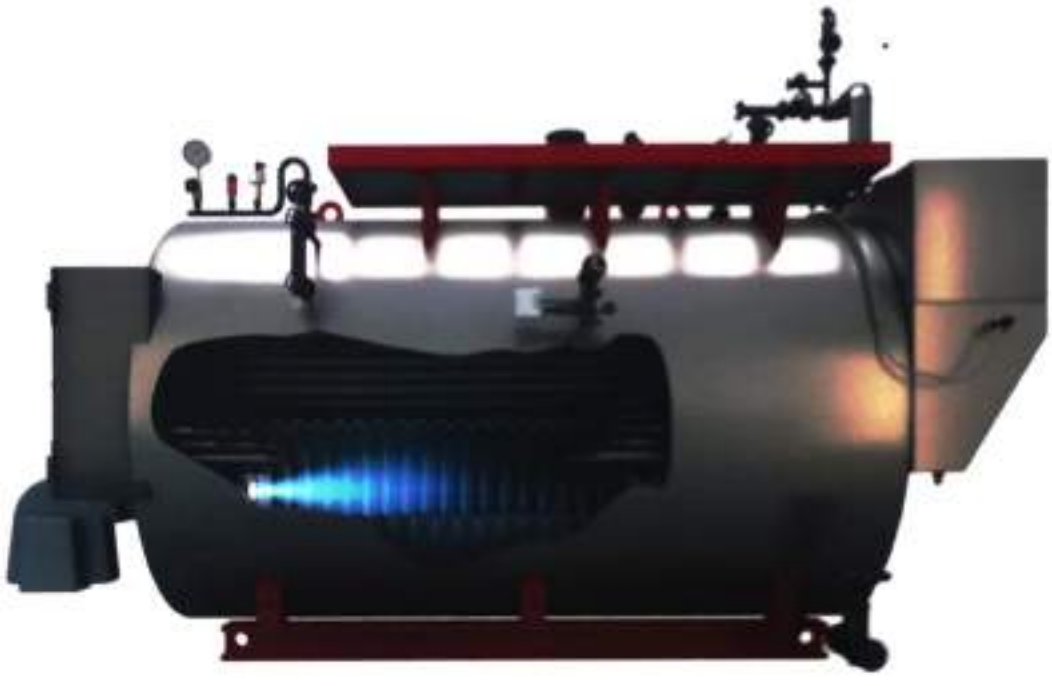
НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «ОДЕССКАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ»
ДУНАЙСКИЙ ИНСТИТУТ

Лихогляд К.А., Маслов И.З., Разинкин Р.А., Найденов А.И.

УСТРОЙСТВО СУДОВЫХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК И ИХ БЕЗОПАСНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ



Измаил – 2018

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «ОДЕССКАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ»
ДУНАЙСКИЙ ИНСТИТУТ

Лихогляд К.А., Маслов И.З., Разинкин Р.А., Найденов А.И.

УСТРОЙСТВО СУДОВЫХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК И ИХ БЕЗОПАСНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Бібліотека
ВСП "КІЛІЙСЬКИЙ ТРАНСПОРТНИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ДУІТ"
Інв. № 7488

Измаил – 2018

УДК 621.18

Маслов И.З., Разинкин Р.А., Найденов А.И. Устройство судовых котельных установок и их безопасная эксплуатация.

Под общей редакцией механика – универсала 1-го р-да К.А. Лихогляда.

Рекомендовано ученым советом Дунайского института Национального университета «Одесская морская академия» как учебное пособие по дисциплине «Судовые паровые котлы» специальности 271 «Речной и морской транспорт»,

Рецензенты:
Профессор кафедры судовых вспомогательных устройств Национального университета «Одесская морская академия»,
д.ф.-м.н., проф., Малахов Алексей Владимирович;
заведующий кафедрой судовой теплоэнергетики и холодильной техники Национального университета «Одесская морская академия»,
к.т.н., проф., Кирис Алексей Владимирович.

В учебном пособии рассмотрены конструкция и устройство судовых котельных установок. Приведены конструкции судовых паровых котлов с различной компоновкой поверхности нагрева. Представлен типовой расчет теплового баланса котла. Состав и основные системы котельных установок морских судов и принципиальные тепловые схемы главной судовой котельной установки и вспомогательной.

Учебное пособие предназначено для курсантов (студентов) специализации «Эксплуатация судовых энергетических установок», «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» а также начинающих механиков речного и морского транспорта.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АПУ	атомная паропроизводящая установка
БЗК	быстрозапорный клапан
ВНУ	воздухонаправляющее устройство
ВПК	вспомогательный паровой котел
ВУ	верхний уровень
ГД	главный двигатель
ГК	главный котел
ГСМ	горючесмазочные материалы
ГТЗА	главный турбозубчатый агрегат
ГТУ	газотурбинная установка
ДВС	двигателя внутреннего сгорания
КИП	контрольно-измерительные приборы
К.П.Д.	коэффициент полезного действия
КУ	котельная установка
МО	машинное отделение
НУ	нижний уровень
ПАВ	поверхностно-активные вещества
ПВД	подогреватель высокого давления
ПНД	подогреватель низкого давления
ПТЭ	правила технической эксплуатации
САР	система автоматического регулирования
СКУ	судовая котельная установка
СРЗ	судоремонтный завод
СУ	средний уровень
СЦК	система централизованного контроля
СЭУ	судовая энергетическая установка
ТВД	турбина высокого давления
ТИ	техническое использование
ТНД	турбина низкого давления
ТО	техническое обслуживание
ТС	техническое состояние
ТЭ	техническая эксплуатация
ТЭП	технико-экономические показатели
ТЭФ	техническая эксплуатация флота
УВК	утилизационный водогрейный котел
УК	утилизационный котел
УПК	утилизационный паровой котел
ЦПУ	центральный пост управления

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ 3
ВВЕДЕНИЕ 7
ГЛАВА 1 НАСЫЩЕННЫЙ ПАР. НАЗНАЧЕНИЕ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО СУДОВЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ 11
1.1. Насыщенный пар. Испарение и кипение жидкости 11
1.2. Назначение, принцип действия и место парового котла в составе судовой энергетической установки 14
1.3. Котел в составе главной паросиловой установки 18
1.4. Классификация судовых паровых котлов 23
1.5. Основные характеристики рабочего процесса судовых паровых котлов и параметры теплоносителей 30
ГЛАВА 2 ТОПЛИВО ДЛЯ СУДОВЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ. ГОРЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА. КОЭФФИЦИЕНТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС 36
2.1. Виды топлива и требования, предъявляемые к нему 36
2.2. Горение органического топлива. Коэффициент избытка воздуха 39
2.3. Определение коэффициента избытка воздуха по данным анализа дымовых газов 42
2.4. Энтальпия дымовых газов 43
2.5. Типовой тепловой баланс котлов 44
2.6. Особенность уравнений теплового баланса утилизационных котлов 50
ГЛАВА 3 ОБЩЕЕ УСТРОЙСТВО КОТЛОВ 54
3.1. Огнетрубные паровые котлы 54
3.2. Водотрубные паровые котлы 57
3.3. Процессы парообразования и естественной циркуляции 59
ГЛАВА 4 КОНСТРУКЦИИ СУДОВЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ 66
4.1. Конструкции судовых паровых котлов 66
4.2. Типовая схема секционного водотрубного котла (А) 67
4.3. Типовые схемы однопроточных котлов (Б), (В) 68
4.4. Типовая схема вертикально-водотрубного радиационного типа котла (Г) 68
4.5. Главные котлы однопроточные типа КВГ-25, 34, 43 69
4.6. Главный котел квг5 атомного лихтеровоза «СЕВМОРПУТЬ» 71
4.7. Котел ФОСТЕР-УИЛЛЕР 73
4.8. Главный котел радиационного, U-образного типа КВГ- 80 74
4.9. Двухконтурные котлы 77

4.10. Котлы с принудительной циркуляцией, прямоточные и высоконапорные парогенераторы 80
4.11. Высоконапорные парогенераторы 82
4.12. Схема компоновки высоконапорного парогенератора типа «СЮРАЛЬ» 85
4.13. Судовые ядерные энергетические установки (ЯЭУ) 87
ГЛАВА 5 КОНСТРУКЦИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ И УТИЛИЗАЦИОННЫХ СУДОВЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ. КОТЛЫ СИСТЕМ С ОРГАНИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ 91
5.1. Водотрубные вертикальные вспомогательные паровые котлы с естественной циркуляцией 92
5.2. Водотрубный вертикальный вспомогательный паровой котел с естественной циркуляцией с пароперегревателем 94
5.3. Вспомогательный водотрубный котел марки ESH 96
5.4. Водотрубный горизонтальный вспомогательный паровой котел с естественной циркуляцией 98
5.5. Вспомогательные водотрубные паровые котлы с многократной принудительной циркуляцией 99
5.6. Газотрубные (огнетрубные) вспомогательные паровые котлы 101
5.7. Принципиальные схемы устройства вспомогательных вертикальных газотрубного и газоводотрубного котлов 102
5.8. Судовые водогрейные котлы 103
5.9. Основные характеристики утилизационных паровых и водогрейных котлов. Их устройство и принцип действия 104
5.10. Устройство и принципы действия УПК и УВК 105
5.11. Водотрубный УПК с принудительной циркуляцией и вертикальным расположением змеевиков 108
5.12. Утилизационные газотрубные паровые котлы 109
5.13. Утилизационные водогрейные котлы 110
5.14. Устройство и принцип действия вспомогательных комбинированных паровых котлов 110
5.15. Схема комбинированного водотрубного котла с естественной циркуляцией и пароперегревателем газотурбинного судна 112
5.15. Принципиальная тепловая схема вспомогательной паросиловой установки с использованием утилизационного контура 113
5.16. Схемы и описание работы котельных установок теплоходов и газотурбоходов 116
5.17. Котлы систем с органическим теплоносителем 120

5.18. Котлы в системах термического обезвреживания судовых отходов 123
ГЛАВА 6 ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУДОВЫХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК 127
6.1. Требования к технической эксплуатации судовых паровых котлов 127
6.2. Подготовка питательной системы и заполнение котла водой 128
6.3. Подготовка топливной системы 129
6.4. Подготовка средств автоматизации 130
6.5. Разводка огня и подъём пара 131
6.6. Включение котла в работу 134
6.7. Обслуживание паровых котлов 135
6.8. Обслуживание котла при эксплуатации в режимах, отличных от нормальных 137
6.8. Прекращение работы котла 138
6.9. Основные неисправности и средства защиты паровых котлов 140
6.10. Теплотехнические испытания и обслуживание паровых котлов. Цель и виды теплотехнических испытаний 142
6.11. Водный режим паровых котлов. Водоподготовка 147
6.12. Предотвращение пожаров и несчастных случаев при эксплуатации котельной установки 153
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 157
ПРИЛОЖЕНИЕ: Методические рекомендации по выполнению курсовой работы 159

ВВЕДЕНИЕ

Еще в древности человек научился использовать энергию огня – в начале для отпугивания хищников, охоты на диких животных, приготовления пищи и обогрева жилища. Затем, по мере совершенствования навыков, человек, став земледельцем, использовал огонь для выжигания участков леса с целью последующего использования земли для выращивания окультуренных растений и организации пастбищ для диких животных, на которых охотился, а в дальнейшем для одомашненного скота.

