31 700
Количество тепла, переданного пароперегревателю, ккал/ч	$Q_{пп}$	Тепловой расчет	$4,89 \times 10^6$
Теплосодержание перегретого пара, ккал/кг	$i_{п.п}$	$i_x + \frac{Q_{п.п}}{D_{п.п}}$	806,6
Температура перегретого пара, °С	$t_{п.п}$	Таблицы пара по $i_{п.п}$	470
Полное количество тепла, переданное газам котлу, ккал/ч	Q_1	$Q_{исп} + Q_{п.п} + Q_{охл}$	$22,68 \times 10^6$
К. п. д. котла, %	η_K	$\frac{Q_1}{BQ_N^P} 100$	92,35
Потеря с уходящими газами, %	q_2	$\frac{(Q_{ух} - Q_{хв} - Q_{ф.т})}{Q_N^P} \cdot 100$	6,35

§ 51. Основы технической эксплуатации

Для роста производительности флота и повышения рентабельности перевозок увеличивают количество судов, снабженных современным оборудованием, и применяют наиболее совершенную и эффективную эксплуатацию судов и их механизмов.

В настоящее время происходит переход к повышенным параметрам пара (80/515) для судовых паросиловых установок, что позволит еще более снизить удельный расход топлива (до 160 г/л.с.-ч) и годовые эксплуатационные расходы.

Изучение опыта работы экипажей судов с комплексно-автоматизированными энергетическими установками и распространение его на все суда морского флота позволят резко увеличить провозоспособность флота и снизить стоимость перевозок за счет полного использования внутренних резервов установок.

Необходимо распространить на весь флот такие достижения технической эксплуатации, как отказ от заводского ремонта котлов в течение 3—4 лет и более. Это возможно при строгом соблюдении Правил [10].

Основные методы эксплуатации котельных установок будут рассмотрены ниже.

Одним из главных факторов, определяющих качество обслуживания установки и улучшение ее технико-экономических показателей, является поддержание в заданных пределах параметров пара, паропроизводительности и к. п. д. котла.

Параметры пара определяют с помощью контрольно-измерительных приборов, причем рекомендуется установка самопишущих манометров и термометров (например, в виде термопар с многоточечным автоматическим переключателем и записью на ленту температур пара, питательной воды, воды за экономайзером и т. д.). Применение таких регистрирующих приборов позволяет выявить недостатки ручного обслуживания котлов или отрегулировать автоматику в случае обнаружения отклонений основных параметров от заданных значений.

Паропроизводительность котлов определяют по показаниям вододмеров, регистрирующих расход питательной воды (желательно самопишущих), или, при их отсутствии, по частоте вращения вала главной машины (турбины) с учетом параметров пара перед машиной.

К. п. д. котла, являющийся его важнейшей характеристикой, определяют обычно только при относительно редких теплотехнических испытаниях, которые требуют специального оборудования, приборов и дополнительного количества специалистов.

Регулярные испытания котла и ускоренная обработка их результатов по упрощенной методике позволяют быстро и достаточно точно определять эффективность работы котельной установки, помогают достигнуть проектных характеристик и

поддерживать их в течение всего времени эксплуатации судна, а также откорректировать установленные нормы расхода топлива в ту или иную сторону.

Для оперативного учета работы силовой установки судна применяют самопишущие приборы, непрерывно фиксирующие такие параметры, как частоту вращения вала главного двигателя, давление и температуру пара, расход и температуру питательной воды, температуру уходящих газов, содержание отдельных компонентов в уходящих газах.

Успешное выполнение плана перевозок и рентабельность работы флота зависят от увеличения тоннажа и провозной способности флота. Последнее достигается удлинением эксплуатационного периода работы судов, лучшим использованием их грузоподъемности, повышением скорости хода, сокращением времени погрузки и разгрузки. Все это в значительной степени определяется уровнем эксплуатации ССУ и их технического состояния.

При правильной технической эксплуатации ССУ ее оборудование служит дольше, межремонтные сроки удлиняются, а объем ремонтных работ сокращается. Работа передовых машинных команд флота показала, что при хорошем уходе и правильном обслуживании можно не выводить судно из эксплуатации для ремонта в течение нескольких лет.

Использование грузоподъемности улучшается при снижении расхода топлива и котельной воды, в результате чего могут быть снижены их запасы на рейс. Таким образом, прямая экономия от снижения расхода топлива и воды дополняется косвенной экономией от увеличения провозоспособности судна.

Рассмотрим основные требования, предъявляемые к ССУ, в том числе котельной.

1. *Обеспечение высокой степени эксплуатационного использования судна.* Недоиспользование и простои установки при высокой стоимости содержания современного крупнотоннажного судна приносят наибольшие убытки.

Можно различать (в процентах):
использование по времени

$$V_{\text{в}} = \frac{T_{\text{р}} + T_{\text{гот}}}{T_{\text{о}}} 100,$$

где $T_{\text{р}}$ — продолжительность работы, ч;

$T_{\text{гот}}$ — время готовности, ч;

$T_{\text{о}}$ — общее время эксплуатации, ч;

использование по мощности

$$V_{\text{м}} = \frac{N_{\text{ф}}}{N_{\text{макс}}} 100,$$

где $N_{\text{ф}}$ и $N_{\text{макс}}$ — фактическая и максимально возможная мощности установки, э. л. с. (или скорость судна, уз.);

полное использование в эксплуатации

$$V = V_{\text{в}} V_{\text{м}} 100.$$

Очевидно, что полное использование в значительной степени зависит от надежности оборудования.

Надежность определяется в основном совокупностью трех понятий: безотказности, долговечности и ремонтпригодности.

Безотказность — это способность оборудования сохранять работоспособность в заданных условиях эксплуатации (для котлов D т/ч, p кгс/см² и $t_{д.п}$ °С), т. е. не иметь отказов в течение определенного времени.

Долговечность — это свойство оборудования сохранять работоспособность до разрушения или другого предельного состояния, характеризующегося сроком службы, в конце которого оборудование уже не подлежит ремонту.

Ремонтпригодность — это приспособленность оборудования к восстановлению, характеризующаяся затратами труда, времени и средств на обслуживание и ремонт.

Надежность работы судовой паросиловой установки зависит от организации управления ею, степени автоматизации, от квалификации машинной команды, организации технического обслуживания и снабжения.

Снижение надежности установки, неполадки и отказы в ее работе часто зависят от плохого ухода и неправильного управления. Поэтому необходимо знать причины неполадок, аварий и повреждений и способы их предупреждения и устранения.

Надежность судового котельного агрегата зависит от надежности отдельных элементов, особенно тех, которые наиболее подвержены отказам.

2. *Наименьший расход топлива при номинальной мощности и достаточно низкие удельные расходы при других режимах работы.* Всякие отклонения мощности от номинальной, как правило, приводят к снижению экономичности работы установки, изменению к. п. д. котлов и турбин и увеличению удельного расхода топлива. Последний также значительно возрастет при работе установки на пониженной мощности или при низких параметрах пара.

3. *Наименьший расход средств на ремонт.* Большое влияние на уменьшение стоимости и сокращение сроков ремонта оказывают правильная организация планово-предупредительных осмотров, измерений и вскрытий (для предотвращения преждевременных износов), а также тщательная подготовка установки к заводскому ремонту.

Технической эксплуатацией ССУ руководит старший механик судна.

В ведении третьего котельного механика находятся котельная установка, паропроводы и устройство парового отопления, а на малых судах, где нет четвертого механика или электромеханика, также палубные механизмы, судовые системы, судовая электростанция и электросети. Третий механик непосредственно руководит работой котельных машинистов, ведает приемкой, хранением и учетом расхода топлива.

В пароходстве, флотилии, управлении пути, порту технической эксплуатации руководит главный инженер через службу судового хозяйства (ССХ) и механиков-наставников, которые обязаны изучать состояние флота, разрабатывать методы улучшения его использования и поддержания нормального технического состояния судов. Специальные комиссии систематически проводят инспекторские осмотры каждого судна.

Ни один работник не может быть допущен к самостоятельному обслуживанию судового оборудования и уходу за ним без знания соответствующих правил и инструкций. При обслуживании котельной установки морского судна и ухода за ней следует руководствоваться Правилами технической эксплуатации судовых паровых котлов и Правилами Регистра СССР, а также инструкциями заводов-строителей. Однако никакие правила не могут дать абсолютно точных рекомендаций, подходящих для котлов всех типов, поэтому обслуживающий персонал должен на основе практического опыта, знания теории и указанных правил грамотно и умело эксплуатировать котельную установку с учетом особенностей ее конструкции.

Правила [10] охватывают следующие основные вопросы эксплуатации котельных установок:

- приемку и хранение топлива;
- подготовку котла к действию и подъем давления пара;
- обеспечение надежной и экономичной работы котла;
- вывод из действия и консервацию котла;
- ведение и хранение технической документации по котельному отделению (шнуровая книга, котельный журнал, журнал водоконтроля и др.).

На некоторых из этих вопросов следует остановиться подробнее.

§ 52. Подготовка к действию и подъем пара

Подготовка к действию и пуск котла должны производиться в строгом соответствии с Правилами технической эксплуатации и инструкциями заводов.

Котел и обслуживающие его механизмы и системы перед пуском тщательно осматривают изнутри и снаружи независимо от предыдущих осмотров инспектором Регистра СССР и представителем какой-либо инспектирующей организации. При осмотре котла особое внимание уделяют состоянию швов, наварышей, фланцев, прокладок, котельной арматуры и гарнитуры; проверяют зазоры (для возможности свободного расширения деталей при нагревании), а также крепления котла, состояние футеровки и обмуровки и т. п. При обнаружении трещин в корпусе или трубах, неисправности арматуры, не удаленной при очистке накипи и других дефектов пуск котла воспрещается; серьезные дефекты устраняют по согласованию с Инспекцией Регистра СССР.

После тщательного осмотра котла проверяют исправность действия систем, обслуживающих котел (топливной, питательной, автоматического регулирования и др.). Затем закрывают все лазы (кроме верхнего, если он предназначен для наполнения котла водой) и горловины.

Перед постановкой крышек гнезда отверстий лазов горловин и лючков тщательно очищают и натирают графитом. На поверхность гнезд кладут специальные прокладки из люковой ленты, сплетенной из прографиченной асбестовой пряжи. Овальные крышки заводят внутрь котла и прижимают к гнезду лаза или горловины скобами, которые надевают на болты крышек и крепят гайками. Крышки малых лючков секционных котлов ставят на специальные прокладки, заранее отштампованные по форме отверстий. Нажим гаек должен быть равномерным во избежание перекоса и пропусков пара через крышки. Если в дальнейшем будет обнаружено, что крышка пропускает пар, нужно прекратить подъем пара, выпустить воду из котла и вновь установить крышку. Во время подъема паров котел прогревается, болты крышек удлиняются и гайки ослабевают, поэтому их нужно вновь подтянуть.

Когда горловины и люки закрыты, котел заполняют по возможности теплой водой (дистиллятом или конденсатом) через открытый верхний лаз или систему питания. При этом уровень воды должен быть несколько ниже рабочего, так как при нагреве объем воды увеличится и уровень поднимется до рабочего. В огнетрубных котлах котел заполняют до верхнего среза водоуказательных стекол, а в дальнейшем часть воды (до РУВ) спускают. Это способствует лучшему прогреванию барабана котла, в нижней части которого температура воды возрастает очень медленно.

После наполнения котла закрывают верхний лаз и открывают воздушный кран; последний закрывают, когда через него пойдет сплошная струя пара.

Перед разводкой огня в топках необходимо слегка стронуть на открытие паровые клапаны, чтобы они не оказались зажатыми во время нагревания.

При определении скорости подъема паров, т. е. времени, необходимого для доведения давления в котле до рабочего, следует соблюдать большую осторожность. Это время должно быть достаточным для медленного и равномерного прогрева воды, содержащейся в котле, металла и кирпичной кладки. При быстром подъеме паров возможны расстройство и течь вальцованных соединений и швов и даже появления мелких трещин на загибах днищ. Кроме того, термические напряжения способствуют развитию коррозии и старению металла, что снижает срок службы котла.

После капитального ремонта или длительного бездействия огнетрубного котла продолжительность подъема температуры воды до 100°С должна составлять не менее 8 ч (для небольших котлов это время можно уменьшить до 4 ч). После появления струи пара из воздушного крана последний закрывают и давление в котле в течение 8 ч поднимают до 3—4 кгс/см², соответственно

регулируя горение в топках. В дальнейшем давление пара надо поднимать до рабочего в течение 8 ч в зависимости от размеров котла. Таким образом, полное время подъема паров в огнетрубном котле составляет не менее 24 ч.

Водотрубные котлы значительно меньше подвержены чрезмерным тепловым напряжениям при пуске, так как водогрейные трубы обладают малой жесткостью, а небольшой объем воды и ее интенсивная циркуляция способствуют быстрому выравниванию температуры металла. Опыт показывает, что только в секционных котлах, обладающих жесткими прямыми трубами, подъем паров следует вести в течение 6 ч и более. В водотрубных котлах с изогнутыми трубами это время можно сократить до 2—3 ч и менее (в соответствии с заводскими инструкциями), следя, однако, за состоянием кирпичной кладки, которая может повредиться при слишком быстром прогреве. Водотрубные вспомогательные котлы пускают в течение 10—40 мин.

Сокращение времени на подъем паров против установленных норм допускается лишь при спасательных работах, пожарах или в других экстренных случаях по письменному распоряжению капитана.

Подъем паров в котле иногда ведут на естественной тяге. Все автоматы при подъеме паров выключают и котел пускают на ручном управлении, если котел не имеет устройств для автоматического пуска.

Перед зажиганием форсунок котла проверяют состояние топливной системы и испытывают на плотность подогреватель мазута при максимальном давлении со стороны мазута, не включая пар для подогрева. После этого слегка приоткрывают паровой клапан, дают возможность пару сконденсироваться в паровом пространстве подогревателя, открывают клапан продувания парового пространства, собирают конденсат и проверяют, нет ли в нем мазута.

Затем проверяют отсутствие мазута на поде топки и котел тщательно вентилируют, открыв все воздушные заслонки и включив вентиляторы на 3 мин. Мазут предварительно подогревают, так как холодное топливо плохо распыливается, дает дымное горение и поверхность нагрева котла быстро загрязняется сажей. Топливную магистраль заполняют подогретым мазутом, поступающим обратно через сливной трубопровод.

В огнетрубных котлах первыми зажигают форсунки нижних топок, в водотрубных — среднюю форсунку. Остальные форсунки зажигают последовательно так, чтобы они располагались симметрично по отношению к средней. В некоторых котлах пуск производится специальной дежурной форсунке, работающей на легком топливе.

Форсунки зажигают от специального ручного асбестового факела или электрозажигательным устройством. Котельный машинист во избежание ожогов при выбросе пламени должен находиться в стороне от окна, в которое вставляется факел. Нельзя зажигать форсунку от раскаленной кладки. Если зажечь форсунку

не удалось, закрывают топливный клапан, вентилируя топку в течение 5 мин и после этого операцию повторяют.

При отсутствии пара в котельной установке для пуска используют дрова или дизельное топливо. Для этого в котельных установках имеются специальные цистерны пускового дизельного топлива и ручные насосы, подающие топливо к форсункам. Таким насосом сначала удаляют мазут из топливной магистрали и создают в ней давление¹ топлива около 7 кгс/см². Затем зажигают одну центральную форсунку и, когда давление пара в котле поднимется до 3—4 кгс/см², начинают прогревать паровую магистраль вспомогательных механизмов, включают пар для подогрева мазута в расходной цистерне и готовят к пуску питательный насос. Как только топливо в расходной цистерне подогревается и давление пара будет достаточным для работы топливного насоса, форсунки переводят на мазут.

После зажигания каждой форсунки регулируют подачу топлива и воздуха так, чтобы получить устойчивый факел, основание которого не отрывается от форсунки. Если котел оборудован вращающимися форсунками, то мазут подают к распылителю, работающему с полной частотой вращения, постепенно открывают топливный клапан.

Когда давление пара начнет повышаться, продувают трубки манометром и включают их. При появлении непрерывной струи пара из воздушного крана, его закрывают.

Водоуказательные приборы продувают и проверяют их показания (с помощью пробных кранов) в первый раз при достижении давления 1 кгс/см². Когда давление достигнет 1,5 кгс/см², котел сообщают с пароперегревателем.

После того как давление пара достигнет 3 кгс/см², осматривают все фланцы, лазы и горловины и обжимают ключом их гайки. Когда давление повысится до 5 кгс/см², котел подпитывают водой и продувают через краны сначала верхнего, а затем нижнего продувания для удаления выделившихся из воды солей и других примесей. При достижении примерно половины рабочего давления проверяют исправность предохранительных клапанов, подняв их ручным приводом, а затем еще раз проверяют действие манометров и воздухоуказательных приборов.

Продолжительность растопки (т. е. время от зажигания огня в топке до появления пара в котле) должна составлять не менее половины общего времени подъема паров. При достаточном для работы вспомогательных механизмов давлении пара прогревают вспомогательную магистраль и готовят механизмы к работе.

После достижения рабочего давления пара в котле снова проверяют манометры, предохранительные клапаны, водоуказательные приборы и краны или клапаны верхнего и нижнего продувания и закрывают продувание пароперегревателя, если это

¹ Все нижеприведенные величины давлений и температур при пуске котла могут несколько отличаться по указаниям инструкций завода-строителя.

предусмотрено инструкцией. Уровень воды в котле к этому времени должен быть равен рабочему. Если он будет выше, то при открытом стопорном клапане вода может попасть с паром в главную паровую магистраль, при чрезмерно низком уровне возникнет опасность упуска воды.

Сообщить котел с ранее действующим можно при одинаковом в них давлении.

Перед подачей пара из котлов в главную паровую магистраль ее прогревают в течение 15—20 мин при открытых кранах продувания, приоткрыв разобшительный клапан. Лишь тогда можно медленно (в течение нескольких минут) полностью открыть клапан. Следует при этом считаться с опасностью возникновения гидравлических ударов и повреждений фланцевых соединений паропровода и даже самих труб. Поэтому паровую магистраль необходимо прогревать и продувать весьма тщательно и осторожно и соблюдать общее правило управления всеми клапанами: *открывать медленно и закрывать быстро*.