В этот же исторический период человек заметил, что при нагревании из воды получается пар. В глубокой древности появились простейшие устройства для получения пара. К таковым можно отнести, например, шар Герона Александрийского (около 120 г. до н.э.) и паровую пушку Леонардо да Винчи (XV в.).

Эолипил или шар Герона Александрийского. Самый древний паровой двигатель.

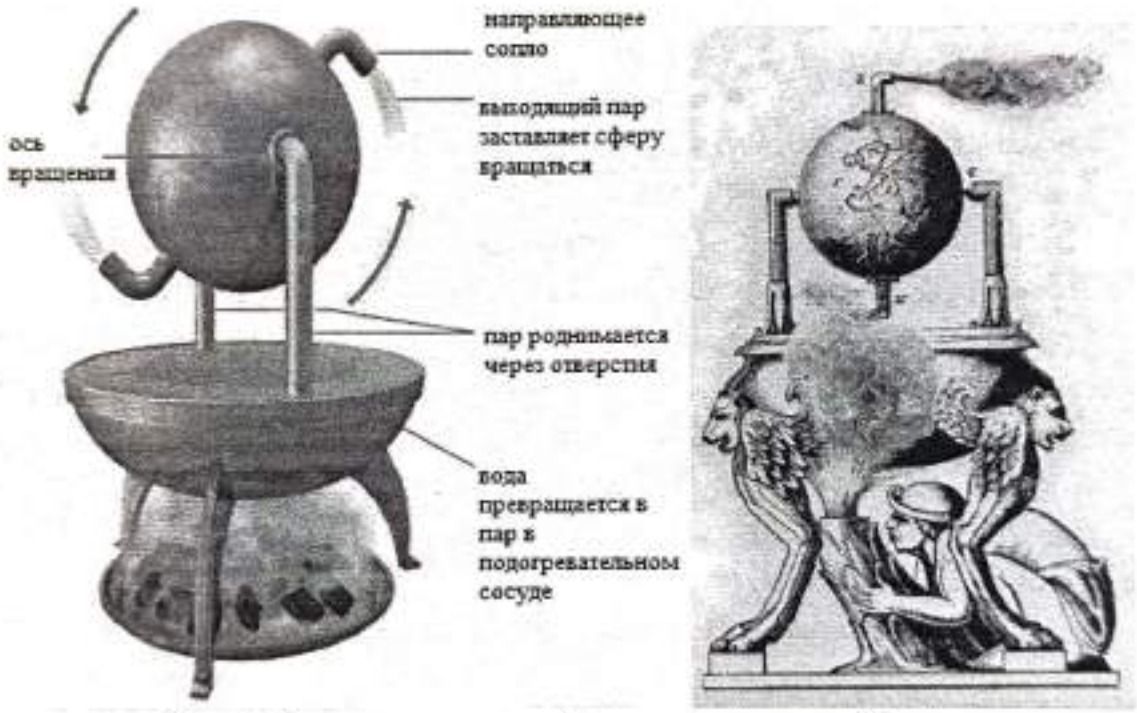


Рис. 1. Эолипил или шар Герона Александрийского

Однако, в течение многих столетий, вплоть до конца XVI – начала XVII веков энергия водяного пара практически не использовалась. Немногочисленные паровые водоподъемники, действовавшие в те времена, не имели собственного генератора пара – парового котла.

Впервые паровой котел как генератор пара был отделен от исполнительного механизма в 1606 г. в установке Джамбатиста дела Порта, предназначенной для подъема воды. Однако отсутствие в то время универсального парового двигателя тормозило развитие паровых котлов.

Практическое применение различных тепловых двигателей стало возможным в результате развития учения о тепловой энергии. Особая заслуга в этой области принадлежит гениальному русскому ученому М.В. Ломоносову (1711-1765гг.), который разработал молекулярно-кинетическую теорию тепла. История развития теплотехники неразрывно связана с разработкой и совершенствованием теплового двигателя, первым из которых являлась паровая поршневая машина.

В 1763 г. Талантливый русский теплотехник И.И. Ползунов (1728–1766гг.) разработал первый проект универсального парового двигателя, а в 1766 г. По его второму проекту была построена вся установка, которая состояла из поршневой машины и парового котла. Котел И.И. Ползунова имел уже основные элементы, присущие любому паровому котлу где был применен предварительный подогрев питательной воды, а также автоматический регулятор питания, что по существу являлось прообразом регулирования современного котла. Машина И.И. Ползунова строилась на горнорудных заводах Алтая для откачки воды. Английский изобретатель Д. Уатт (1736–1819) в 1784 г. запатентовал универсальный паровой двигатель совместно с паровым котлом, который работал в Лондоне на пивоваренном заводе для размалывания солода, где заменил конную тягу в 24 лошади, однако это произошло значительно позже испытания установки И.И. Ползунова.

Исключительно мощный подъемом пароэнергетики произошел с изобретением Джеймсом Уаттом паровой машины двойного действия (диаметр цилиндра 63 см, рабочий ход составлял 1,83 м, диаметр маховика – 4,27 м). Эту машину можно и сейчас увидеть в действии в Сиднейском музее «Powerhouse». Паровой двигатель Уатта годился для любой машины и этим не замедлили воспользоваться изобретатели самодвижущихся машин.

Пар произвел переворот в путях сообщения не только на земле, но и на воде. XIX век был ознаменован «веком пара».

Началом внедрения пара на морских судах считается постройка Фултоном в 1807 г. парохода «Клермонт» (сам Фултон называл судно «North River Steamboat» или « Demologos»). На этом деревянном судне с машинной мощностью в 20 л. с. (1 л. с. = 0,735 кВт) был установлен небольшой котел с кирпичной обмуровкой, в котором сжигались дрова. Первый русский пароход «Елизавета» совершил рейс от Петербурга до Кронштадта 3 ноября 1815 г. А в период 1815-1822 гг. было построено еще несколько пароходов, на которых устанавливались медные и железные коробчатые котлы с давлением пара 0,2 ... 0,3 ат (1 ат = 98066,5 Па).

Через 20 лет после постройки первого парового судна в мировом флоте насчитывалось уже около тысячи пароходов и их рост стал обгонять рост числа парусных судов.

В связи с применением в качестве топлива дров, а также малой надежности таких судовых энергетических установок (СЭУ) вначале XIX в. океанские пароходы были парусно-паровыми. До середины XIX в. питание котлов осуществлялось в основном морской водой. Образующаяся при этом в большом количестве накипь на поверхности нагрева вызывала перегрев стенок и нередко приводила к взрывам котлов.

Постройка во 2-й половине XIX в. стальных цилиндрических котлов и применение для их питания конденсата пара (пресной воды) дали возможность повысить давление до 5 – 7 атм. и уменьшить тем самым опасность взрыва.

В 70-х годах XIX в. появились судовые огнетрубные оборотные котлы, в которых применен перегрев пара, а в дальнейшем – подогрев подаваемого в топку воздуха, необходимого для сжигания топлива.

В конце XIX века появилась паровая турбина и выяснилось, что огнетрубный котел не может удовлетворить потребности турбины в паре повышенных параметров. Необходим был водотрубный котел и к началу XX века насчитывалось уже около 50-ти конструкций водотрубных котлов.

В 1910 году в расцвете развития паровых машин на «Балтийском заводе» в Санкт-Петербурге были построены две машины для линейного корабля мощностью 14 720 л. с. каждая.

Отечественной науке и технике принадлежит заслуга в решении проблем сжигания жидкого топлива в топках котлов. Так, способ сжигания жидкого топлива распылением был впервые предложен в 1865 г. А.И. Шпаковским. В конце XIX в. коллектив инженеров Тентелевского завода создал первую форсунку с механическим распылом жидкого топлива.

Следует отметить, что серьезный вклад в совершенствование паровых котлов внес прославленный адмирал Русского флота С.О. Макаров, именем которого названы Государственная морская Академия в Санкт-Петербурге, Государственный кораблестроительный институт в Николаеве, Высший Военно-морской институт во Владивостоке.

В своих исследованиях С.О. Макаров:

1. Разработал устройства и способы ускоренной разводки пара в корабельных паровых котлах, что было важно для боевых кораблей, на которых подъем температуры воды в котлах до 100°С занимал целый час, а с внедрением устройства Макарова – всего 10-20 минут.

2. Добился повышения экономичности паровых установок за счет внедрения ступенчатого использования пара.

3. Предложил использовать в качестве топлива для паровых котлов нефтяные остатки – мазут. В результате именно русский флот первым стал использовать жидкое топливо в котельных агрегатах.

Стремление кораблестроителей увеличить мощность огнетрубных котлов привело к созданию более сложных моделей с пароперегревателями,

воздухоподогревателями и экономайзерами. К началу XX в. давление пара было доведено до 1,8 – 2,0 МПа, паропроизводительность достигала 12 т/ч и более, а К.П.Д. составлял около 75%, однако выпуск подобных сложных агрегатов прекратился. С появлением паровых турбин, работавших на паре с высокими параметрами, огнетрубные котлы стали быстро вытесняться более совершенными, мощными, компактными и экономичными водотрубными котлами. Основные тенденции развития судовых котлов, наметившейся в этот период заключались в:

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

К 1910 г. были реализованы основные научно-технические решения, обеспечивающие значительное увеличение паропроизводительности котлов, что позволило наращивать мощность котельной установки с паровыми турбинами при одновременном снижении ее массы и габаритов.

Вместе с тем паросиловые установки по своим тепловым процессам оставались еще далеко не совершенными. Они имели низкую экономичность и большие массогабаритные характеристики.

В середине XX века с целью увеличения теплонапряжения топочного объема в котлах были применены подача воздуха в топку с давлением 900 – 1100 мм. в. ст. и двухфронтовое отопление. Улучшение характеристик котельной установки на основе компрессорного наддува воздуха в топку котла с использованием тепла уходящих газов в турбонаддувочном агрегате позволило повысить мощность паротурбинных установок до 25% при одновременном снижении на 35% его массы и увеличении к.п.д. на 3 – 4%.

Появились паротурбозубчатые установки с мощностью 45000 л. с. и более.

Таким образом, в настоящее время котлотурбинные энергетические установки с высоконапорными котлами являются малогабаритными, мощными установками на органическом топливе и широко применяются на современных крупных морских судах.

В последнее время для паротурбинных установок также используются U – образные главные котлы с потолочным расположением горелок, т.е. не на фронте, а в верхней части котла, что позволило повысить паропроизводительность до 100 т/час и параметры перегретого пара при к.п.д. агрегата до 96%.

ГЛАВА 1.
Насыщенный пар. Назначение, принцип действия и устройство судовых паровых котлов

1.1. Насыщенный пар. Испарение и кипение жидкости

Если за исходное состояние принимать однородную жидкость, а за конечное состояние пар этой жидкости, то изменение будет происходить в процессе парообразования или испарения.

В открытом сосуде жидкость постепенно испаряется вследствие того, что при хаотичном тепловом движении молекул жидкости отдельные молекулы, обладающие наибольшей скоростью, преодолевают поверхностное натяжение, вылетают в пространство над поверхностью раздела. Одновременно некоторое количество молекул пара из этого пространства, по той же причине возвращается обратно в жидкость.

Когда количество вылетевших молекул сравняется с количеством возвратившихся, наступит состояние динамического равновесия и процесс видимого испарения жидкости прекратится. В состоянии динамического равновесия над поверхностью жидкости образуется слой пара. Пар в данном случае, находящийся над жидкостью в равновесии с ней называется насыщенным.

Испарение жидкости в открытом сосуде приводит к потере молекул пара из поверхностного слоя, путем диффузии и перемешивания, проникают в окружающую среду и рассеиваются в ней, вызывая восстановление динамического равновесия.

В конце концов, наступит момент полного испарения жидкости в сосуде.

В закрытом сосуде всё обстоит иначе: молекулы, вылетая из жидкости, заполнят пространство над поверхностью жидкости, - наступит состояние динамического равновесия.

Вследствие того, что молекулы пара не смогут покинуть пределы закрытого сосуда наступит такая плотность молекул над поверхностью жидкости, а следовательно и давление насыщенного пара при котором дальнейшее испарение прекратится.

Если, не меняя температуры, изменить объём над поверхностью жидкости, в сторону увеличения, то концентрация молекул уменьшится, динамическое равновесие нарушится и для его восстановления произойдёт испарение дополнительного количества воды.

Таким образом, установится прежняя плотность молекул и прежнее давление насыщенного пара.

Если процесс испарения происходит при более высокой температуре, то из-за большей скорости молекул состояние динамического равновесия наступит при большей концентрации молекул насыщенного пара, следовательно, при большем давлении. Поэтому чем выше температура, при которой протекает испарение жидкости, тем выше давление насыщенного пара.

При интенсивном подводе тепла процесс парообразования идёт по всему объёму жидкости. Такой процесс испарения жидкости называют кипением.

В равновесном процессе кипения, как и испарения, температура кипения определяется давлением, под которым находится жидкость.

Температура кипения это та температура, при которой давление насыщенного пара жидкости равно внешнему давлению.

Кривая давления насыщенного пара (кривая равновесных фаз). Тройная точка

Зависимость между P - давлением насыщенного пара и t_s - температурой кипения устанавливается опытным путём.

Приведём зависимость $P = f(t_s)$ для водяного пара. Точки этой кривой - кривой равновесных фаз - это те состояния, при которых пар и жидкость (жидкая и газообразная фазы) находятся в устойчивом термодинамическом равновесии.

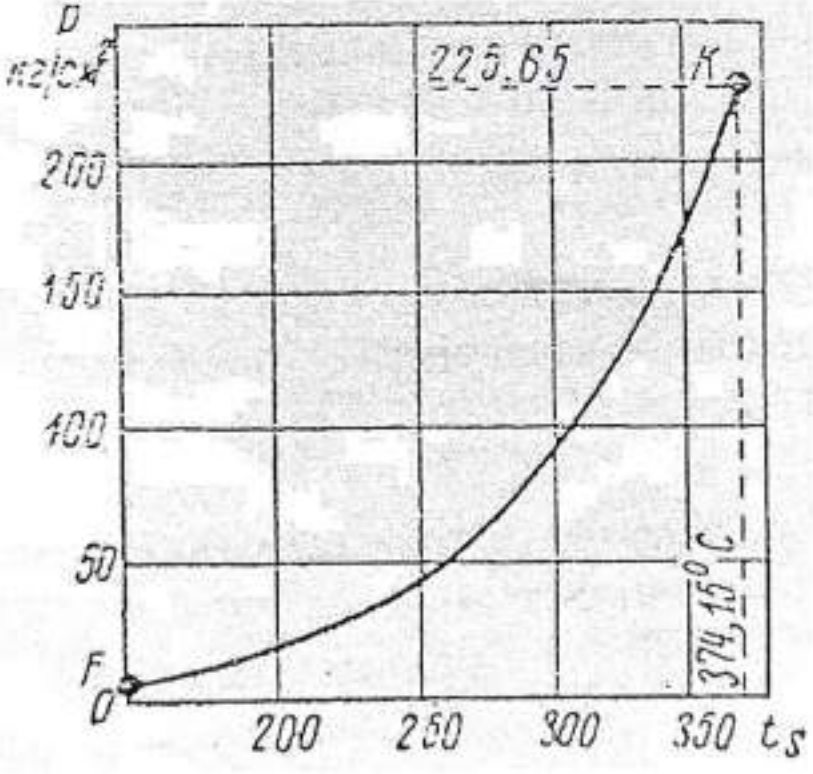


Рис. 1.1.1. Кривой равновесных фаз

Все точки не лежащие на кривой равновесия фаз, соответствуют отдельным фазам: - над кривой -жидкая фаза, под кривой - газообразная фаза.

Точка K - критическая точка, имеет параметры:

$$P_к = 225{,}65 \text{ ата и } t_s = 374{,}15°\text{C}$$

Выше критических параметров рабочее тело однородно, и между жидкостью и газом нет принципиальной разницы. Если жидкость при неизменном давлении не нагревать, а охлаждать, то жидкость переходит в твердую фазу, затвердевания или плавления. Как и в процессе испарения жидкость будет, при охлаждении находиться в двух фазах. Эта температура называется температурой затвердевания или плавления. Аналогично кривой $P = f(t_s)$ можно построить кривую $P = f(t_{пл})$.

Точка пересечения кривой равновесия жидкой и газообразной фазы с кривой жидкой и твердой фазы является фундаментальной, или тройной точкой (для воды $p_f = 0{,}00622$ ата и $t_f = 0{,}0075$°С). В этой точке сосуществуют и находятся в термодинамическом равновесии три различных фазы вещества (твердая, жидкая и газообразная).

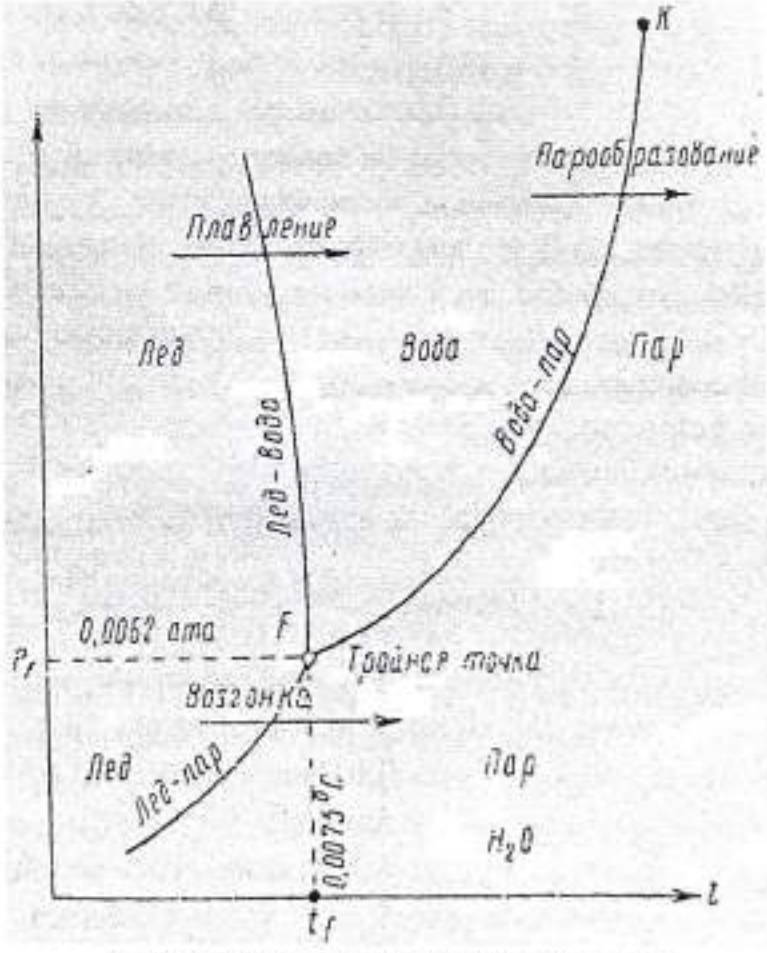


Рис. 1.2. Диаграмма состояния воды

Здесь видно, что ниже тройной точки F, жидкой фазы не существует, здесь твердая фаза переходит в газообразную. Процесс перехода твёрдого тела в газообразное называют сублимацией. Этим можно объяснить запах твёрдых тел, высыхание на морозе и т.п.