Гидравлические удары возникают, когда быстро открывают клапаны на плохо прогретых паропроводах или краны нижнего продувания котлов, вследствие несжимаемости воды и высокого коэффициента теплопередачи от конденсирующегося пара к холодной стенке. Через открытый клапан поступает с большой скоростью пар. Часть его при соприкосновении с холодными стенками почти мгновенно конденсируется. Вновь прибывающий пар увлекает за собой конденсат и заполняет паропровод быстро несущимися массами воды и пара. В результате возникают повышенные напряжения и разрушаются места с большими местными сопротивлениями: колена труб, фланцевые соединения, участки, где меняется направление потока, и т. д.

Если быстро открывать и закрывать краны продувания котла, возникает явление, подобное описанному, — разрыв водяной струи на части, промежутки между которыми заполняет пар.

Следствием нарушения Правил [10] могут быть аварии, причина которых связана с упуском воды, течью вальцованных соединений и пережогом труб. (Например, пропуски воды в кранах и клапанах водяного пространства котла или фланцах труб, возникшие при подъеме паров и оставшиеся незамеченными.)

Надо сказать, что своевременно обнаружить пропуски воды краном нижнего продувания не всегда возможно. Поэтому при подъеме пара нужно несколько раз проверить правильность показаний водоуказательных приборов и внимательно следить за уровнем воды в котле.

Слишком быстрый подъем паров, сопровождающийся пропуском больших масс относительно холодного воздуха в топку, также может привести к повреждениям кирпичной кладки, перегреву металла и течи вальцованных соединений («простуда» котла).

Плохое проветривание и скопление в топке подтекающего из форсунок мазута могут вызвать взрыв смеси летучих и воздуха, а подтеки мазута на плитах и льялах могут привести к пожару

в котельном отделении. Поэтому нужно следить за тем, чтобы в форсунках не было подтеков, вытирать плиты досуха, регулярно очищать и пропаривать льяла.

Во время подъема паров очень важно не допускать поврежденный пароперегревателя и хвостовых поверхностей нагрева котла — водяных экономайзеров и воздухоподогревателей. При пуске котла необходимо правильно включать пароперегреватель, экономайзер и воздухоподогреватель. Экономайзер при пуске котла отключают. Температура газов до экономайзера в это время не должна превышать 400—500°С. При давлении пара 3—4 кгс/см² приступают обычно к прогреву арматуры и трубопроводов. К этому времени включают питание котла через экономайзер, предварительно открыв воздушные краны на его коллекторах или проверив действие автоматических клапанов для выпуска воздуха.

Особенно внимательно нужно следить за работой пароперегревателя. При подъеме паров пароперегреватель, не охлаждаясь, подвергается действию горячих газов, в результате чего он может перегреться и получить повреждения вплоть до расплавления и горения металла труб.

Температура газов перед установленными на большинстве котлов конвективными пароперегревателями не должна превышать 500°С, а для охлаждения их через пароперегреватель при подъеме паров все время пропускают пар. Для удаления образующегося при этом конденсата краны продувания коллекторов пароперегревателя открывают сначала полностью, затем, при повышении давления в котле, постепенно прикрывают. Полностью закрывать их следует только когда начнется расход перегретого пара.

Большинство современных водотрубных котлов имеет парохладители. Пар для работы вспомогательных механизмов проходит перед парохладителем через пароперегреватель, охлаждая последний. Однако и в этом случае краны продувания на коллекторах пароперегревателей до момента начала работы главных двигателей следует держать слегка приоткрытыми для спуска конденсата.

Выше уже говорилось о возможности образования сажи при подъеме паров. Скопившаяся в воздухоподогревателе сажа при зажигании всех форсунок может вызвать пожар в газоходе. Поэтому необходимо своевременно очищать воздухоподогреватель от сажи и отложений.

Некоторые струи газов в газоходах могут иметь температуру ниже средней. Кроме того, при работе котла на пониженных нагрузках температура уходящих газов вообще невелика. Поэтому там, где в воздухоподогреватель входит холодный воздух, температура стенки труб может оказаться ниже температуры точки росы. В результате неизбежно разъедание труб конденсирующимися парами серной кислоты. Во избежание этого при подъеме паров необходимо принимать меры к тому, чтобы температура не понизилась до точки росы, и пускать уходящие газы в обход воздухоподогревателя, в обходный газоход (байпас). Направлять

газы в воздухоподогреватель следует только убедившись в том, что температура газов перед воздухоподогревателем не ниже 200—250° С.

Установки с утилизационными котлами и сепаратором включают в работу (если в котлах и сепараторе до этого не было воды) в следующем порядке.

После открытия всех необходимых клапанов на котле и сепараторе, последний наполняют до верхнего уровня конденсатом с помощью питательного насоса. После этого импульсную систему регулирования уровня воды в сепараторе тоже заполняют конденсатом, удаляя из нее воздух, и сообщают ее с паровым и водяным пространствами сепаратора.

Затем пускают циркуляционный насос, и питательная вода поступает в утилизационный котел. Сепаратор подпитывают до среднего уровня, затем вручную открывают газовую заслонку и пускают газы из двигателя в котел. По мере разогрева котла продувают водоуказательные приборы и следят за уровнем в сепараторе.

Если при поступлении воды в котел уровень в сепараторе падает, нужно остановить циркуляционный насос. При установлении давления насос снова пускают, сепаратор подпитывают до среднего уровня и приоткрывают наполоборота паровой клапан во избежание его заклинивания.

Если система при длительной остановке была заполнена водой, то последнюю удаляют через клапан продувания аппарата при открытом воздушном кране на котле до тех пор, пока уровень воды в сепараторе не дойдет до нижней отметки.

После проверки работы предохранительных клапанов давление пара доводят до рабочего и включают потребители. Затем установку переводят на автоматическое управление.

При пуске двигателей в начальный период их работы в котлы может быть заброшено топливо и масло. Их следует удалить через специальный кран в нижней части газовой камеры.

На режимах малых нагрузок двигателей рекомендуется подавать выпускные газы в обход котла.

§ 53. Режимы работы

Режим работы судового котла, т. е. его паропроизводительность D (кг/ч) и параметры пара p (кгс/см²) и $t_{п.п}$ (°С), определяется заданной мощностью главных двигателей и расходом пара на вспомогательные механизмы и другие судовые нужды.

Основной ходовой режим — это работа котлов при полной проектной мощности главной силовой установки судна. Отступление от этого режима, как правило, приводит к снижению экономичности эксплуатации установки и повышению удельного расхода топлива.

Неэкономичным режимом является форсирование котла, т. е. его работа при паропроизводительности на 20—30% выше номинальной. При этом возрастают потери тепла с уходящими газами

от химического недожога, снижается к. п. д. котла, загрязняются поверхности нагрева и повышается износ котла из-за увеличения тепловых и механических напряжений в его элементах. К форсированному режиму прибегают только в исключительных случаях, по распоряжению капитана, когда судну угрожает опасность. Каждый случай форсирования котлов фиксируют в вахтенном журнале.

В условиях эксплуатации морского судна встречаются следующие режимы работы судовых котлов:

сниженная паропроизводительность при рабочем давлении пара на малом и среднем ходу судна (при прохождении узкостей, каналов и проливов), ходе буксиров без веза и т. п.;

переменная паропроизводительность при маневрах судна, движении во льдах, спасательных работах и т. д.;

форсированная работа котлов с повышенной паропроизводительностью при особых условиях (шторме, спасательных работах и т. д.);

сниженная паропроизводительность (и часто сниженное давление пара) на стоянках под грузовыми операциями, когда котлы снабжают паром только вспомогательные и грузовые механизмы;

работа котлов на стоянке без грузовых операций (в готовности) и с небольшим расходом пара только на служебные нужды судна (освещение, отопление, подогрев воды);

работа котлов с поддержанием давления пара (горячий резерв), когда пар не расходуется, а некоторое небольшое количество топлива идет на покрытие потерь тепла котлом в окружающую среду.

В соответствии с Правилами [10] режимными состояниями котла являются состояния:

действующее (с момента подъема давления пара в котле выше атмосферного), в том числе стояночное;

поддержания пара (поддержание давления пара в котле выше атмосферного при закрытом стопорном клапане);

эксплуатационное (работа котла при установившихся ходовых режимах судна);

форсированное (повышение паропроизводительности по сравнению с номинальной величиной при давлении пара, не превышающем установленное Регистром СССР);

переменной нагрузки (переменные величины паропроизводительности и параметров пара в зависимости от режима работы главных и вспомогательных механизмов). Этот режим является нормальным для вспомогательных и утилизационных котлов.

С момента ввода котла в действие независимо от режима работы он должен быть обеспечен постоянной вахтой, которая несет всю ответственность за состояние котла.

Режимы поддержания пара можно подразделить на режимы «В готовности», «Горячий резерв» и стояночный.

При режиме «В готовности» давление пара в котле должно быть равно или близко рабочему, а все системы и вспомогательные

механизмы, обслуживающие котельную установку, находиться в состоянии готовности к работе.

Когда котел находится в «Горячем резерве», пар из него не расходуется, но давление поддерживается несколько выше атмосферного, что сокращает срок пуска котла и время его подготовки к работе.

При стояночном режиме пар расходуется на грузовые операции и служебные нужды судна, причем давление пара в котле может быть ниже рабочего. В это время обычно производят мелкий ремонт, очистку и осмотр вспомогательных механизмов и систем, не требующихся по условиям работы судна на стоянке.

Вывод котла из действия, его охлаждение, спуск воды и последующий ввод в работу связаны со значительными напряжениями, возникающими в элементах агрегата при резких изменениях их температуры. Поэтому, если нет нужды в осмотре, очистке или ремонте котла, более рационально держать его в «Горячем резерве» 1—2 суток. Сжигание топлива в этом случае будет компенсировано уменьшением его расхода на подъем пара, а срок службы котла будет удлинён (каждый вывод из эксплуатации и ввод в работу связаны с уменьшением срока службы).

Сказанное не относится к котлам специальной конструкции («Ла Монт» и др.), которые могут быть выведены из действия, если предполагаемые стоянки или снижение нагрузки превышают несколько часов. Такие котлы специально рассчитаны на многократное охлаждение и растопку.

Основное условие экономичной работы котла — правильное ведение процесса горения в топке. Соответствующие указания по рациональному обслуживанию топок были изложены выше.

Для каждой установившейся нагрузки котла существует наиболее выгодный режим горения, при котором обеспечиваются возможно меньшие потери тепла и высший к. п. д., а следовательно, наименьший расход топлива. Такой режим горения при каждой длительной нагрузке котла, устанавливаемый опытным путем, поддерживается автоматическими устройствами и может быть уточнен при теплотехнических испытаниях установки по основным показателям работы котла (давлению и температуре пара, температуре уходящих газов, показаниям тягомеров), а также по периодическому анализу газов.

На многих современных судах имеются приборы, позволяющие непосредственно определять часовой расход пара и топлива. В последнее время на крупных судах устанавливают станции автоматического централизованного контроля параметров и показателей работы ССУ, снабженные различными записывающими устройствами.

Как показывает практика, к. п. д. судового котла в зависимости от качества обслуживания может изменяться на 5—10%. Это означает, что при улучшении обслуживания и при выборе наиболее выгодного режима можно добиться значительной экономии топлива и достигнуть расчетной мощности установки и скорости судна.

Для поддержания установленного режима работы котла, кроме рационального ведения топочного процесса, большое значение имеют управление питанием и регулирование параметров пара. При правильном питании в котел непрерывно и равномерно должна подаваться подогретая вода в количестве, достаточном для поддержания в нем рабочего уровня. Неравномерное питание вызывает нарушение теплового режима работы котла, приводит к колебаниям давления пара. Температура питательной воды может снизиться при включении добавочного питания, когда количество воды, проходящей через подогреватели, увеличивается. При этом снижается и давление пара.

Поддержание рабочего уровня воды обеспечивает надежность работы котла и соответствующее качество пара. При штормовой погоде уровень воды обычно поддерживают несколько выше нормального, чтобы не оголить поверхность нагрева и не сорвать работу опускных труб котла.

Следует, однако, помнить, что при слишком высоком уровне воды в барабане, особенно в штормовых условиях, может произойти заброс воды в пароперегреватель, машину или турбину.

При понижении уровня не всегда следует немедленно усилить питание котла. Например, в котлах с малым объемом воды при резком уменьшении расхода пара (остановке главных двигателей) давление пара растет и объем смеси воды и пара уменьшается. В результате уровень воды резко снижается, но через 3—5 мин при нормальном питании восстанавливается до прежней величины.

При резком увеличении парообразования (переходе на полный ход) наблюдается обратная картина: сначала из-за падения давления пара уровень воды быстро повышается (в результате парообразования в толще воды, увеличивающего объем пароводяной смеси), а затем возвращается к нормальному.

Большинство водотрубных котлов имеет автоматические регуляторы питания, однако это не исключает необходимости в постоянном наблюдении за уровнем воды.

В исправном водоуказательном приборе уровень воды всегда слегка колеблется. Правильность показаний стекол приборов проверяют продувкой (1—2 раза за вахту и в тех случаях, когда ставится под сомнение их исправность, например, при неподвижном уровне). При особых обстоятельствах (отсутствии воды в стеклах, выходе из строя водоуказательных приборов) уровень проверяют с помощью пробных кранов (если они есть).

Если при значительной перепитке котла продуванием трудно определить наличие в стекле воды, нужно перекрыть паровой и водяной краны. Если в стекле вода есть, то уровень под действием силы тяжести воды опустится и будет хорошо виден.

Значительные колебания уровня могут быть следствием неустойчивого давления воды в питательной магистрали, неполадок в работе автоматических регуляторов питания, подрыва предохранительных клапанов или разрушения газонаправляющих перегородок в газоходах котла.

В сепараторах систем с утилизационными котлами уровень воды может сильно колебаться и даже уходить за пределы стекла, что, однако, не нарушает нормальной работы установки. Это происходит при изменении расхода пара, режима дизеля или (в установках с двумя котлами) при включении или выключении второго котла. При изменении положения газовых заслонок уровень воды в сепараторе тоже изменяется и для его стабилизации может потребоваться ручное регулирование питания.

Поддерживать заданные параметры пара необходимо при любых ходовых режимах котла для экономичной работы паросиловой установки. Колебания давления пара по отношению к рабочему не должны превышать $\pm 5\%$. При снижении давления пара увеличивается его расход на работу главных двигателей и для получения заданной мощности приходится сжигать больше топлива. Снижение давления пара вызывает уменьшение мощности главных двигателей и уменьшение скорости судна.

Чрезмерное повышение температуры перегретого пара опасно для металла труб перегревателей и может вызвать в первых ступенях главных турбин перегрев металла.

Управление котлом осуществляется в зависимости от показаний манометров. Автоматические регуляторы горения или положения газовых заслонок получают основной импульс от изменения давления пара в барабане котла или главном паропроводе.

Снижение температуры пара обычно вызывается повышением его влажности или загрязнением пароперегревателя. Следует регулярно проверять щелочность котловой воды и при достижении предельных величин, когда может произойти вспенивание воды, увеличить продувку. Нужно также систематически осуществлять верхнее продувание и не допускать перепитки котла. В противном случае не только повышается влажность пара, но могут возникнуть броски котловой воды в трубопровод.

Необходимо следить за исправностью устройств, обеспечивающих сепарацию пара: дырчатых листов, отбойников, щелевых паросборных труб и внутрикотловых сепараторов.

При вспенивании или вскипании воды в котле уменьшают горение и расход пара, снижают частоту вращения главных машин или турбин и включают верхнее продувание.

Длительное снижение температуры перегретого пара объясняется в основном загрязненностью пароперегревателя. Последний надо регулярно очищать от наружных и внутренних отложений и обдувать.

Температура перегретого пара повышается при снижении температуры питательной воды, так как при этом понижается паропроизводительность котла. Дело в том, что для нагрева более холодной питательной воды до кипения требуется больше тепла; между тем оно остается неизменным при постоянном расходе топлива. Следовательно, количество получаемого пара уменьшится. Одновременно пароперегреватель будет получать такое же количество тепла, как и до снижения температуры питательной воды.

При сниженной паропроизводительности котла это приведет к повышению температуры перегретого пара.

Температура перегретого пара повышается и при уменьшении скорости хода судна, когда снижается расход вырабатываемого котлом пара. Поэтому при остановках судна или значительном снижении скорости хода следует во избежание перегрева пароперегревателя охлаждать его паром, открыв продувочные краны коллекторов, или увеличить расход охлажденного пара (на испарители, палубные механизмы и т. п.).

При повышении температуры питательной воды сверх установленной и постоянном расходе топлива температура перегретого пара понижается.

При ручном или автоматическом регулировании тяги и дутья необходимо регулярно контролировать работу тягодутьевых устройств по измерительным приборам (тягомерам и газогенераторам). Надо следить за тем, чтобы топка работала без излишнего избытка воздуха, вовремя ликвидировать утечку воздуха и газов.

Кроме регулирования дутья и тяги, необходимо также следить за температурой подогрева воздуха, которая должна поддерживаться на расчетном для данного котла уровне. Снижение температуры влечет за собой перерасход топлива.

За температурой подогрева воздуха наблюдают по показаниям термометров, установленных на воздушных рукавах после воздухоподогревателей. Снижение температуры горячего воздуха свидетельствует о загрязнении воздухоподогревателя сажей либо об утечках воздуха через неплотности трубопроводов.

§ 54. Неполадки в работе и их устранение

Неуклонное выполнение правил технической эксплуатации — лучшее средство для предотвращения неполадок и выхода котла из строя. Для того чтобы вовремя обнаружить признаки повреждений и принять необходимые меры для их устранения, вахтенный персонал должен хорошо знать все особенности работы обслуживаемой установки.

Рассмотрим кратко наиболее часто встречающиеся неполадки в работе и меры их устранения.

При появлении выпучин в жаровых трубах огнетрубных или комбинированных котлов необходимо (сообщив предварительно об аварии на мостик и старшему механику) выключить форсунки, прекратить подачу воздуха в топку, убавить питание, отключить котел от магистрали и снизить давление, выпуская пар через предохранительные клапаны. Старший механик должен присутствовать в котельном отделении и непосредственно руководить работами по выводу котла из действия и предотвращению дальнейшего развития аварии.

После вывода из действия и спуска воды котел должен быть предъявлен инспектору Регистра для освидетельствования

независимо от осмотра специальной комиссией пароходства по установлению причин аварии.

Ликвидация последствий такой аварии, как правило, связана с длительным выводом судна из эксплуатации и большими затратами. Поэтому обслуживающий персонал должен обращать особое внимание на чистоту поверхности жаровых труб со стороны воды, так как основная причина появления выпучин — несоблюдение требований водоподготовки и водного режима работы котла.

Упуск воды является частой и весьма опасной аварией. Причиной упуска воды на ходу чаще всего бывают неполадки в работе автоматов питания и недостаточное наблюдение за уровнем. Последняя причина является главной при работе котлов на стоянке, особенно в ночное время. В котлах типа «Ла Монт» часто засоряются шламом отверстия шайб, установленных на входе воды в змеевики, что нарушает циркуляцию.

Если уровень воды еще виден в стеклах водоуказательного прибора, но быстро снижается, необходимо уменьшить горение (подачу топлива и воздуха) и усилить питание котла. При этом следует перейти на ручное управление питанием и при необходимости воспользоваться вторым питательным клапаном и дополнительными питательными средствами. О происшедшем надо немедленно сообщать старшему механику судна и на мостик.

В том случае, если удалось, усилив питание, удержать уровень воды в котле и избежать обнажения поверхностей нагрева, необходимо до восстановления нормального уровня регулировать питание котла вручную. Упуск воды, т. е. снижение уровня в барабане с оголением поверхности нагрева, приводит к тяжелой аварии любого котла и может стать причиной взрыва огнетрубного котла. Поэтому, если принятые меры не помогли и уровень продолжает снижаться или в обоих водоуказательных стеклах после их продувания воды не видно, следует выключить форсунки быстрозапорным клапаном и остановить топливный насос, выключить вентиляторы и дымососы, прекратить питание и, отключив котел от магистрали, открыть с помощью ручного привода предохранительные клапаны для снижения давления пара.

При упуске воды категорически запрещается включать питание, так как подача воды на раскаленные поверхности нагрева приведет к интенсивному парообразованию и может ускорить развитие аварии. Если перерыв в питании продолжался несколько минут и уровень воды затем был восстановлен без видимого ущерба для агрегата, котел необходимо немедленно (а главный котел при первой возможности) вывести из действия и тщательно осмотреть, чтобы своевременно обнаружить возможные следы перегрева, деформации труб, камер и других элементов, находящихся под давлением.

Если произошел упуск воды, то после вывода котла из действия и охлаждения до температуры 60—70° спускают воду, а котел подвергают тщательному внутреннему осмотру. Если при осмотре обнаружены следы перегрева (что видно по измененному цвету

налета накипи, а иногда и металла), то до прихода судна в порт и предъявления котла инспектору Регистра агрегат нельзя вводить в действие. Котел без признаков перегрева можно снова ввести в действие после испытания на рабочее давление, убедившись в том, что при подъеме паров нигде нет течи.

При упуске воды на стоянке судна в порту не разрешается вскрывать котел без представителя пароходства или инспектора Регистра. Данное правило относится также к другим крупным авариям: выпучинам жаровых труб, огневых камер и т. п.

При появлении значительной течи связей или швов огнетрубный котел необходимо вывести из действия. Даже небольшие ремонтные работы по устранению течи (например, чеканка швов) разрешается выполнять лишь после снижения давления пара в котле до нуля. При небольшой течи труб, о которой свидетельствуют следы соли, разрешается эксплуатировать котел при условии поддержания нормального уровня воды. Для этого могут понадобиться усиленное питание и уменьшение нагрузки котла.

Причиной течи труб огнетрубных главных или вспомогательных котлов часто бывает так называемая «простуда», т. е. резкое охлаждение котла при попадании холодного воздуха в топку либо при сокращении времени подъема пара или остывания котла.

При повреждении дымогарных труб (трещин и свищей в стенках) огнетрубный котел обычно не выводят из действия. После уменьшения горения в топках и усиления питания поврежденную трубу заглушают либо деревянными пробками, либо специальными заглушками.

Перегрев испарительных труб чаще всего возникает в ближайших к топке рядах труб, работающих с наиболее высокими тепловыми напряжениями, в результате расстройств циркуляции и попадания в котел масла или при образовании накипи. Первый признак перегрева — покраснение и провисание труб. При сильном перегреве в трубах могут появиться трещины. При этом сначала слышен короткий резкий хлопок и затем сильное шипение и свист пара, давление в котле падает, из дымовой трубы выходит пар. Уровень воды в водоуказательных приборах быстро падает.

При разрыве трубы следует считаться с опасностью выбрасывания пламени из топки и ожогов обслуживающего персонала. При первых признаках перегрева труб необходимо немедленно с помощью быстрозапорного клапана на мазутной магистрали прекратить горение в топке и прекратить питание котла. Затем котел следует отсоединить от магистрали с тем, чтобы он медленно остывал вместе с водой. Пока котел находится еще под давлением, желательно обнаружить поврежденную трубу и проверить соседние, которые могли быть также повреждены выходящей из аварийной трубы струей пара или воды.

После остывания котла воду выпускают; находят поврежденную трубу (при осмотре или путем налива воды) и, в зависимости от обстоятельств, либо заменяют трубу, либо заглушают ее изнутри коллекторов коническими пробками из мягкой стали. Затем котел

заполняют водой и подвергают испытанию на рабочее давление, после чего может понадобиться дополнительная вальцовка соединений труб.

На приложенном к котельной книге плане труб (развертка трубной доски) отмечают условным знаком заглушенную трубу, записывая соответствующую дату. Заглушенные трубы надо при первой возможности заменить, что также должно быть отмечено на плане.

Перепитка котла водой (чрезмерно высокий уровень) может произойти при неисправности водоуказательных приборов или автоматов питания. Чаще всего такие случаи наблюдаются на стоянке. При перепитке возможны повреждения паропроводов, труб пароперегревателя, гидравлические удары в машинах и турбинах и серьезные аварии при попадании в них большого количества воды.

Если обнаружено, что уровень воды в котле значительно выше нормального или «ушел» за верхнюю гайку водоуказательного прибора, следует немедленно открыть краны продувания коллекторов пароперегревателей и продуть водоуказательные приборы. Если при этом уровень понизится, но быстро «уйдет» вверх, нужно уменьшить питание, открыть верхнее продувание и уменьшить нагрузку котла.

Вскипание воды в котлах в настоящее время происходит редко, так как при правильном водном режиме и нормальной эксплуатации котла устраняются причины этого явления. Вспенивание воды (по всей поверхности зеркала испарения) может произойти при содержании в воде ила или масла, при большой плотности воды или чрезмерном количестве вводимого антинакипина. При этом значительные массы пены поступают в паропровод насыщенного пара и пароперегреватель. При перепитке котла или резком увеличении расхода пара может произойти вскипание воды в котле, причем в пароперегреватель будет выброшена значительная масса воды. При вскипании уровень воды в водоуказательных стеклах сильно колеблется.

При вскипании или вспенивании воды принимают такие же меры, как при перепитке котла. После ликвидации последствий вскипания следует установить и устранить его причину: снизить щелочность воды, установить строгий водный режим и т. д.

Повышение давления пара выше рабочего вредно для соединений котла и может стать причиной их повреждения. Давление повышается при неисправности предохранительных клапанов, неправильных показаниях манометра, особенно в случае внезапной остановки главных двигателей на режиме полного хода или форсировании котлов.

При повышении давления пара следует уменьшить или прекратить горение в топках, с помощью ручного привода открыть предохранительные клапаны, стравить пар и усилить питание. Для предотвращения подобных дефектов необходимо поддерживать предохранительные клапаны и манометры в исправности.

Повреждения паропроводов особенно опасны, так как при быстром выходе пара из трубопровода возможны ожоги обслуживающего персонала и упуск воды в котлах. При неисправности главного паропровода необходимо прекратить горение в топках и, усилив питание котлов, отключить поврежденный участок.

Признаком перегрева труб пароперегревателя может быть сильное повышение температуры пара. При этом следует уменьшить горение в топке и перейти на ручное управление горением.

Если снижение температуры пара в общей магистрали представляет опасность для работы турбин, то котел с поврежденным пароперегревателем отключают от магистрали. После отключения пароперегреватель продувают для удаления пара и воды, осторожно (во избежание ожогов) открывают крышки люков коллекторов и заглушают поврежденную трубу или петлю.

При течи труб экономайзера поступают аналогичным образом. Однако горение в топках и нагрузка котла могут быть при отключенном экономайзере и не снижены, так как температура газов в районе экономайзера обычно не превышает 300—400° С.

Нарушения режима дутья и тяги возможны при аварии вентиляторов или дымососов, неисправности систем автоматического регулирования горения, а также при аварийном состоянии воздухоподогревателя. При возникновении дефектов в системах автоматического регулирования следует перейти на ручное управление и устранить неполадки.

При выходе из строя одного из вентиляторов и отсутствии запасного равной мощности интенсивность горения соответственно снижается, так как для сохранения требуемого коэффициента избытка воздуха (для бездымного горения) необходимо уменьшить расход топлива.

Если имеется лишь один вентилятор или все вентиляторы вышли из строя, то котел переводят на естественную тягу и ручное управление.

При потухании форсунок вследствие обводнения мазута следует остановить топливные насосы, прекратить подвод пара к подогревателям мазута, убавить дутье и перевести подачу топлива на другую цистерну, спустив из труб обводненный мазут. Затем нужно открыть циркуляционные клапаны на топливной магистрали, подать пар к подогревателям мазута, подогреть топливо в магистрали, обеспечив его циркуляцию, и снова зажечь форсунок.

Пожары в топке и газоходах котлов происходят в результате того, что после прекращения работы котла на поде топки остается топливо и образуется взрывоопасная смесь. При следующем зажигании, если топка тщательно не проветрена, может произойти взрыв смеси. Иногда такие взрывы происходят и в воздушных каналах при попадании в них топлива.

Наиболее часто выброс пламени и взрыв газов при зажигании топки происходят в вспомогательных котлах теплоходов, так как эти котлы часто тушат и зажигают и они работают на легком топливе. Пожар в котле может произойти и в результате выпуска воды, а также выходе из строя циркуляционных насосов.

Отложения смолистых веществ и сажи на поверхности нагрева котлов, усиливающиеся при форсированном режиме, могут вызвать загорание в хвостовых газоходах, особенно опасное еще и потому, что оно может быть сразу не замечено. Такие же пожары происходят в утилизационных котлах и в их газоходах, где отлагаются смазка и остатки топлива, уносимые выпускными газами из дизеля.

Наблюдались пожары и даже взрывы в длинных, изобилующих коленами дымоходах, сечение которых сильно заносилось отложениями. При таких пожарах часто горит и металл труб котла, особенно если в последнем есть накипь, и котел надолго выходит из строя.

Для самовоспламенения сажи необходимо достаточное количество кислорода и температура, превышающая 160°C . В отложениях есть и катализатор окисления сажи — ржавчина. Это окисление идет сначала медленно, с выделением тепла, затем тепло начинает превышать потери в окружающую среду. Тогда температура повышается и первым загорается содержащийся в отложениях мазут.

Сажа загорается при малых нагрузках, когда сажа свежая и содержит мазут, а высокие величины коэффициента избытка воздуха обеспечивают необходимый для сгорания кислород. То же самое наблюдается и после пуска котла, а также после его останова, особенно если топка слишком долго вентилируется и тлеющая сажа раздувается.

В случае горения труб пароперегревателей во время подъема паров при диссоциации пара и высокой температуре образуются свободные водород и кислород.

Сталь может гореть и в воздухоподогревателях как следствие пожара сажи и проникновения при этом воздуха на газовую сторону воздухоподогревателя.

Пожар в воздухоподогревателе происходит обычно при неисправности воздухоподогревателя, в газовой части которого имеются пропуски воздуха. Для предотвращения пожара следует регулярно (особенно после выхода судна из порта), не реже одного раза в сутки, включать сажеобдувку воздухоподогревателя.

При воспламенении сажи необходимо прекратить горение, плотно закрыть заслонки и топочные регистры и включить паровую обдувку воздухоподогревателя для ликвидации огня. На некоторых судах предусмотрен специальный подвод от системы углекислотного тушения.

Разрушение кирпичной кладки может привести к повреждению труб и каркаса котла. При появлении такой опасности надо немедленно остановить котел. Небольшие повреждения

футеровки, обмуровки и изоляции котла могут быть причиной местного перегрева листов обшивки, что иногда заметно на глаз. При этом рекомендуется уменьшить нагрузку котла.

При выходе из строя водомерного стекла его заменяют, перекрыв краны водоуказательного прибора. За уровнем воды следят по второму прибору и проверяют его каждые полчаса по пробным кранам.

§ 55. Износ и повреждения

Основные виды износа и повреждений судовых котлов (по степени опасности) следующие:

выпучины жаровых труб, трубных досок и стенок огневых камер огнетрубных котлов;

деформации, трещины и разрывы водогрейных труб;

трещины в швах, в местах загиба и отворотов листов огнетрубных и водотрубных котлов;

пропаривание и течь швов, течь труб в местах развальцовки и течь связей;

коррозии металла;

повреждения топочной кладки.

Причинами повреждений котлов могут быть действие механических сил, перегрев и термические напряжения металла, химические и электрохимические процессы, вызывающие коррозию. Это деление условно, так как в работающем котле происходит сложное взаимодействие различных причин, вызывающих повреждения.

Скорость износа, характер и размеры повреждений во многом зависят от качества обслуживания котла и ухода за ним. В практике эксплуатации есть много примеров длительной бесперебойной работы старых котлов, металл которых сохраняет свои механические свойства десятки лет.

Котлы судов, работающих с частыми остановками, чаще нуждаются в ремонте, чем котлы судов дальнего плавания, у которых давление пара долго поддерживается постоянным. Расстройство швов может происходить постепенно при колебаниях давления пара в котле в результате неправильного обслуживания топки.

Неравномерное распределение напряжений не ограничивается швами. Оно распространяется на плоские стенки и переходы между деталями котла. При этом увеличиваются также напряжения изгиба, ведущие к образованию опасных трещин по кромкам швов.

Повреждения металла могут быть вызваны небрежным или неумелым выполнением некоторых работ, связанных с поддержанием котла в рабочем состоянии, например при чеканке швов. При очистке накипи ударным инструментом опасны насечки металла, увеличивающие коррозию стали и местные напряжения, что приводит к появлению мелких трещин. В местах пропаривания (прокладки горловин и фланцев, швов) металл разъедается струей пара, особенно быстро в котлах повышенного давления. Такое

же разъедание встречается в местах удара в водогрейные трубы струи пара из сажеобдувателей.

Выпучины плоских стенок, сопровождающиеся обрывом связей, проседанием жаровых труб огнетрубных и деформацией водогрейных труб водотрубных котлов, экранных коллекторов и секционных камер, при дальнейшем развитии могут вызвать разрывы стенок.

Размеры выпучин, т. е. проседаний жаровых труб и прогибов плоских стенок, влияют на прочность котла. Предельно допускаемые величины стрел прогиба и уменьшения диаметра жаровых

труб ограничены Правилами Регистра СССР. Машинная команда судна должна постоянно следить за величиной проседания жаровых труб, регулярно измеряя их диаметр и определяя по имеющимся шаблонам стрелы прогиба плоских стенок. Шаблоны изготовляют из малоуглеродистой тонколистовой стали.

Деформации жаровых труб, наблюдающиеся у многих огнетрубных котлов, не опасны до тех пор, пока не превышают величин, допускаемых Правилами Регистра. Для проверки деформации измеряют штихмасом разность диаметров трубы по четырем направлениям, расположенным под углами 45° друг к другу, на каждой волне по гребню. Данные обмеров вносят в особые бланки и сравнивают с предыдущими. Абсолютная величина разности не должна превышать 3% диаметра. Для выпучин плоских стенок котла допускаемая величина стрелы прогиба не должна превышать толщины стенок.

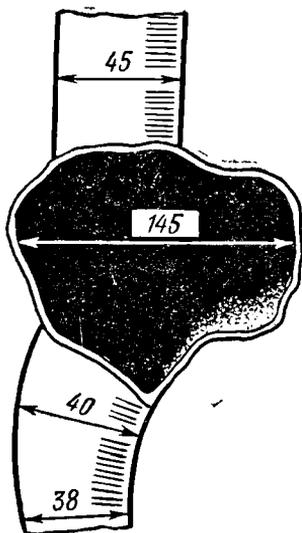


Рис. 124. Вид разрыва водогрейной трубы

Прямому перегреву в водотрубных котлах сильнее всего подвергаются первые ряды труб, воспринимающие лучистое тепло. Перегрев может быть следствием форсировки котла, образования в нем накипи, наружной циркуляции в трубах или газового перекоса. Последний может происходить при смещениях факела и плохом распыле, вызывающих коксование или занос труб отложениями, перегрузку других труб и местные нарушения циркуляции.

Деформацию трубы определяют с помощью угольника или натянутой струны, измеряя расстояние от струны до стенки трубы. Стрела прогиба не должна превышать двух диаметров.

Для определения выпучины водогрейной трубы кронциркулем измеряют два ее диаметра — во вздутом месте и в неповрежденном (обычно вблизи коллектора). Величина выпучины не должна превышать 5% диаметра трубы. При сильном вздутии водогрейная труба разрывается. В месте разрыва значительно увеличивается размер трубы и образуются тонкие острые кромки (рис. 124).

Перегрев пароперегревателя может быть вызван малой скоростью движения пара в его трубах, заносом воды с последующим отложением солей или неравномерным распределением тепла, воспринимаемого трубами (тепловой перекос). Неравномерное распределение температур и скорости газов по сечению газохода (газовый перекос) является причиной неравномерного распределения температуры металла стенок и тепла, передаваемого поверхности нагрева.

Тепловая неравномерность может быть выражена коэффициентом неравномерности:

$$k_n = \frac{q_{\max}}{q_0},$$

где q_{\max} — удельное тепло, передаваемое трубе с наибольшим обогревом;

q_0 — среднее удельное тепло по всем трубам газохода, ккал/м²·ч.

По данным опытов в нормальных условиях $k_n = 1,3 \div 1,5$, а при нарушении этих условий (расцентровке форсунок, плохом горении, неравномерном заносе отложениями труб самого пароперегревателя и пучка труб перед ним, повреждениях перегородок в газоходах) может достигнуть больших значений.

Кроме названных причин, перегрев пароперегревателя может быть результатом повышения температуры пара на выходе из труб при малых нагрузках, во время маневров, при уменьшении температуры питательной воды (отключении экономайзера) и чрезмерном повышении коэффициента избытка воздуха (см. § 26). При перегреве труб на обеих сторонах стенок пароперегревателя образуется окалина. Затем появляется сетка мелких трещин и начинается ползучесть металла, в результате чего постепенно увеличивается диаметр труб. Поэтому следует периодически проверять, соответствует ли диаметр труб требуемому.