1.2. Назначение, принцип действия и место парового котла в составе судовой энергетической установки

Паровым котлом называется агрегат, где химическая энергия топлива превращается в тепловую энергию водяного пара, определенного давления и температуры.

Принцип действия парового котла определяется сущностью его рабочего процесса, который состоит в том, чтобы за счет подвода определенного количества тепла и воды генерировать тепловую энергию водяного пара заданного количества и качества.

Есть два источника получения тепла в судовом котле:

- первый (основной) – непосредственное сжигание органического топлива в топке котла, где химическая энергия топлива при окислении во время сгорания превращается в тепловую энергию. При этом образуются продукты сгорания топлива (дымовые газы), которые являются теплоносителем;

- второй – использование отработавших газов двигателя внутреннего сгорания (ДВС) или газотурбинной установки (ГТУ).

Паровой котел служит для производства влажного или перегретого водяного пара при давлении, превышающем атмосферное. Температура выходящего из котла влажного пара равна температуре насыщения, а температура перегретого пара после пароперегревателя может быть значительно больше температуры насыщения.

Водяной пар на судне предназначен для различных целей. Например, в главных паросиловых установках он необходим для работы главных тепловых двигателей – паровых турбин, а также для нагревания воды, топлива и других сред в различных теплообменных аппаратах. На судах с дизельными и газотурбинными установками пар нужен турбогенераторам, вырабатывающим электроэнергию, а также для обогревания жилых помещений. Кроме того, пар необходим для хозяйственных нужд (камбуза и др.).

Принципиальная схема котла показана на рис. 1.3, *а*, общий вид котлов разных типов – на рис. 1.3, *б*, *в*, *г*. Паровой котел (ПК) состоит из топки *I* и ряда рекуперативных теплообменников, расположенных за топкой: пароперегревателя *II*, испарителя *III*, водоподогревателя (экономайзера) *IV* и воздухоподогревателя *V*. В этих теплообменниках горячая среда (дымовые газы) отделена от холодной (пар, вода, воздух) непроницаемой твердой стенкой, то есть среды, обменивающиеся теплотой, не смешиваются друг с другом.

Назначение теплообменников следует из их названий: пароперегреватель – для перегрева пара, испаритель – для превращения воды в пар, экономайзер – для подогрева воды, а воздухоподогреватель – для подогрева воздуха. Испаритель представляет собой основную поверхность нагрева ПК, а теплообменники *II*, *IV*, *V* – дополнительную. Основную поверхность нагрева имеют

все котлы. Она может быть скомпонована совместно с топкой (Рис. 1.3, *б*, *в*). Дополнительная поверхность нагрева у ряда котлов может частично (Рис. 1.3, *б*, *г*) или полностью отсутствовать (Рис. 1.3, *в*). Котлы, использующие теплоту отработавших газов дизелей и газотурбинных двигателей (ГТД), могут не иметь топки (Рис. 1.3, *г*).

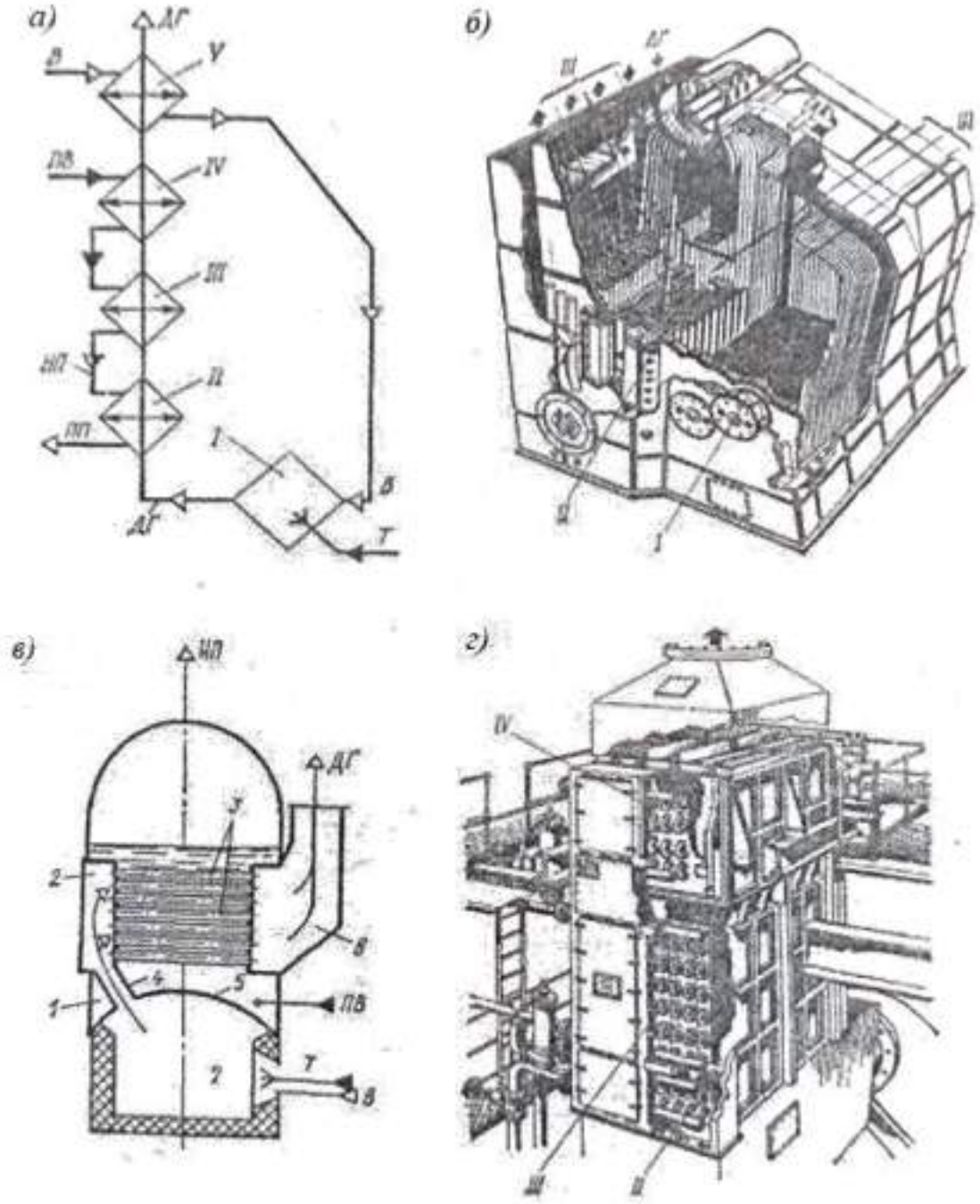


Рис. 1.3. Принципиальная схема парового котла (*а*) и общий вид главного (*б*), вспомогательного (*в*) и утилизационного (*г*) котлов

В – воздух; Т – топливо; ДГ – дымовые газы; ПП – перегретый пар; НП – насыщенный пар; ПВ – питательная вода

У паровых котлов можно выделить два независимых тракта: газовоздушный и пароводяной. Температура дымовых газов при движении через теплообменники *II–V* газовоздушного тракта снижается. Стрелками внутри теплообменников показано, что часть теплоты от газов в каждом из них отводится к нагреваемой среде, температура (энтальпия) которой при этом увеличивается.

Газовый тракт (рис. 1.4.) состоит из топки 1 и газоходов котла. В топке происходит сжигание топлива и передача тепла излучением радиационной поверхности нагрева (топочный экран 2, первые ряды парообразующих трубок 3). Из топки котла газы поступают в газоходы – каналы, в которых происходит конвективный теплообмен горячих газов с поверхностью нагрева котла 6 (теплоотдача при взаимодействии между поверхностью твердого тела и газообразной средой, омывающей эту поверхность).

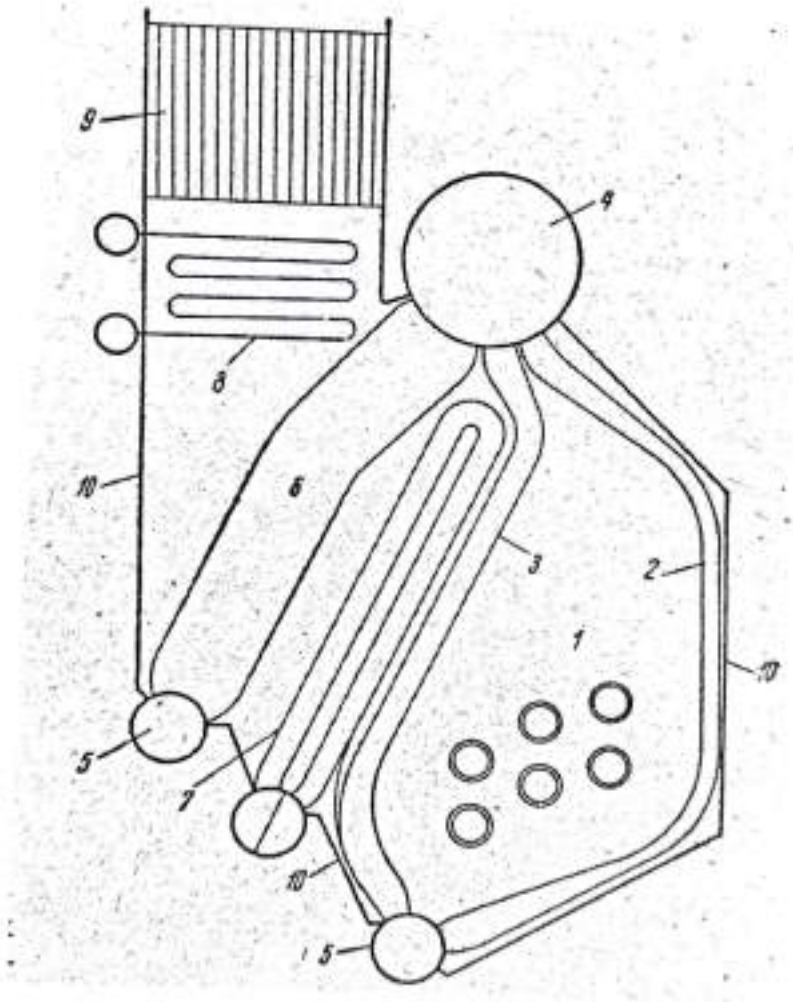


Рис. 1.4. Принципиальная схема трехбарабанного водотрубного котла

1 – топка котла; 2 – экран топочного пространства; 3 – радиационный пучок парообразующих трубок; 4 – пароводяной барабан; 5 – водяной барабан; 6 – конвективный пучок парообразующих трубок; 7 – пароперегреватель; 8 – водяной экономайзер; 9 – воздухоподогреватель; 10 – обшивка котла.