При плохой конструкции крепления трубы пароперегревателя в эксплуатации часто провисают в результате перегрева. Извлечь такие трубы весьма трудно; для этого нужно вырубать часть водогрейных труб котла. Так как до сих пор пароперегреватель остается наименее надежной частью котельного агрегата, то предохранению его металла от перегрева следует уделять большое внимание.

Для улучшения распределения газов в настоящее время применяют так называемое потолочное (верхнее) расположение форсунок, а для уменьшения отложений сажи — паромеханические форсунки, увеличенные объемы топок и развитые системы обдувки сажи.

Пароперегреватели разбивают на последовательно включенные секции, что уменьшает приращение температуры пара в каждой секции и улучшает сажеобдувку. Последнюю по ходу пара секцию включают по прямоточной схеме, что позволяет понизить (по сравнению с противоточной схемой) температуру металла труб.

Дополнительные напряжения, возникающие вследствие разности температур, влияют на износ огнетрубных котлов. Эти напряжения могут достигать значительных величин при переменной нагрузке или подъеме паров котла.

Разность температур отдельных частей огнетрубного котла при подъеме пара за несколько часов может составлять 50—60°С с резко выраженной границей на высоте жаровых труб. Это вызывает нарушение плотности швов, течь труб и связей, трещины на волнах и отворотах жаровых труб, жестко зажатых между днищем котла и огневой камерой.

При быстром подъеме пара или охлаждении бочка котла неравномерно деформируется, вследствие чего может появиться течь в ее поперечных швах. Водотрубные котлы подвержены тепловым деформациям меньше, чем огнетрубные, но и у них наблюдается течь в соединениях труб.

В секционных котлах с прямыми трубами неодинаковые и переменные тепловые удлинения нижних и верхних рядов вызывают напряжения от продольного сжатия. Следствием этого, кроме расстройства соединений, могут быть погибь труб и образование трещин в результате усталости металла. Погибь возникает также при сжатии труб в обмуровке или перегородках, когда исключена возможность теплового удлинения.

Особенно опасны поперечные или кольцевые трещины в развальцованных концах водогрейных труб, появляющиеся в результате наклепа и старения металла при повторных развальцовках. Такие трещины возникают также в том случае, когда зажатые секционных камер или погибь барабанов препятствует свободному расширению труб. Причиной кольцевых трещин в подъемных неохлаждаемых опускных трубах может быть их различная жесткость при подсоединении к одним и тем же коллекторам.

Обнаруженные препятствия, мешающие свободному удлинению или перемещению труб при нагреве, необходимо устранять.

Температурные напряжения играют главную роль в развитии износов и повреждений котлов. Технически грамотное обслуживание котлов ослабляет износ и сводит его к медленному, естественному процессу, продолжающемуся многие годы.

Котел подвергается также коррозионному износу.

Естественный износ металла под действием химической и электрохимической коррозии обычно невелик, и при правильной эксплуатации и хранении котел может работать десятки лет. Однако коррозионные процессы могут протекать намного быстрее и при соответствующих условиях вывести котел из строя.

Присутствие в котловой воде кислорода способствует развитию «оспенной» коррозии — небольших углублений, заполненных ржавчиной. Оспины хорошо обнаруживаются при тщательной очистке стенок котла. Отдельные оспины превращаются в дальнейшем в раковины, а затем в сквозные трещины и свищи. В результате коррозии уменьшается толщина листа стали на большой площади.

Аналогичные разъедания встречаются на границе парового и водяного пространств барабанов котлов, в местах ввода питательной воды, трубных досках и т. д. Разъедание способствует образованию выпучин стенок в ослабленных местах. Образование мелких трещин под влиянием механических и температурных напряжений усиливает коррозию металла. Если глубина местных разъеданий превышает 30% первоначальной (расчетной) толщины листа или стенки трубы, то котел не разрешается эксплуатировать.

Газовая коррозия поверхностей нагрева котла происходит вследствие непосредственного окисления стали кислородом, находящимся в дымовых газах с высокой температурой. В местах скопления золы, влаги и при сжигании сернистых топлив газовая коррозия усиливается.

На общую надежность котельного агрегата значительное влияние оказывает надежность огнеупорной обмуровки. Часто последняя выходила из строя через 2000 ч, а объем ее ремонта составлял до 15% объема ремонта котла.

Повреждения котлов устраняют обычно на специальных заводах, имеющих соответствующее оборудование. Небольшие повреждения элементов котла могут быть исправлены силами машинной команды судна.

Места, пораженные неглубокой коррозией, после зачистки стальными щетками закрашивают свинцовым суриком или графитом. Более глубокие разъедания можно восстановить электронаплавкой стали или сваркой заплат. Оспины и раковины глубиной не более 3 мм также заделывают электросваркой.

Основная работа при ремонте водотрубных котлов — смена испарительных труб. В большинстве случаев трубы сразу не заменяют, а заглушают и продолжают эксплуатировать котел до тех пор, пока не будет заглушено определенное количество поврежденных труб.

Трудность замены труб объясняется тем, что часто приходится вырезать неповрежденные трубы, чтобы обеспечить доступ к заменяемым. Для удаления трубу можно обрезать у коллекторов труборезом или газовым резаком либо разрубить зубилом в двух местах, загнуть внутрь вырубленный кусок и выколотить трубу специальной болванкой (выколоткой) и кувалдой.

Новые трубы выгибают по шаблону и очищают. Затем развертывают отверстия (очки) в трубных досках, заводят трубы и развальцовывают их концы. Перед пуском котла все трубы тщательно осматривают и проверяют прокаткой стальным шариком диаметром, на 10% меньшим внутреннего диаметра трубы.

§ 56. Планово-предупредительные осмотры и освидетельствования

Исправное техническое состояние котлов обеспечивается техническим обслуживанием (ТО), которое осуществляется по планам-графикам, разработанным судовым экипажем. Кроме того, все котлы, установленные на судах морского флота, подлежат

регулярным осмотрам и освидетельствованиям соответствующей бассейновой инспекцией Регистра СССР. ТО котла включает периодические очистки, промежуточные и ежегодные внутренние осмотры, наружные осмотры котла под паром и подготовку к предъявлению котла Регистру в сроки, указанные в шнуровой книге котла.

При наружном осмотре котла под паром проверяют состояние кожуха и гарнитуры, плотность горловин и арматуры. Во всех соединениях контролируют плотность обшивки кожуха, уплотняя щели, проржавевшие места и недостаточно хорошо закрывающиеся дверцы и крышки. Затем осматривают швы, заклепки и загибы листов коллекторов, бочек и днищ, особенно там, где может скапливаться влага, т. е. в нижней части котла, под топками, лазами и у опор, здесь следует искать трещины, раковины и течь (о последней свидетельствуют отложения солей желтого цвета — ржавчина).

Осматривая воздухоподогреватель, надо проверить, нет ли трещин в трубных досках и неплотностей в соединениях труб.

При осмотре топок обращают внимание на состояние швов и отворотов, где чаще всего возможны разъедания и трещины.

Раз в два месяца проверяют жаровые трубы штихмасом и плоские стенки котла по шаблонам.

В огневых камерах осматривают швы, гайки и головки связей. Концы трубок на задней трубной доске могут давать течь, о чем свидетельствуют отложения соли. Тщательно надо осматривать потолки огневых камер для своевременного обнаружения следов упуска воды.

В водотрубных котлах осмотр начинают с трубок нижних рядов, измеряя их прогиб по струне. Для наблюдения за развитием износа все трубки необходимо пронумеровать на специальном упрощенном эскизе котла.

Перед внешним осмотром секционных камер надо тщательно очистить места между ними с тем, чтобы обнаружить и устранить ржавчину и отложения цементированной сажи. Секционные камеры при удлинении водогрейных труб смещаются, поэтому задние камеры жестко не закрепляют. При разном нагреве труб или препятствиях для их теплового расширения величины смещения камер будут неодинаковыми. Это может вызвать их деформацию, а также трещины и погибы прикрепленных к ним труб. Величину деформации периодически проверяют по сдвигу прикрепленных к секционным камерам стрелок относительно отметок на каркасе котла, а также по изменению расстояния между кернами, выбитыми на каждой из четырех угловых секционных камер.

После очистки и промывки котел осматривают изнутри. Все клапаны парового и водяного пространств должны быть плотно закрыты и завязаны проволокой. К каждому из них должна быть прикреплена табличка с надписью «В котле люди».

При внутреннем осмотре применяют электрические переносные лампы обычного постоянного тока напряжением не более 24 В

во избежание поражения током работающих в котле. Запрещается брать с собой паклю, обтирочные материалы и предметы, которые могут случайно попасть в отверстия труб и закупорить их.

В огнетрубных котлах осматривают бочку в районе уровня воды; здесь наиболее вероятно появление оспин и раковин. Затем переходят к потолкам огневых камер, где могут быть выпучины и разъедания анкерных болтов. Измеряют диаметры связей котла и сравнивают их с первоначальными. Целостность гаек связей определяют обстукиванием ручником массой 400—500 г. При осмотре трубных досок следует искать признаки разъеданий на загибах вокруг труб и связей.

Периодическое наблюдение за состоянием коллекторов водотрубных котлов — обязательное условие правильного ухода за ними. В первую очередь нужно искать признаки коррозии наружных частей, которые часто скрыты кладкой, изоляцией или обшивкой. Следует проверить с помощью приваренных к барабанам стрелок (реперов) и соответствующих отметок на каркасе котла возможность свободного теплового расширения барабанов, а также величину их прогиба в горячем и холодном состояниях. Не устраненная при повторных вальцовках течь труб также указывает на прогиб коллектора.

При внутреннем осмотре следует тщательно проверить крепления внутрибарабанных устройств (сепараторов, паросборных и питательных труб, воронок верхнего продувания и т. д.) и очистить их от накипи и шлама. Повреждения этих устройств, в том числе коррозия и разъедание, следует немедленно устранить.

Особенно внимательно надо осматривать питательную трубу, помня, что ее неплотность вызывает коррозию барабана. Осматривая коллектор, нужно проверить состояние металла в районе уровня воды. В этих местах могут появиться не только коррозия, но и следы масла и мазута (масляный пояс), свидетельствующие о недостаточной очистке питательной воды и неисправности верхнего продувания котла.

Перед постановкой на место после осмотра крышек горловин рекомендуется с помощью зеркала проверить их гнезда и очистить от остатков старых прокладок. Даже небольшие царапины и забоины на поверхности гнезд могут вызвать течь или пропаривание лючков и горловин, которые быстро увеличиваются и вызывают более серьезные повреждения котла.

Испарительные трубы осматривают изнутри с помощью электрической лампочки. Ее спускают внутрь трубы на проводе или устанавливают в противоположном коллекторе напротив трубы. При изогнутых трубах рекомендуется продувка сжатым воздухом и прокатка шариком после ремонта или очистки от накипи.

При осмотре топки обычно проверяют, нет ли трещин, щелей, усадки, вывалившихся и выщербленных кирпичей в футеровке. Осматривая перегородки в газоходах, необходимо убедиться в том, что в них нет отверстий или щелей, через которые могут проходить газы.

Кроме осмотров, проводимых судовым персоналом не реже раза в три месяца, все судовые котлы подвергают в присутствии инспектора Регистра СССР ежегодным наружным осмотрам под паром, проверяя действие предохранительных клапанов, и ежегодным внутренним освидетельствованиям с проведением при необходимости гидравлических испытаний. Кроме того, инспектор Регистра может потребовать проведения внеочередных осмотров, освидетельствований и гидравлических испытаний при появлении серьезных дефектов (например, после пуска воды, аварий и т. д.).

Котлы судов, имеющих класс Регистра СССР, подвергают ежегодным освидетельствованиям.

Перед внутренним освидетельствованием удаляют топочную кладку и частично снимают изоляцию (на швах). Котел очищают от накипи и сажи.

После осмотра и освидетельствования котел допускают или не допускают к эксплуатации. Одновременно инспектор Регистра указывает (или подтверждает) допускаемое рабочее давление пара в котле.

При наружном осмотре под паром инспектор Регистра обращает внимание на состояние видимых поверхностей котла, проверяет действие манометров и арматуры. Предохранительные клапаны проверяют на подрыв и регулируют. После этого один из клапанов инспектор Регистра СССР пломбирует. Пружину второго клапана оставляют без пломбы с тем, чтобы в случае неполадок можно было в любой момент снизить рабочее давление пара в котле.

Гидравлическое испытание проводят только после внутреннего освидетельствования котла в сроки, установленные Регистром, или после замены ответственных деталей. Это испытание необходимо для выявления скрытых и трудно обнаруживаемых при обычных осмотрах дефектов, например неплотности швов, заклепок, развальцованных труб и т. д. При этом котел отделяют от всех трубопроводов и арматуры заглушками и полностью заполняют водой с температурой не ниже $+5^{\circ}\text{C}$ до выхода ее из воздушного крана. К рабочему манометру присоединяют контрольный. Водоуказательные приборы также отключают.

Котел предварительно готовят к осмотру, для чего частично удаляют обмуровку и изоляцию (например, у швов) и подводят низковольтное освещение. Затем медленно поднимают давление с помощью ручного водяного насоса или насоса с аккумулятором давления. При достижении рабочего давления заклинивают предохранительные клапаны и продолжают повышать давление до избыточного (пробного). Величину пробного давления устанавливает инспектор в соответствии с Правилами Регистра СССР. Она зависит от типа котла, характера ремонта и вида гидравлического испытания, проводимого совместно для пароперегревателя, арматуры, трубопровода или отдельно для каждого агрегата (котла, пароперегревателя и т. д.).

Пробное давление поддерживают 5—10 мин. При этом следует соблюдать тишину и прислушиваться к характерным звукам, по

которым можно определить отрыв головок заклепок, разрыв связей или труб и т. д. Затем давление постепенно снижают до рабочего, производят тщательный наружный осмотр котла и после этого — внутреннее освидетельствование.

Котел считается выдержавшим гидравлическое испытание, если в нем нет обрыва связей, трещин, течи и оставшихся после испытаний деформаций. При появлении капель на поверхности сварных швов котла считается не выдержавшим испытания.

После ремонта пробное давление устанавливается по указанию инспектора Регистра, наблюдавшего за ремонтом котла.

В зависимости от результатов гидравлического испытания инспектор Регистра может запретить эксплуатацию котла или до устранения обнаруженных дефектов снизить допускаемое рабочее давление. По требованию инспектора Регистра в котле делают контрольные сверления для определения толщины изношенных стенок и вырезают контрольные образцы для определения изменений структуры и прочности стали за время службы котла. При вырезке образцов нельзя трогать (ударять, стачивать и т. д.) поверхности образца со стороны воды и газов.

Трубопроводы и арматуру котельного отделения подвергают гидравлическому испытанию в сроки, установленные Правилами Регистра СССР. При освидетельствовании, помимо наружного и внутреннего осмотров, проверяют надежность крепления котлов на седлах и фундаментах, состояние арматуры, наличие штатных контрольно-измерительных приборов и свидетельств их проверки, действие вспомогательных механизмов и систем котельного отделения.

Результаты осмотров и освидетельствований, допускаемое рабочее давление пара, перечень работ, необходимых для устранения обнаруженных дефектов, и сроки их выполнения фиксирует инспектор Регистра в шнуровой котловой книге.

Гидравлическое испытание на рабочее давление может быть произведено и по решению старшего механика. В котельной книге и записях во время осмотров накапливаются различные данные, на основе которых механик составляет ремонтную ведомость. Кроме записей в котловых книгах, механик использует акты осмотров, нормы допускаемого износа и требования, предъявляемые различными органами надзора (Регистром СССР, санитарной инспекцией, пожарной охраной).

Одновременно с ведомостью на заводской ремонт составляют особую ведомость по ремонту силами команды. В нее входят также необходимые для заводского ремонта операции по разборке и сборке деталей котла, выполняемые командой.

§ 57. Уход за арматурой

Перестановку крышек горловин и люков, смену водомерных стекол и ремонт арматуры выполняет судовая команда.

Течь крышек горловин и люков появляется вследствие перекосов при их постановке и зажатий, разъедания гнезд и эрозии (в результате местных пропусков пара).

Тарелки клапанов притирают к седлам с помощью толченого стекла и пасты ГОИ. При сильном износе и раковинах клапан протачивают на станке. Гнездо клапана можно также проточить на месте особой шарошкой. Клапан считается притертым, если по всей окружности появился сплошной матовый ободок.

Неплотность предохранительных клапанов обнаруживают по звуку (шипению) перед их открытием и дребезжанию при падении давления. Такой дефект может быть следствием изменения величины подъема клапана после повторных притирок. Поэтому, если клапан работает удовлетворительно, его не следует разбирать.

Важное значение при ремонте клапана имеют правильная набивка и затяжка уплотнений. Для водяных клапанов при температуре не выше 100°C применяют плетеную пеньковую просаленную набивку, а при более высокой температуре — плетеную бумажную. При давлении пара до 16 кгс/см^2 применяют для малых штоков асбестовый шнур, при больших давлениях — асбестовую набивку с тальком или графитом. Чем больше плетений в набивке, тем она прочнее. Размер стороны квадратной или диаметр круглой набивки 10—20 мм.

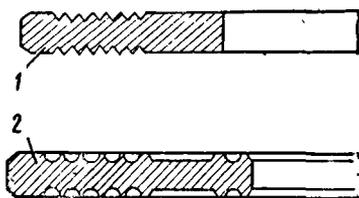


Рис. 125. Металлические гребенчатые прокладки

Прокладки бывают мягкие, полуметаллические и металлические. Для мягких прокладок используют листовый материал: клингерит и паронит. Клингерит в листах состоит из асбеста (70%), натурального каучука (10%) и минеральных заполнителей (20%). Клингеритовые прокладки применяют для подавляющего большинства судовых котельных установок.

Более дешев, но менее прочен паронит, содержащий 65% асбеста, 10% синтетического каучука и 15% каолина и другие заполнители.

Полуметаллические прокладки в виде готовых штампованных колец из прорезиненной асбестовой ткани с медной оболочкой ставят на лючках секционных котлов и на фланцах.

Металлические прокладки предназначены для арматуры повышенного давления. Их изготавливают из листовой красной меди или медноникелевого сплава. В последнее время на трубопроводах, по которым проходит пар повышенного давления, ставят точеные прокладки из малоуглеродистой стали (рис. 125), обычные — 1 и снятыми острыми кромками — 2.

При выводе котла из действия необходимо следить за тем, чтобы вся паровая арматура и трубопроводы были осушены, так как конденсация пара и скопление влаги способствуют интенсивной коррозии. При выводе из действия на большой срок всю арматуру снимают, маркируют по наварышам и фланцам и консервируют.

§ 58. Вывод из действия

Котлы выводят из действия в соответствии с Правилами [10].

Перед продолжительной стоянкой намечают, какие котлы и в каком порядке будут выведены из действия. До остановки котла производят интенсивную сажеобдувку (или банение труб в оборотных котлах), продувку, уменьшают интенсивность горения, отключают систему автоматики и переходят на ручное управление котлом. Затем гасят последовательно форсунки и отключают котел от магистрали или от выпускной системы дизеля.

Давление пара в котлах на мазутном отоплении спускают через 2 ч после выключения форсунок. Пар идет на судовые нужды, работу испарителей и других вспомогательных механизмов. Спуск воды из котла разрешается только при остывании ее до температуры 50° С. После спуска воды приступают к очистке котла и его ремонту, как было указано выше.

При выводе котла из действия чем медленнее будет охлаждаться котел, тем лучше; это позволит избежать излишних термических напряжений в футеровке и металле котла, что особенно важно для неэкранированных котлов и котлов с большим водосодержанием (огнетрубных, секционных) при жесткой конструкции последних.

Запрещается искусственное охлаждение котла путем спуска воды при давлении пара в котле, вентиляции газоходов, дополнительного питания котла относительно холодной водой и т. п.

Продолжительность охлаждения котлов (до температуры 50° С) регламентируется инструкциями заводов-изготовителей и Правилами [10].

Немедленный вывод котла из действия необходим при таких чрезвычайных обстоятельствах, как упуск воды, появление в котле трещин, выпучин жаровых труб, разрывов водогрейных труб и т. п. При появлении течи вопрос о возможности дальнейшей работы котла решает старший механик в зависимости от интенсивности течи и условий плавания судна. В случае острой необходимости воду из водотрубных котлов разрешается удалять через нижнее продувание при давлении пара до 5 кгс/см².

При выводе котлов из эксплуатации на длительный срок (свыше трех суток для водотрубных и шести для огнетрубных) должна быть обеспечена их сохранность, т. е. предупреждение развития стояночной коррозии. Борьба со стояночной коррозией особенно важна для судов, у которых по условиям плавания имеются частые перерывы в работе, для судов, работающих только в период летней навигации, и некоторых судов специального назначения. Для подавляющего большинства транспортных судов, работающих в течение всего года (от одного очередного освидетельствования до другого), вопросы стояночной коррозии котлов являются относительно второстепенными.

Несоблюдение правил длительного хранения (консервации) котлов приводит к интенсивной коррозии их элементов, причем

образовавшиеся участки интенсивной коррозии способствуют увеличению скорости коррозии и после ввода котла в действие. Каждый вывод котла из действия равноценен по уменьшению общего срока службы котла нескольким сотням часов нормальной эксплуатации.

Тщательная очистка котла обязательна перед постановкой котла на длительное хранение.

В настоящее время существуют «мокрый» и «сухой» методы хранения котлов и их элементов.

При «мокром» методе температура в котельном отделении не должна быть менее 0°C . Обычно «мокрое» хранение применяют на относительно короткие сроки (до 30 суток) по Правилам [10].

Котел, пароперегреватель и экономайзер предварительно заполняют полностью деаэрированной водой, создав фосфатное число около 100 мг/л и нитратное до 100 мг/л. После заполнения котла нагревают воду до кипения для удаления воздуха и закрывают воздушный кран, выключая форсунку.

К котлу подключают расширительный бачок, установив в нем уровень выше верхней точки консервируемых элементов котлоагрегата путем некоторого подпитывания котла. После этого регистры дымоходов и воздухонаправляющих устройств плотно закрывают. При этом нужно периодически контролировать состав котловой воды и при необходимости добавлять фосфаты. Для более глубокого обескислороживания воды рекомендуется после кипячения добавить в нее гидразин Na_2H_4 (150 мг/л), который связывает свободный кислород и сообщает воде щелочную реакцию.

При кратковременной остановке двигателей утилизационные котлы оставляют полностью заполненными водой, а сепаратор — до среднего уровня. Если двигатель не будет работать более суток то рекомендуется полностью заполнить водой и сепаратор.

Если при работающем двигателе потребность в паре отсутствует, то утилизационные котлы содержат без воды при полностью заполненном водой сепараторе.

При выводе главных и вспомогательных котлов из действия на срок более месяца применяют «сухую» консервацию котла с предварительной его очисткой.

Поверхность нагрева котла с газовой стороны покрывают горячим малосернистым мазутом, что в дальнейшем способствует снижению сернистой коррозии и уменьшению отложений при вводе котла в эксплуатацию.

Котел сушат путем установки в топке, коллекторах и барабанах жаровней с горящим древесным углем. В осушенном и проветрированном котле помещают наполовину заполненные противни с негашеной известью (2 кг на 1 м^3 объема пароводяного пространства), хлористым кальцием (0,5 кг на 1 м^3) или силикагелем (3 кг на 1 м^3), предварительно прокаленным в течение 3—4 ч при температуре $170\text{—}180^{\circ}\text{C}$ (силикагель меняет цвет). После установки противней с влагопоглотителем котел тщательно

герметизируют. Состояние влагопоглотителей проверяют один раз в 1—3 месяца.

При постановке котла на сухое хранение на срок более трех месяцев поверхности нагрева с газовой стороны консервируют горячим мазутом, а наружные поверхности окрашивают, льяла и пространство под котлами очищают и окрашивают суриком.

Арматуру и контрольно-измерительные приборы (КИП) обычно полностью снимают, маркируют по номерам заглушек на фланцах и консервируют отдельно (в ящиках).

§ 59. Борьба с коррозией и загрязнением поверхности нагрева с газовой стороны

Поддержание в чистоте поверхности нагрева судового котла — основа его надежной и экономичной эксплуатации.

Загрязнение поверхности нагрева сажей и золой является причиной снижения паропроизводительности котла и температуры пара, нарушения циркуляции, перегрева стенок труб, пожаров в газоходах.

Отложения сажи и золы, создающие большие сопротивления переходу тепла от газов к трубам котла, вызывают значительный перерасход топлива (примерно на 1,5—2% на каждые 0,5 мм толщины отложений сажи).

Коррозию металла с газовой стороны поверхности нагрева можно разделить на высокотемпературную и низкотемпературную.

Высокотемпературная коррозия происходит при температурах металла выше 510°C , т. е. может встретиться преимущественно в пароперегревателях. Она вызывается отложениями на металле расплавленной пятиоксида ванадия V_2O_5 , содержащейся в золе мазута. Соли натрия в золе усиливают эту коррозию, способствуя понижению температуры плавления V_2O_5 . Пятиокись ванадия пристает к металлу и, остывая, отдает ему кислород, превращаясь в V_2O_4 .

Ванадиевой коррозии сопротивляются стали, содержащие хром, из которых изготовляют подвески пароперегревателей и трубы секций, находящихся в зоне наиболее высокой температуры пара.

Низкотемпературную коррозию можно разделить на стояночную и сернистую.

Стояночная коррозия происходит при бездействии котла, когда металл и отложения на нем золы и сажи адсорбируют воду и кислород из атмосферы или на них попадает влага при течи котла. Эта коррозия усиливается под влиянием находящихся в золе соединений натрия. Она поражает преимущественно нижние участки экранных труб и труб конвективных пучков. Очаги коррозии заполняются массой Fe_2O_3 , которая затем при работе котла восстанавливается под действием нагрева в FeO , действуя как окислитель, продолжающий коррозию.

О сернистой коррозии, поражающей металл в зонах относительно низких температур (водяной экономайзер, воздухоподогреватель), уже упоминалось в гл. VII.

При горении содержащейся в мазуте серы образуется SO_2 . Затем в уходящих газах происходит конверсия части SO_2 в SO_3 . Для этого необходимо наличие в газах свободного атомарного кислорода, образующегося в топке под действием высокой температуры. SO_3 , соединяясь с присутствующими в уходящих газах парами воды, дает пары серной кислоты ($SO_3 + H_2O = H_2SO_4$).

Если температура поверхности нагрева ниже температуры точки росы серной кислоты, то на металле в результате конденсации паров образуется пленка водного раствора серной кислоты, вызывающая весьма интенсивную коррозию, что может вывести экономайзер или воздухоподогреватель из строя за несколько месяцев.

Точка росы зависит от содержания в топливе серы и воды и от содержания в уходящих газах свободного кислорода. При температуре уходящих газов около $140^\circ C$ или при температуре металла около $120^\circ C$ и ниже уже существует опасность сернистой коррозии.

Для борьбы с низкотемпературной коррозией хвостовых поверхностей нагрева используют различные антикоррозионные материалы (жароупорное стекло для труб воздухоподогревателей) и покрытия (фторопласт). Кроме того, применяют такую компоновку, которая исключает снижение температуры металла ниже точки росы. Для этого воздух на малых нагрузках котла и при низкой температуре уходящих паров пускают в обход воздухоподогревателя, чтобы не охладить стенок, или предварительно подогревают питательной водой.

Среди эксплуатационных мероприятий следует отметить работу топки при малых значениях α (для снижения содержания свободного кислорода в уходящих газах) и различные присадки (например, щелочные соединения, вводимые в дымовые газы). Присадки, в том числе отечественные составы ВНИИНП (разработанные Всесоюзным научно-исследовательским институтом нефтяной промышленности), содержат вещества, препятствующие конверсии SO_2 в SO_3 и нейтрализующие кислотную реакцию на поверхности металла. Однако эти присадки не всегда эффективны.

Отложения, образующиеся на поверхности нагрева с газовой стороны, можно разделить на кокс, сажу и золу. Кроме того, в них присутствуют продукты коррозии — окислы железа, смолистые вещества и иногда мазут.

Кокс образуется в топке при ударах факелов форсунок об обмуровку и относительно холодные трубы при плохом распыле и больших величинах коэффициента избытка воздуха, что способствует охлаждению топки (малые нагрузки).

Сажу является продуктом неполного сгорания.

Зола состоит из комплексов щелочно-сульфатных солей, которые при высоких температурах металла плавятся, прилипают к поверхности и на ней цементируются.

При эксплуатации современных мощных котлов, в топках которых сжигаются большие количества мазута, очень важно не допустить образования отложений. В последнее время при постройке котлов обращают особое внимание на то, чтобы газоходы были достаточно свободными и в них не было мест застоя газов. Например, в пароперегревателях применяют коридорное расположение труб вместо шахматного, увеличивают шаг труб пучков, не повышают скорость газов более 10 м/с. Кроме того, обязательно устанавливаются многочисленные сажеобдуватели, устраивая пазухи для их размещения. Новейшие котлы снабжают также люками в обшивке для ручной очистки сажи.

При эксплуатации особенно важно улучшать качество горения (проверять качество распыла, исправность автоматики горения, работать с короткими факелами). В этом отношении, как было указано, преимущества имеет паромеханический распыл.

На отечественных паровых судах успешно применяют для разводки огня и подъема пара, при которых обычно образуется много сажи и смолистых отложений, флотский мазут. Иногда мазут отмывают от солей натрия пресной горячей водой с последующей сепарацией воды.

Введение в топливо специальных присадок типа ВНИИ-НП, зарубежных солевых флюсов, понижающих температуру воспламенения смол и сажи, порошкообразного доломита и других веществ пока еще не всегда дает положительные результаты.

Наиболее эффективным средством борьбы с наружными отложениями является интенсивная обдувка поверхностей нагрева котла. На современных котлах устанавливают до 20 сажеобдувочных устройств (на всех участках поверхности нагрева котлоагрегата). Радиационные поверхности нагрева обычно обрабатывают крупносопловыми (1—2 сопла) сажеобдувочными устройствами, а конвективные поверхности — многосопловыми.

Общее расположение многосопловых сажеобдувочных устройств на современном двухбарабанном вертикальном водотрубном котле показано на рис. 126. Из рисунка видно, что для обдувки пароперегревателя, второго пучка водогрейных труб и двухсекционного экономайзера предусмотрено по пять устройств.

Поверхности нагрева обдувают перегретым паром. Применение насыщенного пара не рекомендуется, так как повышенное содержание водяных паров в газах способствует коррозии хвостовых поверхностей.

На вспомогательных и утилизационных котлах, установленных на теплоходах, и на некоторых главных котлах пароходов иногда применяют обдувку сжатым воздухом, которая менее эффективна чем паровая, но не связана с увеличением безвозвратных потерь конденсата. Однако сжатым воздухом можно обдувать только холодный котел (из-за опасений воспламенения сажи).

В огнетрубных котлах применяют ручную очистку дымогарных труб проволочными ершами и обдувку переносным паровым банником как на стоянке, так и при работе котла (с пониженным

горением в топках). Банение труб огнетрубных котлов также производят стационарными сажеобдувочными устройствами, установленными со стороны задней стенки огневой камеры или котла.

Расход пара на обдувку в основном зависит от времени работы сажеобдувочного устройства, поэтому для снижения расхода пара

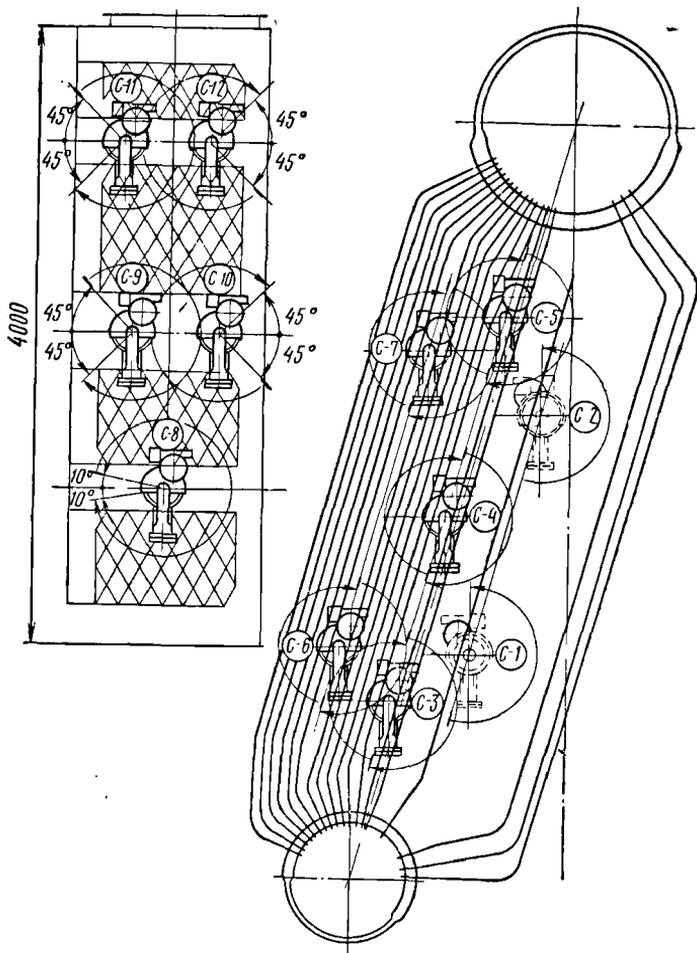


Рис. 126. Расположение сажеобдувочных устройств в водотрубном котле

обдувку надо вести быстрее. Лучше чаще включать сажеобдувочные устройства, чем долго держать их включенными при редкой обдувке. Обдувка улучшается при использовании противонагарных препаратов.

В последнее время в котельных установках для обдувки устанавливают автоматические устройства, которые последовательно включают сажеобдуватели по заранее заданной программе.

Одна из конструкций крупносопловое сажеобдувочного устройства, предназначенного для обдувки радиационных поверхностей нагрева судового водотрубного котла, показана на рис. 127 (в нерабочем положении).

Сажеобдуватель установлен на наружной стороне стенки топки с футеровкой 10 и прикреплен к усиленному листу обшивки 12 котла. Для охлаждения наконечника сажеобдувателя, состоящего из сопла 8 и переходного штуцера 9, изготовленных из жаростойкой стали, по трубопроводу 7 подается воздух из воздушного кожуха котла (или напорного воздухопровода).

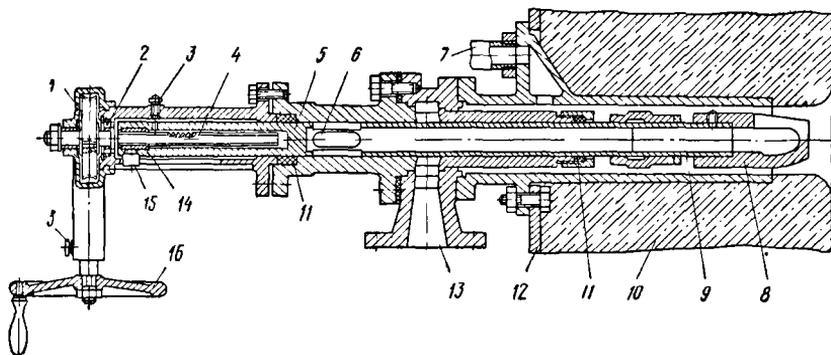


Рис. 127. Крупносопловое сажеобдувочное устройство

Сажеобдувочное устройство включают следующим образом. Вращая маховик 16, приводят в движение червячное колесо 1, жестко соединенное с червяком 4, который вращается в шарикоподшипнике 2. При этом шток 5 будет перемещаться вправо до тех пор, пока отверстие 6 не совпадет с паропроводом 13. При этом пар станет поступать к соплу 8, а само сопло окажется внутри топки в рабочем положении.

Дальнейшее выдвигание сопла внутрь топки прекратится, так как стопор 15, соединенный с гайкой 14, дойдет до конца прорези, длина которой соответствует рабочей длине выдвигания сопла. Дальнейшее вращение маховика 16 вызывает вращение штока 5 и сопла 8 в пределах угла, заданного размером прорези по окружности. Сальники 11 служат для уплотнения штока сажеобдувателя, а стопоры 3 — для предотвращения включения сажеобдувочного устройства, например на стоянке, если в топке котла находятся люди.

Многосопловое сажеобдувочное устройство, предназначенное для обдувки конвективных поверхностей нагрева котла, показано на рис. 128.

Сажеобдуватель укреплен на стенке 9 газохода котла с помощью фланцев 4 и 3. Между фланцем 4 и стенкой газохода установлена асбопрокладка 8. Крепление фланцев 3 и 4 выполнено на шпильках пружинами и контргайками 2.