Проходя между трубок, газы отдают тепло воде, пару, воздуху двигающихся внутри них, и уходят в дымовую трубу.

Образующийся на парообразующей поверхности нагрева котла пар собирается в верхней части пароводяного барабана 4 называемой паровым пространством. Поверхность воды, разделяющая паровое и водяное пространства называется зеркалом испарения. Из парового пространства пар отводится в пароперегреватель 7, служащий для перегрева пара до заданной температуры. Из пароперегревателя перегретый пар поступает к потребителям.

Питательная вода забирается питательным насосом из деаэратора. Она подается через экономайзер 8 служащий для подогрева питательной воды теплом отходящих газов вплоть до температуры насыщения, в пароводяной барабан котла.

Для горения топлива в топку котла 1 необходимо непрерывно подавать воздух. Воздух до поступления в топку проходит через воздухоподогреватель 9, где он подогревается теплотой отходящих газов.

Для сжигания топлива котел снабжен специальным топочным устройством, состоящим из топливных форсунок и подающего воздух вентилятора. Топливо в топку котла подается специальным насосом через форсунки, служащие для его распыления, а воздух подается вентилятором через воздухонаправляющее устройство.

Судовой паровой котел должен обладать высокой надежностью, иметь простую и удобную в обслуживании конструкцию и наивысшую экономичность при возможно меньших габарите и массе. Надежность агрегата должна обеспечивать работоспособность установки в целом на всех ее эксплуатационных режимах – длительных и кратковременных, поэтому в него не включают элементы, которые снижают надежность при длительной эксплуатации. Надежность и эффективность рабочего процесса судового котла обеспечиваются как собственно агрегатом, так и другими частями установки, в состав которой могут входить вспомогательные устройства, арматура (запорные, предохранительные клапаны, регулирующие шиберы, водоуказательные приборы и т.д.), элементы системы автоматического регулирования, арматура и КИП.

Паропроизводительность и параметры пара являются основными показателями, позволяющими получить в СЭУ заданную мощность, поэтому котлы должны удовлетворять требованию надежного поддержания расчетных значений этих показателей в эксплуатационных условиях.

При резких изменениях нагрузки судовая энергетическая установка должна работать так же надежно, как и на любом другом расчетном установившемся режиме, что предопределяется, прежде всего, эксплуатационными возможностями котла.

Бібліотека КТФК
Інв. № 21488

Паровые котлы и вспомогательные элементы установки сообщаются следующими основными системами: питательной, топливной, перегретого и насыщенного пара, а также газовоздушного тракта.

Все обслуживающие агрегаты, вспомогательные элементы и системы составляют судовую котельную установку.

1.3. Котел в составе главной паросиловой установки

Паровой котел в комплекте с дополнительными поверхностями нагрева называют котельным агрегатом или парогенератором. Один или несколько котельных агрегатов вместе с обслуживающими их вспомогательными механизмами и устройствами (насосы, вентиляторы, теплообменные аппараты) называется котельной установкой (Рис. 1.5.).

Судовая котельная установка называется главной, если потребителями пара являются главные двигатели, и вспомогательной, если пар используется во вспомогательном оборудовании судна.

Основным составным элементом любой котельной установки является котел. Его тип и конструктивные особенности определяют состав и характеристики вспомогательного оборудования обслуживающих систем. В состав главной котельной установки входит один или несколько главных котлов. При использовании на судне только одного главного котла обычно предусматривается установка одного или даже двух вспомогательных котлов, обеспечивающих потребности судна в паре на стоянках и в экстремальных ситуациях в море. Вспомогательные котельные установки в зависимости от назначения судна и типа СЭУ состоят из одного или нескольких вспомогательных и утилизационных котлов.

Принцип действия парового котла определяется сущностью его рабочего процесса. Он состоит в том, чтобы путем подвода определенных количеств теплоты и воды генерировать заданное количество пара требуемого качества.

Паровой котел в агрегатированном исполнении может состоять из топки, парообразующих элементов, пароперегревателя, экономайзера и воздухоподогревателя. Во вспомогательных котлах в зависимости от назначения из трех последних элементов могут использоваться либо любые их комбинации, либо не использоваться никакие.

В топке котла сжигается органическое топливо. Выделившаяся теплота передается нагреваемым теплоносителям, в результате чего в котельных элементах происходит парообразование, а в пароперегревателе – превращение влажного насыщенного пара в перегретый до заданной температуры. Экономайзер служит для подогрева питательной воды, поступающей в котел, а воздухоподогреватель – для подогрева воздуха, поступающего в топку. Нагревающей средой в парообразующих элементах, пароперегревателе и

экономайзере являются дымовые газы, а в воздухоподогревателях могут использоваться как дымовые газы, так и водяной пар.

Паровой котел на жидком топливе обслуживают следующие системы: питательная, топливная, подачи воздуха и отвода дымовых газов, автоматического регулирования и сигнализации, продувки котла и ввода химических реагентов.

В работе судовой пароэнергетической установки особая роль принадлежит паровым котлам (парогенераторам), вырабатывающим рабочее тело (пар) для паровых турбин, вспомогательных механизмов, теплообменных аппаратов и бытовых нужд. Рабочими средами процессов в котле являются воздух, топливо, продукты сгорания топлива (газы), вода и пар.

Для работы котла 1 (Рис. 1.5.) топливо подается насосом 2 через подогреватели 3 и фильтр подается под давлением 16 – 20 атм. к форсункам. При выходе из форсунок распыленное топливо смешивается в топке с воздухом и сгорает. Воздух необходимый для горения, подается вентилятором 5 через воздухоподогреватель 6, подогревается до температуры 150 – 165°С, затем по воздухопроводу поступает в воздухонаправляющее устройство форсунок, а оттуда в топку. Дымовые газы, образующиеся в топке котла, проходят между трубками парообразующей поверхности нагрева пароперегревателя, экономайзера и внутри трубок воздухоподогревателя, отдают значительную часть своего тепла и уходят в дымовую трубу. Пар, образующийся в котле, поступает в пароперегреватель 7, перегревается, а затем направляется в турбину высокого давления (ТВД) 8 и турбину низкого давления (ТНД) 9. Из турбины низкого давления отработавший пар направляется в главный конденсатор 10, где конденсируется.

Для охлаждения отработавшего пара через главный конденсатор прокачивается забортная вода циркуляционным насосом 11. Образовавшийся конденсат откачивается из главного конденсатора конденсатным насосом 12, который подает конденсат последовательно через холодильники главных эжекторов 13, подогреватель низкого давления (ПНД) 14 и другие теплообменники в деаэратор 15, откуда он поступает в главный питательный насос 16. Питательный насос подает воду через поверхностный подогреватель высокого давления (ПВД) 17 в экономайзер котла. В экономайзере питательная вода подогревается до температуры насыщения и поступает в пароводяной барабан котла.

Подогреватели питательной воды низкого (ПНД), среднего (деаэратор) и высокого давления (ПВД) снабжаются греющим паром из отборов главной турбины (пар отбирается из ТНД, ресивера и ТВД).

В деаэратор направляется также и отработавший пар из ПВД. Конденсат греющего пара из ПНД направляется в сборник горячих конденсатов 18, а из ПВД в деаэратор. Конденсат рабочего пара эжектора первой и второй ступени

направляется в главный конденсатор, третьей ступени – в сборник горячих конденсатов. Утечки из цикла «пар – конденсат» пополняются дистиллятом, приготовляемым в испарительной установке, состоящей из испарителя первой ступени 19 и второй ступени 20. Турбоэлектрогенераторы 21 работают на паре тех же параметров, что и ГТЗА.

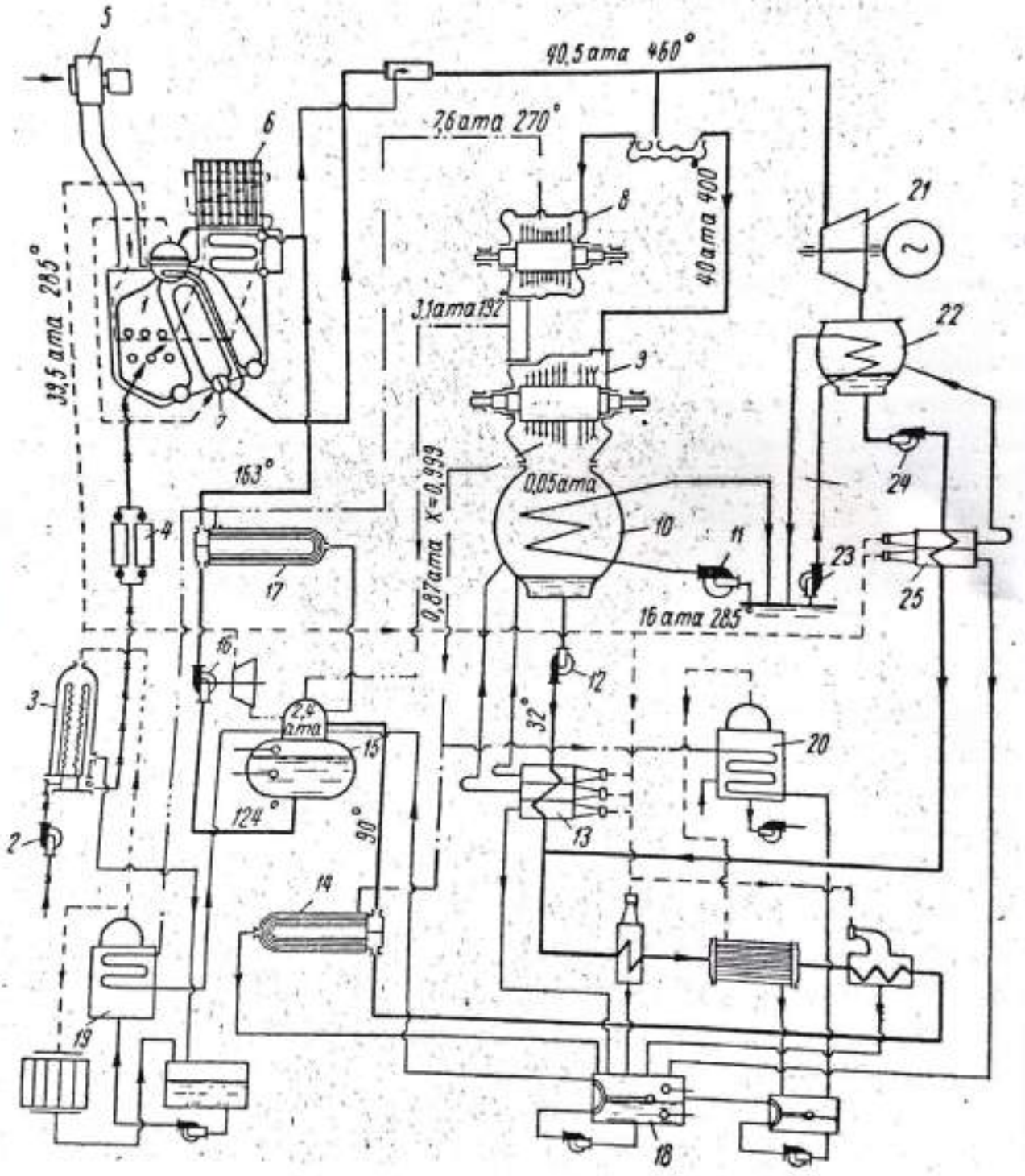


Рис. 1.6. Тепловая схема паросиловой установки

Отработавший пар сбрасывается во вспомогательный конденсатор 22, обслуживаемый вспомогательным циркуляционным насосом 23 и конденсатным насосом 24, а также пароструйным эжектором 25. Конденсат отработавшего

пара турбоэлектрогенераторов направляется в главную конденсатную магистраль.

Турбина питательного насоса и пароструйные эжекторы установки работают на охлажденном паре, причем давление пара перед эжекторами понижается редукционным клапаном до 1,6 МПа.

Такова общая принципиальная тепловая схема работы судовой главной паросиловой установки.

На рис. 1.7. в координатах S – T (S – удельная энтропия, Дж/(кг·^{O}К);

T – абсолютная температура, ^{O}К) изображен термодинамический цикл паротурбинной установки (ПТУ). Нижняя (x = 0), где x – степень сухости и верхняя (x = 1) пограничные кривые соответствуют состояниям насыщения кипящей воды и сухого водяного пара при различных давлениях. Изобарный процесс *1–2–3–4* ($p_1 = p_2 = p_3 = p_4$; p_1 = const;) реализуется в пароводяном тракте котла. Он состоит из более простых процессов: подогрева питательной воды до состояния, близкого к состоянию насыщения при давлении в котле (линия *1–2*); подогрева воды до кипения и образования влажного насыщенного пара, степень сухости которого близка к единице (линия *2–3*); подсушки и перегрева пара (линия *3–4*).

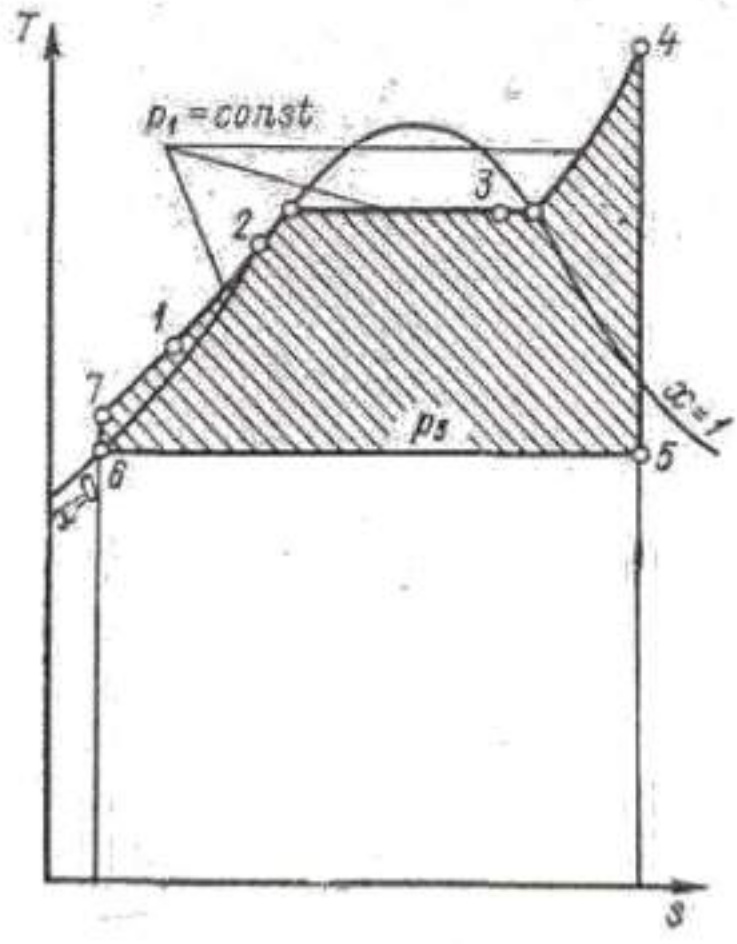


Рис. 1.7. Термодинамический цикл паротурбинной установки

Процессы превращения воды в перегретый пар происходят соответственно в экономайзере (линия *1–2*), в испарительной поверхности нагрева (линия *2–3*) и в пароперегревателе (линия *3–4*) ПК.

Паровой котел – основной элемент судового энергетического комплекса, упрощенная схема которого приведена на рис. 1.8. Весь комплекс можно условно разделить на две установки: турбинную (машинную) и котельную. В состав турбинной установки входят главный турбозубчатый агрегат (ГТЗА) *5* и вспомогательные турбоагрегаты (турбогенераторы) *4*, главный *7* и вспомогательный *6* конденсаторы и обслуживающие их системы (на рис. 1.8. не показаны).

Котельная установка включает паровой котел *1* и обеспечивающие его работу системы:

– питательную, состоящую из подогревателей питательной воды (ППВ) *10*, *13*, *14*, питательного насоса *12*. Трубопроводов *11* от паровых магистралей, конденсатных насосов *8*, *9*, измерительных приборов и арматуры;

– паровую, предназначенную для отвода пара потребителям по трубопроводам *2*, *3* с арматурой и контрольно-измерительными приборами;

– топливную, состоящую из расходных цистерн *16*, топливного насоса *15*, топливных фильтров *17*, подогревателя топлива *18*, трубопроводов с измерительными приборами и арматурой;

– газовоздушную, включающую газоход *20*, дымовую трубу (на схеме не показана), вентилятор *19* с воздухоприемником, воздушные коробы и др.

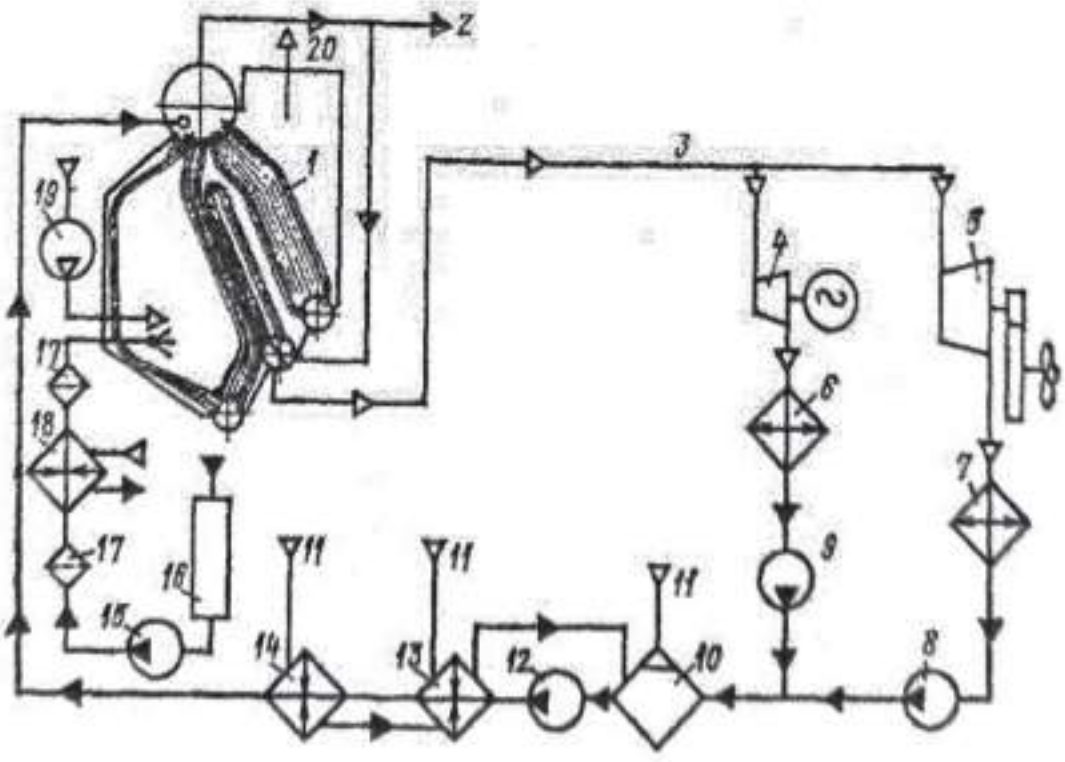


Рис. 1.8. Принципиальная схема судового паротурбинного энергетического комплекса

Котельная установка оснащена также системами автоматического регулирования подачи воды, топлива и воздуха в котел, водоподготовки, дистанционного управления и защиты ПК, которые на схеме не показаны. Бóльшая часть пара поступает в главный турбозубчатый агрегат *5*, остальная направляется к вспомогательному турбоагрегату *4*.