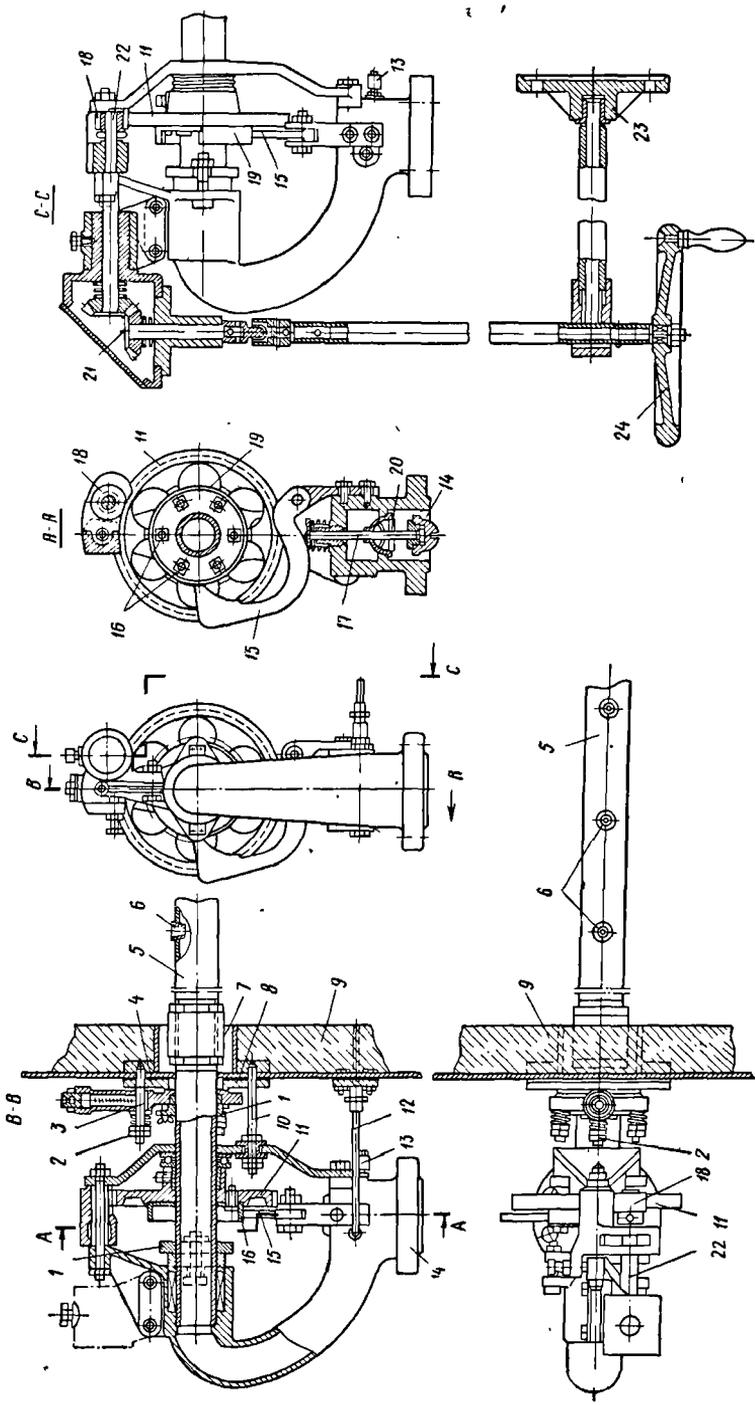


Рис. 128. Многоопловное сажеобдучное устройство

Сажеобдувочная труба 5 имеет сопла 6, расположенные по ее образующей. Один конец трубы 5 проходит через укрепленное отверстие 7 в стенке газохода 9, а второй (заглушенный) конец (на рисунке не показан) свободно вращается в гнезде, расположенном на противоположной стенке газохода котла.

Для точной установки трубы 5 по отношению к трубам поверхности нагрева предусмотрена шпилька 10. В бездействующем состоянии труба 5 охлаждается воздухом, поступающим в нее по трубке 12 из воздухопровода или воздушного кожуха котла. Сальниковые коробки 1 предназначены для уплотнения трубы 5.

Сажеобдуватель включают вращением маховика 24, ось которого имеет дополнительную опору 23, прикрепленную к стенке газохода (или наружному кожуху котла). При этом приводится во вращение шестерня 11, которая сцеплена с шестерней 18 вала 22, который в свою очередь соединен парой конических шестерен 21 с валиком маховика 24.

К шестерне 11 прикреплено болтами 16 кольцо 19 с вырезом, в который заходит рычаг 15. При вращении маховика 24 рычаг 15 выходит из выреза кольца и, перемещаясь по наружной поверхности этого кольца, открывает и держит открытым паровой клапан 20, воздействуя на его шток 17. Обдувка заканчивается, когда рычаг 15 вновь попадает в вырез кольца 19.

Количество вырезов в кольце 19 и их длину по окружности устанавливают в зависимости от расположения поверхности нагрева. Для зон, не требующих обдувки, вырез в кольце отсутствует.

Обдувочный паропровод подсоединен к фланцу 14. Паровой свисток 13 включается одновременно с началом обдувки и выключается по ее завершении, т. е. является сигнализирующим устройством.

Обдувку обычно производят каждую вахту, а также перед выключением форсунок для остановки котла при заходе в порт и после маневров, затем непосредственно за командой полного хода, включая сажеобдувочные устройства последовательно сверху вниз. Котельные вентиляторы должны быть при этом пущены на полную мощность (не допуская повышения температуры перегретого пара более чем на 20°С). Кроме того, обдувку следует производить при повышении или понижении температуры пара и при повышении температуры уходящих газов. Перед обдувкой желательно снизить нагрузку котла. В порту обдувка не разрешается.

Поверхности нагрева окончательно очищают во время бездействия котла. Поверхность нагрева котлоагрегата со стороны газов чистят обычно вручную, ершами и щетками, начиная с верхних участков газохода по направлению к нижним. Предварительно котел охлаждают до температуры 50—60°С и вентилируют газоходы. Такая операция трудоемка, утомительна и требует повышенной внимательности во избежание ожогов.

В настоящее время широко применяют промывку поверхности нагрева котла со стороны газов струей горячей (60—70°С) пресной воды, подаваемой под давлением 12—13 кгс/см² к специальной

трубе с 1—4 соплами (диаметром 3—5 мм) на конце. При другом способе конденсат из деаэратаора подают питательным насосом через специальное соединение в сажобдуватели.

Иногда для промывки применяют щелочной раствор, т. е. с добавлением соды и моющих средств. Промывку ведут сверху вниз, а потом со стороны топки через люки в обшивке, начиная ее сразу после остановки котла (каждые 3—4 месяца).

Для предохранения футеровки от обильного смачивания водой в топке и в нижней части газохода подвешивают брезент или ставят специальные щитки (из нейлона, неопрена и т. д.) в виде конуса воронкой вниз. Грязная вода удаляется из этого конуса по брезентовому рукаву.

Котел рекомендуется промывать без перерывов, так как неудаленные влажные отложения позже удалить труднее. Обычно полная промывка большого водотрубного котла занимает 10—12 ч. После промывки рекомендуется нанести слой защитной окраски («известковое молоко» с графитом) и сразу просушить котел, поддерживая слабый огонь растопочной форсункой в течение 2—6 ч в зависимости от размеров котла.

ЦНИИ морфлота рекомендует очистку пропариванием остывшего котла через смесители паром под давлением 5—7 кгс/см² вместе с водным раствором щелочной присадки, содержащей 80% углекислого аммония и 20% соды. При реакции присадки с сернистыми соединениями отложений образуется углекислый газ, который, расширяя трещины и вспучивая отложения, разрушает их.

§ 60. Очистка поверхности нагрева с водяной стороны

Поверхности нагрева со стороны воды очищают в сроки, установленные нормативами (через 3000—7000 ч работы и более) в зависимости от числа котлов и принятого водного режима, за исключением особых случаев нарушения водного режима (замасливание или засоление питательной воды), которые должны рассматриваться как аварийные. Некоторые утилизационные котлы можно очищать от сажи, смол и накипи во время работы двигателя, осушив котел и прокалив его отходящими газами в течение 1—2 ч при открытом воздушном клапане.

К очистке и промывке котла приступают сразу после спуска из него воды, которую надо предварительно охладить до температуры 50—60° С. Спустив воду, открывают лазы и горловины, проветривая котел, надежно отсоединяют его от магистралей пара и воды остановкой заглушек на фланцах. В крайнем случае клапаны плотно перекрывают, но при этом к ним должны быть прикреплены дощечки с надписью «Люди в котле» и, кроме того, возле клапанов должна быть постоянная вахта. При чистке и промывке котла можно пользоваться только надежными электрическими переносными лампами напряжением не более 24 В.

Прикипевший шлам и рыхлые отложения на стенках котла удаляют стальными ершами, щетками и скребками; водогрейные

трубы чистят проволочными ершами или проволочными шарошками.

После чистки котла его промывают сильной струей горячей воды. Затем производят прокатки труб шарами и, в случае застревания в них посторонних предметов, «простреливают» сжатым воздухом. Экономайзер и пароперегреватель интенсивно промывают через лючки или специальные патрубки на коллекторах. При соблюдении установленного водного режима такие очистки и промывки достаточны для удаления шлама из котла.

Если внутри котла обнаружена плотная накипь, то старший механик судна должен объяснить причину нарушения водного режима, а котел нужно подвергнуть химической и механической очисткам.

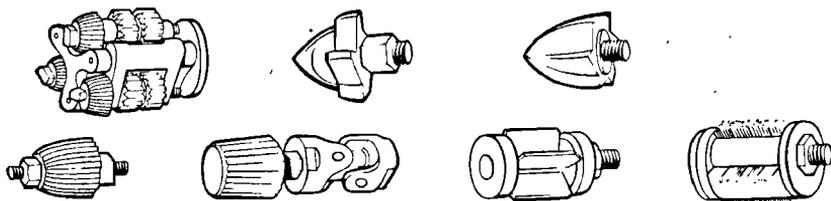


Рис. 129. Шарошки и ерши для очистки труб

Химическую очистку производят щелочением котла или кислотной промывкой. Если преобладает сульфатная кальциевая или магниевая накипь, применяют щелочение котла тринатрийфосфатом. При этом давление в котле снижают до $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{4}$ рабочего и через питательную систему подают Na_3PO_4 из расчета 1,5—2 кг на 1 м³ воды в котле.

Продувают котел несколько раз и снова вводят тринатрийфосфат в количестве 0,75—1 кг на 1 м³ воды, повышая уровень воды до ВУВ. Добавляют фосфат и продувают котел до тех пор, пока содержание фосфатов в воде не перестанет снижаться. Пробы отбирают через каждые 0,5—1 ч, определяя содержание фосфатов и щелочное число. Затем выключают форсунки (обычно для этого достаточно одной форсунки) и в течение 2—3 ч охлаждают котел, спускают воду и немедленно приступают к механической очистке ершами и шарошками (рис. 129).

При большей толщине накипи для щелочения применяют едкий натр (8—10 кг на 1 м³ воды) или техническую соду. Реагенты загружают в виде раствора через верхний люк и кипятят воду в котле в течение 1—1,5 сут при открытых верхних люках или (что предпочтительнее) при давлении пара 1—3 кгс/см², периодически продувая котел. После спуска воды из котла сразу приступают к механической очистке.

Кислотную промывку котла, пароперегревателя, экономайзера, а иногда и всего паросилового оборудования судна, включая турбины, применяют сравнительно редко при наличии плотной

накипи (например, плотной карбонатной), трудно удаляемой обычным щелочением котлов. При кислотной промывке вся арматура, кроме дренажной, должна быть заглушена, а котел или тот элемент, который подвергается промывке, должен быть отделен от остальных систем и агрегатов. Кислотная промывка требует особых предосторожностей и не допускается при наличии дефектов (неплотностей, трещин, коррозионных разъеданий и т. д.) элементов и деталей котла.

До недавнего времени для кислотной промывки использовали соляную кислоту с добавкой ингибитора, предупреждающего кислотную коррозию металла. В настоящее время применяют 5%-ный раствор сухого уксусно-кислого аммония, который, проникая в трещины накипи, разлагается, образуя уксусную кислоту (CO_2) и аммиак, разрушающие соли накипи.

При карбонатной кальциевой и магниевой накипи достаточно температура раствора кислоты 20—40°С. При силикатной или сульфатной накипи концентрацию HCl доводят до 5—7%, а температуру раствора — до 70°С (увеличивать концентрацию раствора выше 10% HCl нельзя).

При кислотной промывке создают замкнутый контур циркуляции: котел — бак с раствором — насос — котел, подогревая раствор до 100°С паром от другого котла или за счет работы растопочной форсунки. Длительность кислотной промывки составляет 8—10 ч в зависимости от толщины и характера накипи и контролируется по снижению концентрации раствора во время промывки.

После удаления раствора кислоты из котла последний промывают пресной водой, а затем щелочным раствором тринатрийфосфата или соды. Щелочную промывку ведут не менее 6—8 ч для полной нейтрализации кислоты. После этого котел (экономайзер, пароперегреватель) дополнительно промывают чистым горячим конденсатом или дистиллятом.

Для удаления железных и медных окислов, вызывающих подшламовую коррозию наиболее теплонпряженных труб котла, применяют промывку трилоном Б (смягчителем Ф-1). Это вещество относится к классу комплексонов, имеющих свойство образовывать комплексные соединения с окислами металлов.

При отсутствии оборудования для кислотной промывки котла и при наличии плотной накипи на водогрейных трубах ограничиваются щелочением котла с последующим удалением накипи шарошками. Наиболее удобны шарошки с гидроприводом, исключающие пылеобразование при очистке труб и не требующие охлаждения.

Часто применяют электроприводные шарошки (рис. 130), удобные в работе. В этом случае на уровне пароводяного барабана котла устанавливают на подставке 5 переносный электродвигатель 1 мощностью 0,5—1 кВт, снабженный шнуром с выключателем 4. К валу электродвигателя крепят заключенный в металлическую броню гибкий вал 2 (диаметром 22 мм), на другом конце которого имеется вилка. К вилке прикрепляют сменные головки 3

с откидными стальными шарошками, ножами или щетками, которые выбирают в зависимости от структуры и толщины накипи. При частоте вращения гибкого вала 1500—3000 об/мин инструменты головки под действием центробежной силы откидываются и прижимаются к внутренней поверхности труб, оставаясь параллельными ей.

Шарошки могут приводиться в движение небольшой гидравлической турбинкой, к которой от балластного или пожарного насоса подводится вода под давлением около 7 кгс/см². Вытекая из турбинки в трубу, вода одновременно охлаждает ножи.

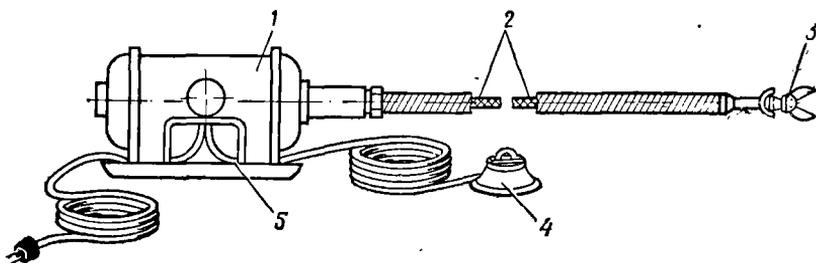


Рис. 130. Шарошки с электроприводом

Перед началом очистки берут головку, легко проходящую в трубу; для второго прохода берут головку большего размера (см. рис. 129). Электродвигатель или гидротурбину можно включать и выключать только в том случае, если головка находится внутри трубы. Вал нужно все время двигать вперед и назад. При застревании головки надо немедленно отодвинуть ее назад и снова осторожно двигать к месту задержки. Если головка не выходит, следует остановить электродвигатель и попытаться сбить препятствие резкими движениями гибкого вала.

Необходимо также следить за тем, чтобы шарошки не выходили из труб. Для этого, а также для того, чтобы не повредить стенки камер секционных котлов и гнезда их лючков, на вал следует надеть хомут или сделать отметку, указывающую допустимую длину ввода головки.

В секционных котлах трубы чистят со стороны задних секционных камер, а в остальных — со стороны верхних коллекторов.

Шарошки с электроприводом после очистки каждой трубы опускаются в ведро с водой для охлаждения.

Нагрев электродвигателя свидетельствует о сильном изгибе вала или неправильном выборе шарошки (слишком большого диаметра). Биение вала является признаком перегрузки.

После чистки на вал вместо головки навинчивают ерш из тонкой стальной проволоки и проводят его по трубам. Затем их промывают струей воды, просвечивают электролампой и окончательно проверяют калиброванным стальным шаром.

В случае попадания в котел топлива или масла пустой котел выпаривают (в течение 8—15 ч) паром от другого котла через клапан верхнего продувания при давлении 3—5 кгс/см². Стекающую грязь удаляют через клапан нижнего продувания. Затем котел промывают теплой водой и производят его щелочение.

§ 61. Запасные части

Суда снабжают запасными частями для котлов и вспомогательного оборудования, что позволяет быстро заменять вышедшие из строя детали и повышает надежность эксплуатации судна. Регистром СССР установлен, в зависимости от класса и района плавания судна, перечень минимального количества запасных частей, которые должны быть всегда на борту. Например, для котельных установок судов неограниченного района плавания необходимо иметь в запасе не менее:

одной пружины для предохранительных клапанов;
одного комплекта форсунки в сборе на каждый котел;
двух пробок (приборов) для глушения на каждые 50 дымогарных или водогрейных труб;

20% полного количества крепежных деталей для пароперегревателей (труб, шпилек и приборов для глушения труб).

Кроме того, необходимо иметь запасные части для системы автоматики в количестве, достаточном для надежной эксплуатации и определяемом Регистром СССР.

Все запасные части надо сохранять в полной исправности, соблюдая правила консервации, и надежно закреплять, чтобы они не перемещались при качке судна. Отсутствие запасных частей, предусмотренных Правилами Регистра СССР, служит основанием для запрещения выхода судна в плавание.

§ 62. Техника безопасности в котельном отделении

За безопасность работы людей в котельном отделении отвечает старший и котельный (третий) механики. Они должны обучать машинную команду правилам техники безопасности. Следует помнить, что небрежность или неосторожность вахтенного механика или котельного машиниста может подвергнуть опасности не только их самих, но и все судно.

Правилами техники безопасности предъявляются особые требования к устройству и оборудованию котельного отделения. Например, настил (пайол) в котельном отделении должен быть изготовлен из рифленой стали, чтобы кочегар не мог поскользнуться. Каждое котельное отделение должно иметь отдельный выход на палубу с шириной трапа не менее 540 мм и отклонением от вертикальной плоскости не менее чем на 30°.

Правилами пожарной безопасности запрещается располагать топливные цистерны в отсеках двойного дна под котлами. Для предохранения людей от ожогов и уменьшения потерь тепла котлы, дымоходы и паропроводы должны быть надежно изолированы. Температура наружной поверхности изоляции не должна превышать 60° С.

Главные и вспомогательные стопорные клапаны на котлах, а также быстрозапорные топливные на мазутной магистрали должны быть оборудованы надежными приводами.

Для того чтобы исключить возможность выпуска воды из котла, краны верхнего и нижнего продувания имеют специальные указатели «Открыт» и «Закрыт», а кран нижнего продувания, кроме того, оборудуется специальным устройством, которое не позволяет снять рукоятку, если кран закрыт не полностью.

Требования, предъявляемые техникой безопасности к установке и конструкции арматуры и КИП, были рассмотрены в гл. X. Их выполнение еще не может гарантировать безопасной работы в котельном отделении, если не будут соблюдаться правила безопасности обслуживания котлов.

Одно из основных требований правил техники безопасности — соблюдение чистоты и порядка в котельном отделении. Грязь, беспорядок, хлам, разбросанный инструмент, загроможденные проходы, неисправность трапов, решеток и поручней нередко служат причиной несчастных случаев.

Большое значение имеет также хорошая освещенность котельного отделения, которая не должна быть ниже 60 лк.

Тщательное хранение и содержание инструмента в исправности экономит время и труд, обеспечивает безопасность работы.

К работе допускаются лица, достигшие 18-летнего возраста, прошедшие медицинский осмотр и имеющие свидетельство на право обслуживания паровых котлов и ухода за ними. Во время работы и вахты в котельном отделении нужно носить спецодежду и обувь только на кожаной подошве. Надевать обувь на резиновой подошве запрещается, так как в ней можно поскользнуться и упасть. Также не разрешается носить одежду из синтетических материалов во избежание тяжелых ожогов.

Запрещается затягивать гайки на котлах и паропроводах под паром, а также выполнять при этом ремонтные работы, связанные с ударами, сверлением отверстий и сваркой. Исключение сделано только для гаек, скоб, лазов, люков и горловин, ослабленных при разводке паров; такие гайки надо затягивать только под наблюдением вахтенного механика. Для этого следует применять обычные гаечные ключи, не наращивая их ручек и не ударяя по ним.

Во избежание ожогов запрещается открывать крышки лазов и люков котла, пока старший механик лично не убедится в том, что в котле нет пара или горячей воды и он надежно отключен от действующих котлов. Проникать через лаз в котел, если другой находится под парами, запрещается до тех пор, пока на всех трубах, через которые могут быть сообщены котлы, не будут поставлены заглушки между фланцами или замки на закрытые разобщительные клапаны и на всех клапанах вывешены плакаты: «В котле люди».

Работающим в пароводяном пространстве или в топке котла разрешается пользоваться для освещения только электрическими лампами напряжением не более 24 В.

Перед тем как открыть люки и горловины, необходимо убедиться в том, что воздушные или предохранительные клапаны полностью открыты. Открывать люки и горловины следует осторожно, надев плотные рукавицы и не наклоняясь близко к отверстиям. Тяжелые крышки горловин и люков следует заранее привязать за болты веревкой к какой-нибудь прочной неподвижной детали, чтобы они не упали.

Перед началом работ внутри барабана надо убедиться в том, что все трубопроводы отключены, температура внутри не превышает 50°С и в барабане не содержится вредных паров или газов. У люка котла, через который входят люди, следует оставлять вахтенного для наблюдения. Перед тем как закрыть горловины и люки после выполнения работ, следует тщательно проверить, все ли люди вышли из котла и убран ли из него весь инструмент.

В любых случаях запрещается эксплуатировать котлы без разрешения Регистра СССР. Котел не разрешается вводить в действие и в тех случаях, когда после осмотра инспектором Регистра обнаружены: течь в коллекторах, барабанах или трубах; неисправность питательных средств; отсутствие или неисправность хотя бы одного предохранительного клапана, водоуказательного прибора или манометра; неисправность крана нижнего продувания, а также если число неисправных или заглушенных водогрейных труб превышает норму Регистра.

Однако Правила [10] допускают отступления от некоторых требований в особых обстоятельствах при условии снижения рабочего давления или паропроизводительности.

Исправность действия предохранительных клапанов и ручных приводов необходимо проверять при каждом пуске котла. Если хотя бы один из предохранительных клапанов не действует, огонь в топках должен быть погашен и может быть разведен вновь только после устранения неисправности.

Форсунки нужно зажигать только факелом, укрепленным на металлическом пруте длиной около 1 м. При поднесении факела к форсунке кочегар, обслуживающий топку, должен стоять не против нее, а сбоку во избежание ожогов при выбрасывании пламени из топки.

Опасность в пожарном отношении представляют образующиеся при подогреве мазута пары. Они опускаются вниз (так как тяжелее воздуха), скапливаются в местах слабой циркуляции воздуха в котельном отделении и могут образовать там взрывчатую смесь, воспламеняющуюся от соприкосновения с огнем, искрами и даже с поверхностью металла, нагретой до 150—300° С. Нужно тщательно следить за плотностью топливных трубопроводов арматуры и насосов, содержать льяла чистыми и сухими, не допускать скоплений мазута в топке, в поддонах, на плитах и под насосами и подтекания фланцев топливопроводов. Пролитый мазут необходимо немедленно вытирать. Нельзя допускать скоплений под плитами воды, на поверхности которой может плавать мазут.

Для тушения пожара в котельном отделении применяют пеногонные огне-тушители, песок и пар. На некоторых судах имеются углекислотные установки. При горении сажи необходимо немедленно выключить форсунки и дутье и произвести обдувку, затем, при наличии соответствующих устройств, пустить в газоды углекислоту.

При любой аварии весь личный состав котельного отделения должен участвовать в ликвидации ее последствий. Спешить с выводом котлов из действия не следует, не попытавшись ликвидировать пожар местными средствами. Если дальнейшее пребывание в котельном отделении становится опасным для жизни, вахтенный механик удаляет людей. Затем, поставив в известность старшего механика, выводит из действия котлы при помощи аварийных приводов палубных стопорных и предохранительных клапанов и быстрозапорного мазутного клапана; прекращает подогрев топлива, работу питания и дутья.

При пожаре или заполнении котельного отделения паром, когда вахтенный персонал во избежание ожогов вынужден оставить котельное отделение, нужно пользоваться нижними выходами — машинным отделением, туннелем.

Тщательное соблюдение Правил Регистра СССР, а также обслуживания судовых котлов и ухода за ними гарантирует длительную и безаварийную эксплуатацию котельной установки любого типа.

§ 63. Теплотехнические испытания котлов

Тепловой контроль котельных установок нужен для определения количественных показателей их работы и проверки степени использования тепла, выделившегося при сжигании топлива. Наиболее полно эти характеристики выявляют при теплотехнических испытаниях, во время которых определяют паро- и теплопроизводительность котлов, их к. п. д.

Полные теплотехнические испытания не могут быть проведены подобно оперативному теплового контролю персоналом, обслуживающим котельную установку. Эту работу обычно выполняют специальные работники испытательных партий.

Материалы испытаний после их обработки дают возможность оценить степень совершенства протекающих в котле процессов и сравнить их с нормами или расчетными данными. Кроме того, на основе испытаний строят графики изменения показателей при разных нагрузках, используемые для улучшения организации работы установки и ее обслуживания. В зависимости от характера задач, поставленных при испытаниях, меняются объем и необходимая степень точности измерений.

Наиболее полные испытания проводят для определения потерь тепла и построения теплового баланса котла. Такие испытания называют балансовыми.

Стендовые балансовые испытания выполняют обычно на стенде завода — строителя котла. Стенд оборудован необходимыми измерительными приборами, а также установками для подвода воды, топлива и т. д. Стендовым испытаниям, как правило, подвергают головной котел серии, выпускаемый заводом-строителем. Основная задача стендовых балансовых испытаний — проверить соответствие фактических показателей работы котла техническим условиям на поставку, согласованным с заказчиком.

Балансовые испытания иногда проводят во время эксплуатации судна для решения отдельных научно-исследовательских задач в судовых условиях.

Во время эксплуатации часто проводят сокращенные испытания для определения показателей, характеризующих теплоиспользование и качество обслуживания котла, например расхода топлива, температуры уходящих газов,

коэффициента избытка воздуха. Эксплуатационные испытания проводят по специальной программе, согласованной с капитаном и старшим механиком судна. В ней устанавливают количество и продолжительность опытов.

В состав испытательной партии обычно входят 2—3 наблюдателя, которые должны периодически записывать показания приборов, установленных в котельном отделении. Каждый прибор надо детально опробовать до начала испытаний (это особенно важно, если судно уходит в море).

Перед испытаниями необходимо наладить работу котла, обеспечить полное горение при минимальной величине коэффициента избытка воздуха и отрегулировать работу форсунок и воздухонаправляющих устройств. Во время наладки проверяют исправность измерительных приборов и всех механизмов, обслуживающих котел. Устранив обнаруженные дефекты, не требующие выполнения серьезных работ, снова проверяют действие котла, проводя пробный опыт в течение нескольких часов. При пробном опыте следят также за согласованностью в работе наблюдателей. После этого начинают опыты при определенной нагрузке котла. Требуемый режим устанавливают на несколько часов до начала испытаний с тем, чтобы все параметры и показатели работы котлов соответствовали данному режиму.

Для возможно более точного определения к. п. д. котла и расхода топлива необходимо, чтобы запас тепла в котле в начале и конце опыта был одинаков. Поэтому паропроизводительность, давление пара, температура уходящих газов и уровень воды в котле должны быть в начале и в конце испытаний одинаковыми.

Неожиданные изменения режима работы ССУ (например, уменьшения хода судна или остановка главных двигателей, выключение или включение новых потребителей пара и т. п.) нарушают условие постоянства нагрузки котлов, и опыт приходится начинать сначала. Поэтому испытания нельзя проводить в каналах и узкостях, в штормовую погоду. Нельзя также во время испытаний включать вспомогательные механизмы, работа которых не связана с обычной эксплуатацией судовой установки (пожарные или балластные насосы, дополнительный турбогенератор и т. п.).

Теплотехнические партии используют при испытаниях как штатные, так и специальные контрольно-измерительные приборы и приспособления.

К. п. д. котла, являющийся его важнейшей характеристикой при эксплуатации, оценивают обычно только при балансовых теплотехнических испытаниях, которые проводят относительно редко, так как они требуют специального оборудования, приборов и дополнительного количества специалистов. Для определения тепловых потерь отбирают пробы топлива и сдают их на анализ в лабораторию. Однако это не позволяет немедленно оценить к. п. д. котла и тепловые потери после окончания испытаний.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение I

МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ) ГОСТ 9867-61

ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИ:

Длина	м (метр)
Масса	кг (килограмм)
Время	с (секунда)
Сила	Н (ньютон)
	1 Н = кгс·м/с ²
Мощность	Вт (ватт)
Плотность	кг/м ³
Давление	Н/м ² ; 10 ⁵ Н/м ² = 1 бар
Вязкость	Н·с/м ²
Кинематическая вязкость	м ² /с
Коэффициент поверхностного натяжения	Н/м

КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ ПЕРЕСЧЕТА

Давление

Единица	кгс/м ²	мм рт. ст	кгс/см ² (ρ _{абс})	кгс/м ² (ρ _{взб})	Н/м ²	бар
1 мм вод. ст. = = 1 кгс/м ²	1	0,0736	0,968·10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	9,81	9,81·10 ⁻⁵
1 мм рт. ст.	13,6	1	1,31·10 ⁻³	13,6·10 ⁻⁴	133,3	1,33·10 ⁻³
1 ат (физическая)	10 330	760	1	1,033	101,3·10 ³	1,013
1 кгс/см ² (техниче- ская атмосфера)	10 ⁴	736	0,968	1	98,1·10 ³	0,981
1 Н/м ²	0,102	0,0075	0,987·10 ⁻⁵	0,102·10 ⁻⁴	1	10 ⁻⁵
1 бар	1,02·10 ⁴	750	0,987	1,02	10 ⁵	1

Теплоемкость массовая

Единица	ккал/кг·°С	кДж/кг·°С
1 ккал/кг·°С	1	4,19
1 кДж/кг·°С	0,239	1

Мощность

Единица	кгс·м/с	ккал/ч	кВт	л. с.
1 кгс·м/с	1	8,43	9,81·10 ⁻³	13,33·10 ⁻³
1 ккал/ч	0,1185	1	1,163·10 ⁻³	1,58·10 ⁻²
1 кВт	102	860	1	1,36
1 л. с.	75	632	0,735	1

Энергия

$$1 \text{ кДж} = 1000 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Нм}$$

Единица	кгс·м	ккал	кВт·ч	Дж
1 кгс·м	1	$2,34 \cdot 10^{-3}$	$2,72 \cdot 10^{-6}$	9,81
1 ккал	427	1	$1,163 \cdot 10^{-3}$	4190
1 кВт·ч	$367 \cdot 10^3$	860	1	$3,6 \cdot 10^6$
1 Дж	0,102	$0,239 \cdot 10^{-3}$	$0,278 \cdot 10^{-6}$	1

Тепловая нагрузка

$$1 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} = 1,16 \text{ Вт/м}^2$$

$$1 \text{ Вт/м}^2 = 0,86 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$$

Коэффициент теплоотдачи (теплопередачи)

$$1 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C} = 1,16 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$1 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C} = 0,86 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$$

Коэффициент лучеиспускания

$$1 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{K}^4 = 1,16 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}^4$$

Коэффициент теплопроводности

$$1 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C} = 11,63 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см} \cdot ^\circ\text{C} = 1,63 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C} = 1,163 \cdot 10^{-3} \text{ кВт/м} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$1 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C} = 0,86 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$$

Коэффициент вязкости

$$1 \text{ Пз (пуаз)} = 1 \text{ дин} \cdot \text{с/см}^2 = 10,2 \cdot 10^{-3} \text{ кгс/м}^2 = 0,1 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$$

$$1 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2 = 10 \text{ Пз} = 0,102 \text{ кг/с/м}^2$$

Коэффициент поверхностного натяжения

$$1 \text{ Н/м} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 1000 \text{ дин/см}$$

$$1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,81 \text{ Н/м}$$

Плотность

$$1 \text{ кг/м}^3 = 0,102 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4}$$

$$\frac{1 \text{ кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4} = 9,81 \text{ кг/м}^3$$

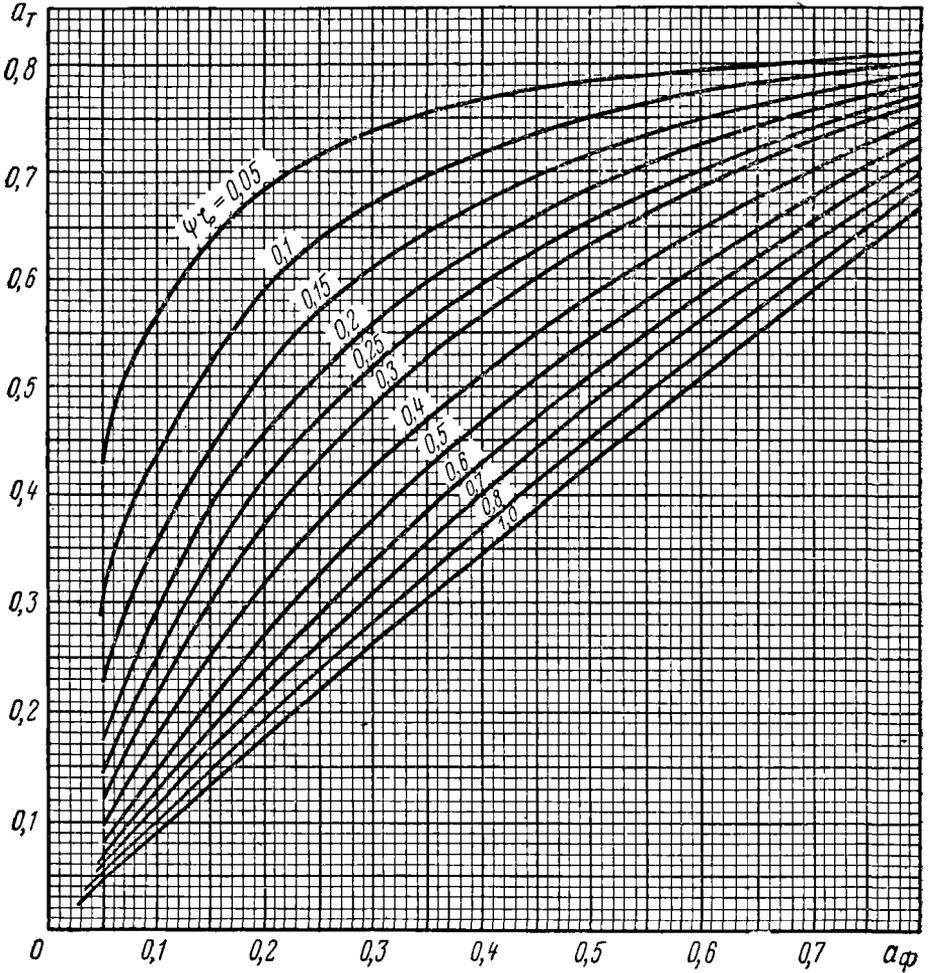
Приложение II

ТАБЛИЦА СРЕДНИХ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА И ГАЗОВ (ккал/Нм³·С)