Отработавший в турбине ГТЗА 5 пар поступает в главный конденсатор *7*, где конденсируется и насосом *8* в виде конденсата (воды) нагнетается в ППВ *10*. Сюда же насосом *9* подается конденсат от вспомогательного конденсатора 6, а также греющий пар (стрелки на трубопроводах *11*) от отборов турбины ГТЗА 5. Вода в ППВ *10* смешивается с паром и нагревается до температуры кипения. Растворенные в ней газы удаляются в атмосферу, то есть смесительный подогреватель *10* служит также деаэратором питательной воды. Из подогревателя-деаэратора *10* питательным насосом *12* вода нагнетается в паровой котел *1* (через ППВ *13* и *14*, обогреваемые паром из отборов турбины ГТЗА *5*). Здесь теплота, выделившаяся при сжигании органического топлива, передается от дымовых газов к воде и пару. Топливо в топку котла *1* подается из расходной цистерны *16* насосом *15* через фильтры *17* и подогреватель топлива *18*. Туда же вентилятором *19* из атмосферы подается воздух, а образующиеся при сгорании топлива дымовые газы отводятся (стрелка *20*) в дымовую трубу.

Цикл ПТУ, изображенный на рис. 1.7., включает в себя процессы, происходящие не только в ПК, но и в других элементах СЭУ: *4–5* – адиабатное расширение пара в турбине; *5–6* – изобарно-изотермический процесс конденсации пара в конденсаторе; *6–7* – адиабатный процесс в насосах; *7–1* – изобарный процесс подогрева питательной воды в ППВ.

Термодинамическая эффективность цикла ПТУ в значительной степени зависит от параметров пара, производимого котлом.

1.4. Классификация судовых паровых котлов

Энергетические установки морских судов независимо от их назначения, а также типа применяемого главного двигателя должны обеспечивать потребителей паром требуемого количества и качества. С этой целью на судах используют котлы, назначением которых является генерирование пара с давлением выше атмосферного (избыточным).

Сравнительную оценку конструктивных схем и теплотехнических характеристик паровых котлов производят согласно определенной их классификации. Применительно к судовым энергетическим установкам классифицируют котлы по следующим основным признакам:

1. По назначению судовые паровые котлы используют в составе энергетической установки как главные, вспомогательные и утилизационные.

Главные котлы предназначены для получения пара, необходимого для работы главного двигателя, приводящего в действие гребной винт и некоторых вспомогательных потребителей.

Широкое распространение на транспортных судах в качестве главных нашли водотрубные котлы с естественной циркуляцией (Рис. 1.9). Корпус котла включает пароводяной коллектор *1*, водяной коллектор *6*, парообразующие трубы *3*, *7*, составляющие основную поверхность нагрева, и опускные необогреваемые трубы *2*, через которые подается вода в коллектор *6* и в парообразующие трубы *3*, *7*. В топку *4* котла через топочное устройство *5* подаются топливо и воздух, который предварительно нагревается в воздухоподогревателе *13* котла. Стрелки *14* указывают подвод воздуха к воздухоподогревателю, а стрелки *16* – к топочному устройству *5*. Дополнительные поверхности нагрева, образованные пучками труб пароперегревателя *9*, водяного экономайзера *12* и воздухоподогревателя *13*, последовательно размещены в газоходе котла. Они воспринимают теплоту от дымовых газов, которые, двигаясь по газоходе котла, постепенно охлаждаются. Дымовые газы температурой 150–200°С направляются в дымовую трубу (стрелки *15*). Дополнительные поверхности нагрева позволяют повысить экономичность котла, полнее использовать теплоту, выделившуюся при сгорании топлива.

Принцип действия такого котла заключается в следующем. При факельном сжигании топлива образуются продукты сгорания (дымовые газы), имеющие высокую температуру. В топке передача теплоты парообразующим трубам осуществляется в основном тепловым излучением от высокотемпературного факела, а вне топки (в газоходе котла направление хода газов указано стрелками *10*) – тепловой конвекцией от движущихся через основную и дополнительную поверхности нагрева дымовых газов. Охлажденные дымовые газы поступают в дымовую трубу (на рисунке не показана).

Питательная вода нагнетается питательным насосом по трубопроводу *11* в экономайзер, где подогревается до температуры на 20–30°С ниже температуры кипения. Оттуда она направляется в водяную часть коллектора *1*, смешивается с котловой водой и по опускным трубам *2* движется к водяному коллектору 6, из которого поступает в парообразующие трубы *3*, *7*. Ряд труб *3*, защищающих от облучения факелом опускные трубы *2*, называется *экраном*. Первые ряды пучка *7* и экрана воспринимают теплоту излучения газов в топке, а поверхности труб *7*, *9*, *12*, *13* – теплоту, передаваемую конвекцией от движущихся газов. Внутри труб *3* и *7* происходит процесс парообразования, появившаяся при этом пароводяная смесь поступает в коллектор *1*. Образовавшийся в циркуляционном контуре пар, пройдя водяную часть коллектора *1*, скапливается в его паровой зоне, откуда по перепускной трубе *17* направляется в верхний коллектор

пароперегревателя *9*, а вода, смешиваясь с питательной водой, вновь поступает по опускным трубам *2* к коллектору *6*.

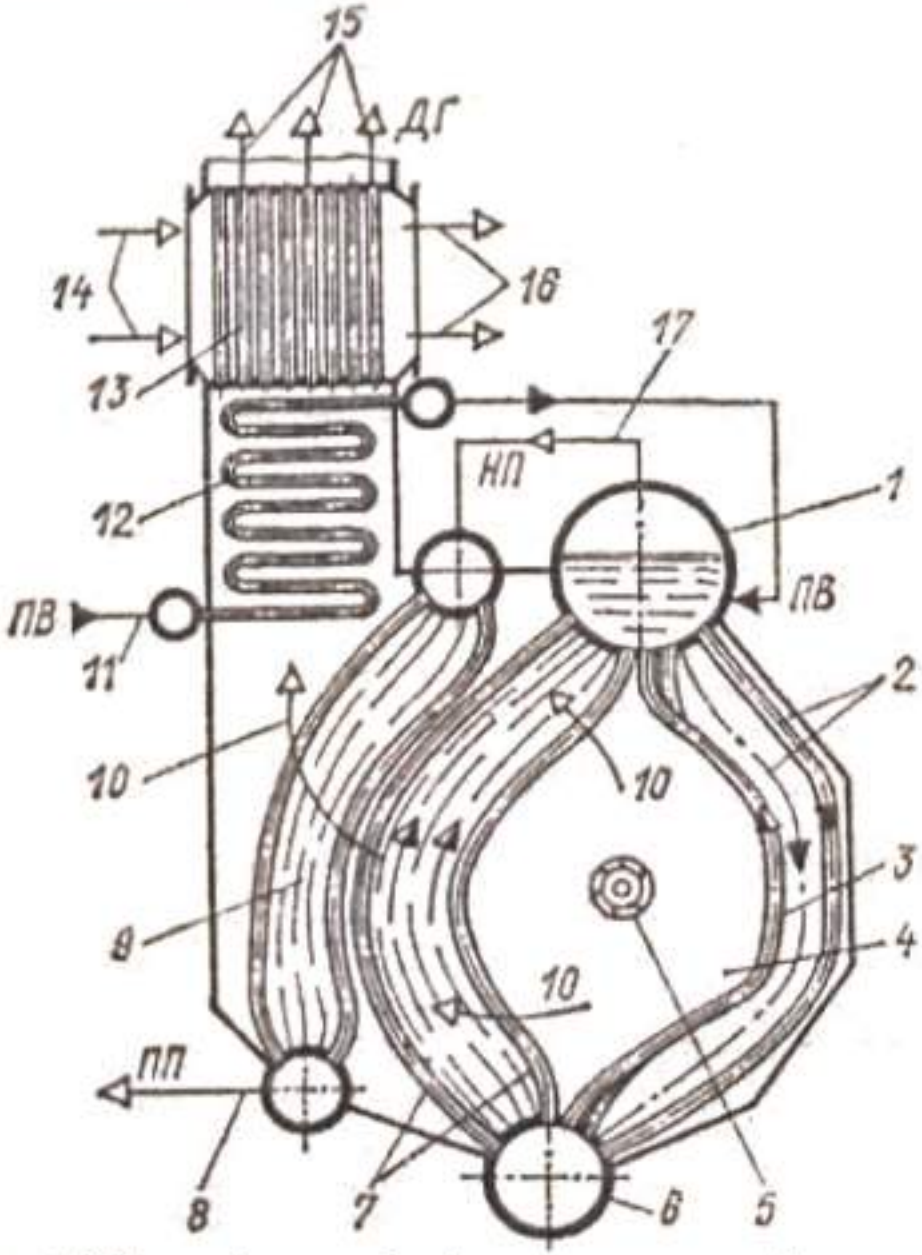


Рис. 1.9. Главный водотрубный котел с естественной циркуляцией

Вода и пароводяная смесь движутся по замкнутому контуру: пароводяной коллектор – опускные трубы – водяной коллектор – парообразующие трубы – пароводяной коллектор. Это движение происходит за счет разности удельного веса воды и пароводяной смеси в трубах и называется естественной циркуляцией. Совокупность элементов котла, в которых осуществляется замкнутое движение воды и пароводяной смеси, называют контуром циркуляции. У котла, показанного на рис. 1.9, только один контур циркуляции. Однако котлы могут иметь несколько таких контуров.

В пароводяном коллекторе *1* циркуляционного контура котла размещаются сепарирующие устройства (на схеме не показаны), поэтому пар, направляемый в

пароперегреватель, имеет степень сухости, близкую к единице. В пароперегревателе *9* пар подсушивается и перегревается. Перегретый пар через главный стопорный клапан (на схеме не показан) направляется к потребителям (стрелка *8*).

Вспомогательные паровые котельные установки применяют на судах с главными двигателями внутреннего сгорания (ДВС) и газотурбинными установками (ГТУ), где они служат для обеспечения паром некоторых вспомогательных механизмов, а также потребителей тепловой энергии (паротурбогенераторы, отопление, хозяйственно-бытовые нужды, подогрев топлива, подогрев груза на танкерах и др.).

На рис. 1.10. показана схема вспомогательного водотрубного котла с естественной циркуляцией.