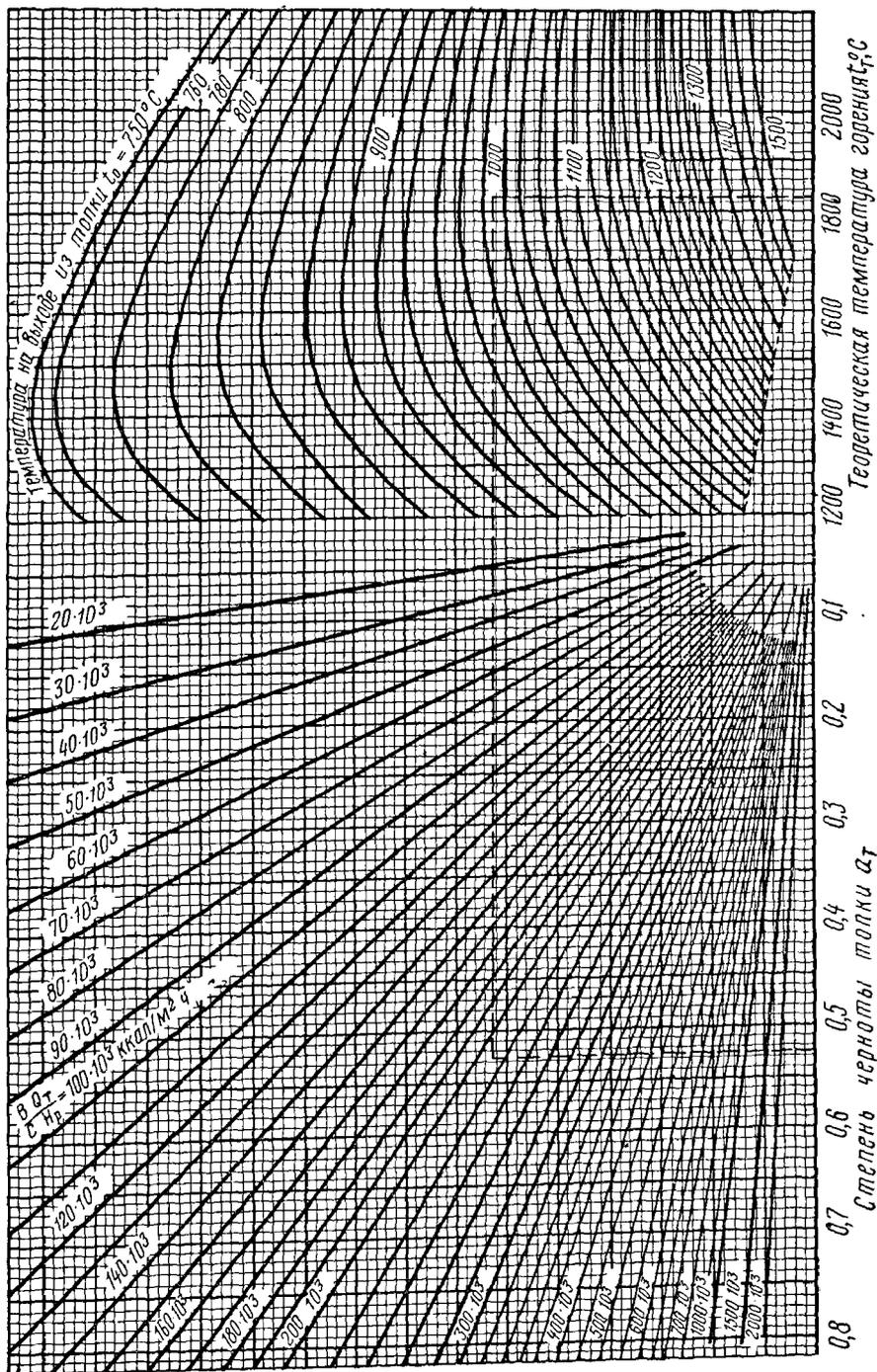
$t^{\circ}\text{C}$	C_{CO_2}	C_{H_2}	C_{O_2}	$\text{C}_{\text{H}_2\text{O}}$	$\text{C}_{\text{с.в}}$	$\text{C}_{\text{в}}$	$(ct)_{\text{R}_2}$	$(ct)_{\text{RO}}$	$(ct)_{\text{H}_2\text{O}}$	$(ct)_{\text{возд}}$
0	0,3805	0,3092	0,3119	0,3569	0,3098	0,315	—	—	—	—
100	0,4092	0,3096	0,3147	0,3596	0,3106	0,3163	31	41	36	31
200	0,429	0,3106	0,319	0,3635	0,3123	0,3181	62,5	86	72,5	62,5
300	0,4469	0,312	0,324	0,3684	0,3147	0,3206	94	135	110	94,5
400	0,4628	0,3143	0,3291	0,3739	0,3275	0,3235	126,5	185,5	149	127
500	0,4769	0,3171	0,3339	0,3796	0,3207	0,3268	159,5	239	189	160,5
600	0,4895	0,3201	0,3385	0,3856	0,3241	0,3303	193	295	230	195
700	0,5008	0,3233	0,3426	0,392	0,3275	0,3338	228	352	273	230
800	0,511	0,3264	0,3464	0,3985	0,3307	0,3371	263	411	317	265
900	0,5201	0,3294	0,3498	0,405	0,3338	0,3403	298	471	362	301
1000	0,5286	0,3325	0,3529	0,4115	0,3367	0,3433	334	532	409	337
1100	0,5363	0,3354	0,3557	0,418	0,3396	0,3463	371	593	457	374
1200	0,5433	0,338	0,3584	0,4244	0,3422	0,349	408	656	506	411
1300	0,5495	0,3404	0,3608	0,4306	0,3448	0,3517	445	719	556	449
1400	0,5553	0,3430	0,3831	0,4367	0,3472	0,3542	483	783	607	487
1500	0,5606	0,3451	0,3653	0,4425	0,3494	0,3565	520	847	660	525
1600	0,5655	0,3471	0,3673	0,4482	0,3515	0,3587	558	911	711	563
1700	0,5701	0,3491	0,3693	0,4537	0,3534	0,3607	597	976	764	601
1800	0,5744	0,3509	0,3712	0,459	0,552	0,3625	635	1041	819	640
1900	0,5783	0,3527	0,373	0,464	0,357	0,3644	674	1107	873	679
2000	0,5820	0,3543	0,3747	0,4689	0,3586	0,3661	712	1173	928	718
2100	0,5855	0,3558	0,3764	0,4736	0,3602	0,3678	751	1239	984	757
2200	0,5887	0,3574	0,3781	0,478	0,3616	0,3693	790	1305	1040	797

Примечание: $\text{C}_{\text{с.в}}$ — удельная теплоемкость сухого воздуха, ккал/Нм³·°С
 $\text{C}_{\text{в}}$ — то же, с учетом нормальной влажности воздуха, равной 10 г/Нм³.

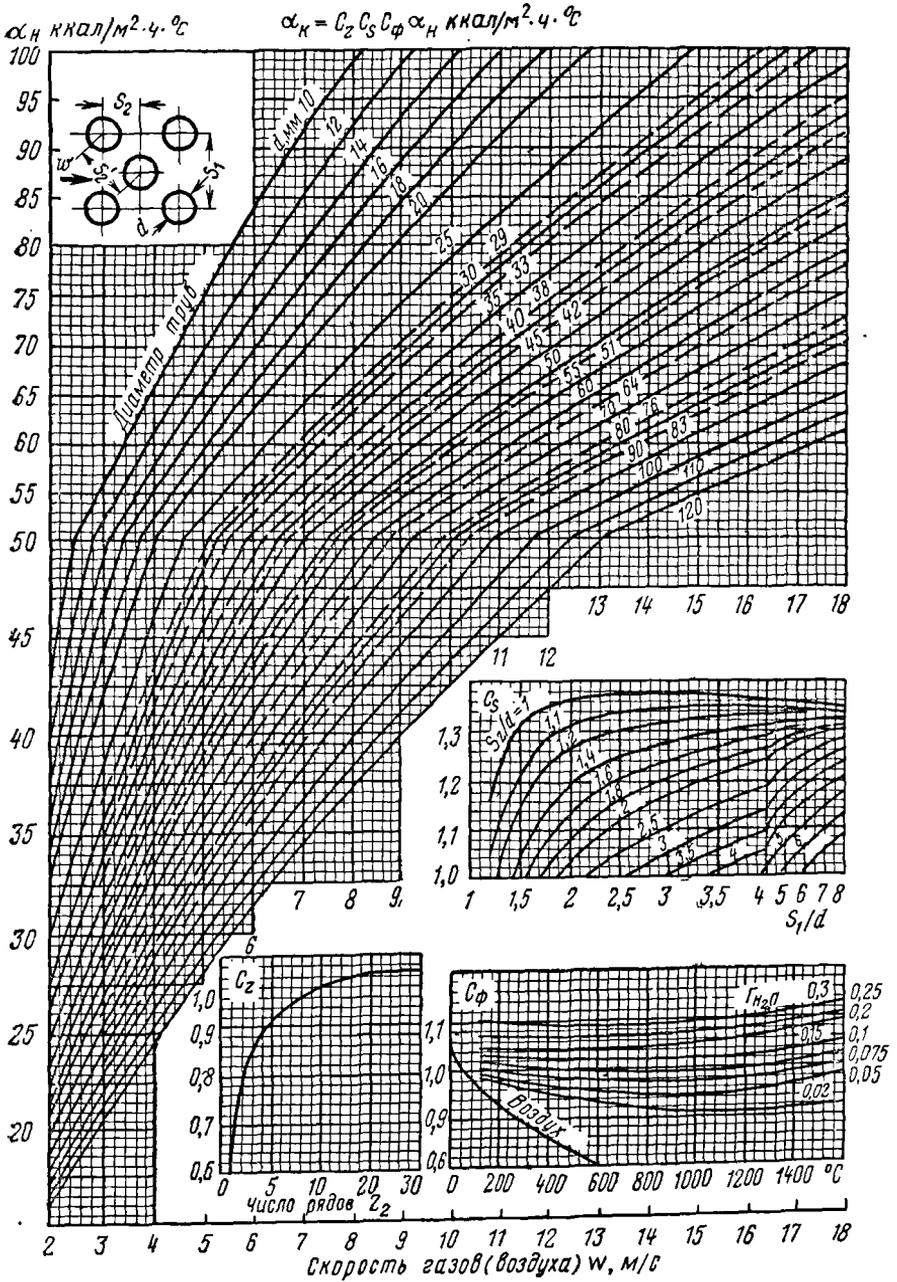
НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ТОПКИ

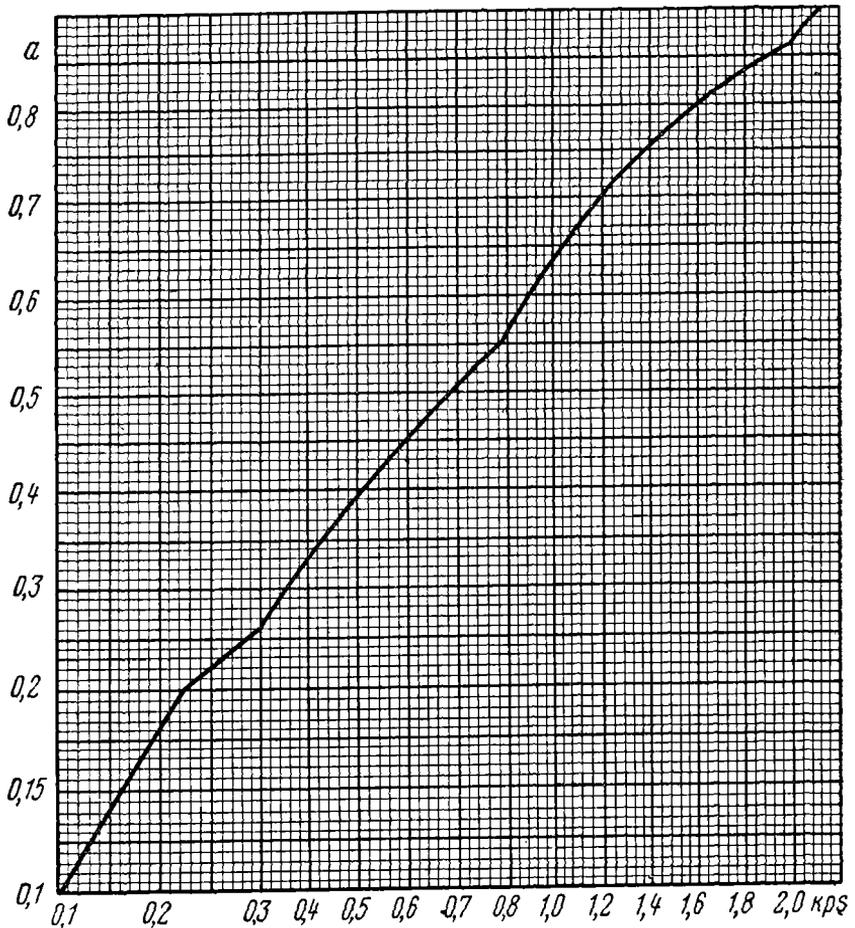


НОМОГРАММА К РАСЧЕТУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТОЧКЕ



НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОМЫВАНИИ ШАХМАТНЫХ ГЛАДКОТРУБНЫХ ПУЧКОВ



НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА α 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов П. П. Судовые силовые установки. М., «Транспорт», 1972, 376 с.
2. Аксельбанд А. М. Судовые энергетические установки. Л., «Судостроение», 1970. 471 с.
3. Бузник В. М. Судовые парогенераторы. Л., «Судостроение», 1970. 478 с.
4. Енин В. И. Компонка и расчет морских паровых котлов. М., «Транспорт», 1964. 320 с.
5. Иванов В. Д., Смирнов Ю. А. Эксплуатация котельных установок дизельных судов. М., «Транспорт», 1971. 192 с.
6. Лубочкин Б. Н. Морские паровые котлы. М., «Транспорт», 1970. 368 с.
7. Пушкин Н. И. Судовые паровые котлы. Л., «Судостроение», 1965. 511 с.
8. Селиверстов В. М. Утилизация тепла в судовых дизельных установках. Л., «Судостроение», 1973. 254 с.
9. Швед А. П., Шестопалов В. И. Опыт эксплуатации силовых установок судов типа «Ленинский комсомол», М., «Морской транспорт», 1962. 180 с.
10. Правила технической эксплуатации судовых паровых котлов. М., «Транспорт», 1965, 176 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Глава I. Общие сведения о котлах	3
§ 1. Назначение и принцип действия котла	3
§ 2. Судовая котельная установка	4
§ 3. Основные понятия и определения	6
Глава II. Классификация и основные этапы развития котлов	9
§ 4. Классификация котлов	9
§ 5. Основные типы котлов	10
§ 6. Основные этапы развития котлов	14
Глава III. Топливо для котлов	17
§ 7. Основные сведения о топливе	17
§ 8. Химический состав и теплота сгорания топлива	18
§ 9. Основные технические характеристики мазутов	19
§ 10. Прием, хранение и расходование топлива	26
Глава IV. Горение топлива	28
§ 11. Основные реакции горения	28
§ 12. Оценка полноты сгорания топлива	31
§ 13. Скорость и устойчивость процесса горения	36
Глава V. Топочные устройства котлов	37
§ 14. Основные схемы топочных процессов	37
§ 15. Организация факельного процесса	38
§ 16. Мазутные форсунки и топочные устройства	41
§ 17. Обслуживание мазутных топок	51
§ 18. Обслуживание топливных систем	57
Глава VI. Конструкции котлов	62
§ 19. Огнетрубные котлы	62
§ 20. Водотрубные котлы	66
§ 21. Секционные котлы	68
§ 22. Вертикальные водотрубные котлы	71
§ 23. Котельные агрегаты «шахтного» типа	83
§ 24. Вспомогательные и утилизационные котлы с естественной циркуляцией	91
§ 25. Котлы с принудительной циркуляцией	97
Глава VII. Пароперегреватели, экономайзеры и воздухоподогреватели	106
§ 26. Пароперегреватели и пароохладители	106
§ 27. Водяные экономайзеры	117
§ 28. Воздухоподогреватели	121
Глава VIII. Фундаменты, каркасы и изоляция	125
§ 29. Фундаменты и каркасы	125
§ 30. Обмуровка и изоляция	128
Глава IX. Тяга и тягодутьевые устройства	139
§ 31. Тяга и сопротивление газозовдухопроводов	139
§ 32. Регулирование тягодутьевых устройств	144
Глава X. Арматура трубопроводов и контрольно-измерительные приборы	148
§ 33. Арматура	148
§ 34. Паропроводы и котельные трубопроводы	164
§ 35. Контрольно-измерительные приборы	167
§ 36. Автоматическое регулирование котлов	175
Глава XI. Водный режим котлов	182
§ 37. Характеристика воды	182
§ 38. Накипеобразование и коррозия	187
§ 39. Водоконтроль	191
§ 40. Докотловая водоподготовка	201
§ 41. Водные режимы	210
§ 42. Продувка	214

	Стр.
Глава XII. Сепарация пара	217
§ 43. Чистота насыщенного пара	217
§ 44. Паросепарирующие устройства	219
Глава XIII. Циркуляция воды в котлах	222
§ 45. Основные понятия и определения	222
§ 46. Надежность циркуляции	226
Глава XIV. Прочность котлов	230
§ 47. Материалы для ремонта и постройки	230
§ 48. Расчеты на прочность	235
Глава XV. Тепловой баланс	237
§ 49. Уравнение теплового баланса	237
§ 50. Основы теплового расчета	244
Глава XVI. Эксплуатация котлов	265
§ 51. Основы технической эксплуатации	265
§ 52. Подготовка к действию и подъем пара	268
§ 53. Режимы работы	274
§ 54. Неполадки в работе и их устранение	279
§ 55. Износ и повреждения	285
§ 56. Планово-предупредительные осмотры и освидетельствования	289
§ 57. Уход за арматурой	293
§ 58. Вывод из действия	295
§ 59. Борьба с коррозией и загрязнением поверхности нагрева с газовой стороны	297
§ 60. Очистка поверхности нагрева с водяной стороны	304
§ 61. Запасные части	308
§ 62. Техника безопасности в котельном отделении	308
§ 63. Теплотехнические испытания котлов	310
Приложения	312
Список литературы	318



Всеволод Константинович Лысенко,

Борис Иосифович Лубочкин

**Судовые паровые котлы.
Устройство и эксплуатация**

Редактор *И. В. Ридная*

Обложка художника *Е. Н. Волкова*

Технический редактор *Е. А. Тихонова*

Корректор *И. А. Мушникова*

Сдано в набор 5/IX 1974 г.

Подписано к печати 11/III 1975 г.

Бумага 60×90^{1/16} типографская № 2.

Печатных листов 20. Учетно-изд. листов 22,86

Тираж 7000 экз. Т-02262.

Изд. № 1-1-2/10 № 6548.

Зак. тип. 1578. Цена 85 коп.

Изд-во «ТРАНСПОРТ», Москва, Васманский туп., 6а

Ленинградская типография № 12 Союзполиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
196126, Ленинград, ул. Правды, 15.

85 коп.