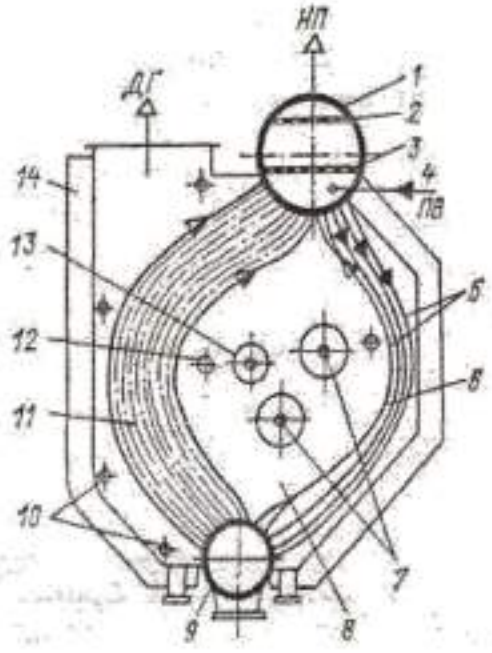


Рис. 1.10. Вспомогательный водотрубный котел

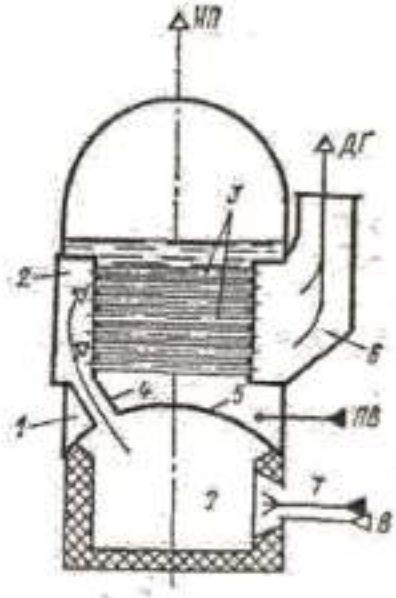


Рис. 1.11. Компоновочная схема вспомогательного огнетрубного котла типа «Кохран»

Во вспомогательном огнетрубном котле типа «Кохран» (Рис. 1.11.) дымовые газы из топки *7* по патрубку *4* поступают в огневую камеру *2* и по дымогарным трубам *3* через коробку *6* направляются в дымовую трубу. Корпус *1* над топкой содержит перегородку *5*, которая благодаря сферической форме не препятствует тепловым расширениям при нагревании и облегчает удаление отложений (шлама), оседающих на стенке перегородки *5*.

Котел не очень чувствителен к качеству питательной воды, обладает высокой аккумулирующей способностью, надежен в эксплуатации.

Утилизационными называются вспомогательные котлы, обогреваемые отработавшими газами ДВС и ГТУ.

В качестве примера рассмотрим принципиальную схему утилизационной котельной установки (Рис. 1.12.), в которой использован УК с принудительной циркуляцией воды и пароводяной смеси. При движении судна он обеспечивает перегретым паром турбогенератор, а насыщенным паром – вспомогательные потребители.

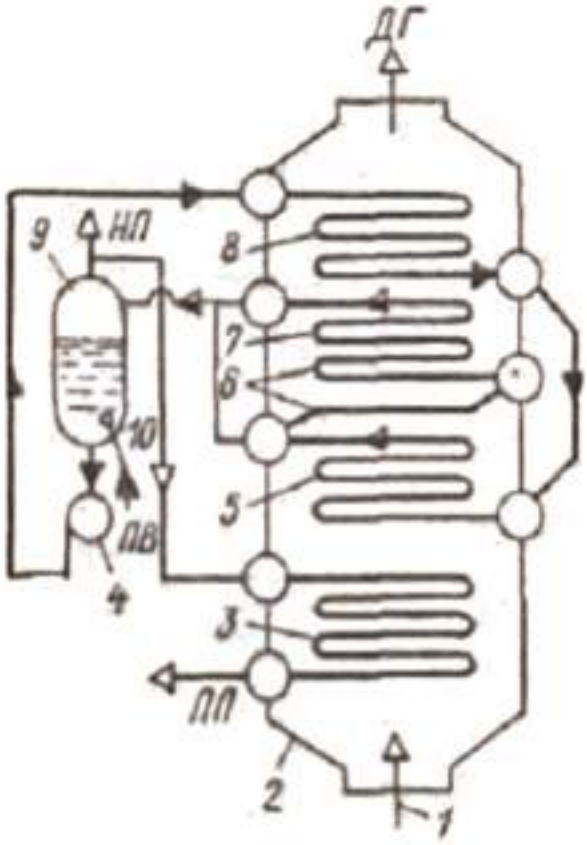


Рис. 1.12. Утилизационная котельная установка

Котельная установка включает собственно котел *2*, автономный сепаратор *9*, циркуляционный насос *4*. Утилизационный котел состоит из экономайзера *8*, двух секций парообразующих змеевиков *7* и *5* и пароперегревателя *3*. Дымовые газы поступают от главного двигателя (стрелка *1*), омывают поверхности нагрева, расположенные в корпусе котла, и уходят в дымовую трубу. Питательная вода поступает в сепаратор *9* (стрелка *10*), оттуда забирается циркуляционным насосом *4* и направляется в экономайзер *8*. Из экономайзера по перепускной трубе она поступает в нижнюю секцию *5* парообразующего пучка, которая соединена со второй секцией *7* трубой *6*. Пароводяная смесь из секции *7* направляется в сепаратор *9*. Насыщенный пар из сепаратора используется для бытовых нужд. Значительная часть производимого пара подается в пароперегреватель *3*, где перегревается и направляется к ходовому турбогенератору судовой электростанции.

2. По конструктивному исполнению, т.е. по относительному движению участвующих в теплообмене сред – дымовых газов и воды, котлы могут быть разделены на огнетрубные (или газотрубные), водотрубные и комбинированные (рис. 1.13.).

В огнетрубных котлах газы проходят по трубкам, а вода омывает их снаружи. В водотрубных котлах внутри трубок движется вода и пароводяная смесь, а горячие дымовые газы омывают трубы снаружи. Существуют также комбинированные котлы по общему устройству они близки к огнетрубным, но в них имеются конструктивные элементы водотрубных котлов.

Современные судовые котлы, как правило, выполняют водотрубными, а газотрубные применяют лишь как вспомогательные или утилизационные на некоторых теплоходах. Бывают также газоводотрубные котлы, у которых продукты сгорания топлива (дымовые газы) движутся в одной части котла внутри труб, а в другой – снаружи труб.

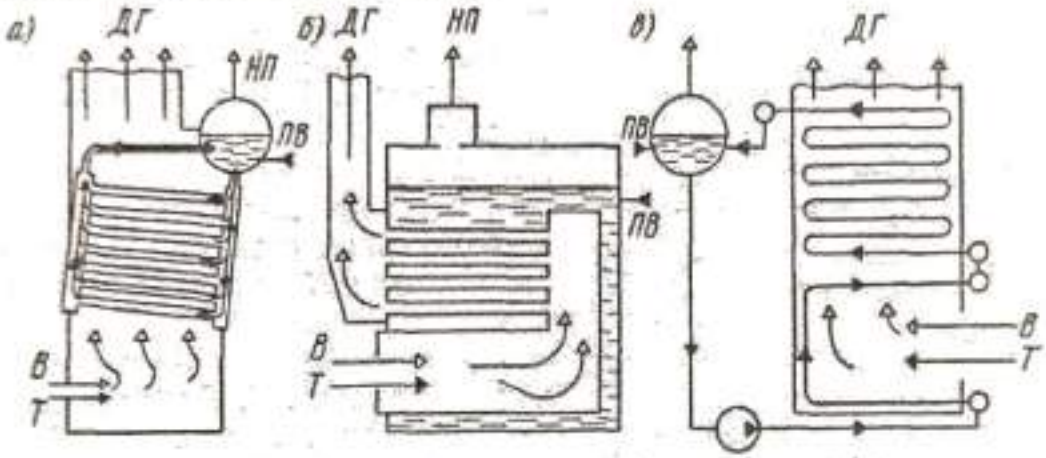


Рис. 1.13. Компоновочные схемы котлов:
а – водотрубного; *б* – огнетрубного; *в* – с принудительным током воды

3. По типу циркуляции воды и пароводяной смеси – с естественной циркуляцией, с принудительной циркуляцией и прямоточные.

Естественная циркуляция, т.е. движение воды и пароводяной смеси по замкнутому контуру происходит за счет разности температур и соответственно плотностей воды и пароводяной смеси, а также правильной компоновки парообразующих элементов.

Принудительная циркуляция это когда движение воды и пароводяной смеси в котлах осуществляется при помощи насосом.

Прямоточным котел называется, если при принудительной циркуляции вода один раз проходит по трубкам и полностью переходит в пар требуемых параметров.

В настоящее время на судах как главные, так и вспомогательные котлы обычно выполняются водотрубными с естественной циркуляцией.

Принудительную циркуляцию используют на прямоточных, высоконапорных и утилизационных котлах.

4. По способу подачи воздуха на горение топлива, т.е. по давлению в топке котлы можно разделить на обычные (атмосферные) и с наддувом (высоконапорные).

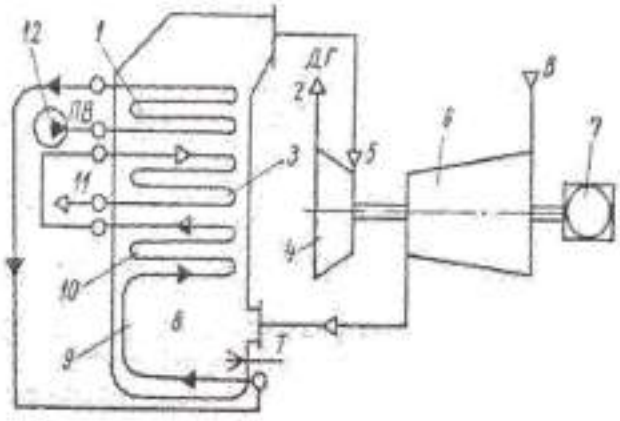


Рис. 1.14. Прямоточный высоконапорный котел

В обычных агрегатах топливо сжигается в топке при давлении, примерно равным атмосферному, а с наддувом – при давлении значительно выше атмосферного. В обычных котлах воздух подается вентилятором, и поэтому их называют также с вентиляторным дутьем. В котлы с наддувом воздух подается, как правило, турбокомпрессором и их называют с компрессорным наддувом или высоконапорными.

Значительно меньшие массу и габариты имеют прямоточные котлы (Рис. 1.14.), движение рабочей среды в которых происходит за счет напора питательного насоса *12*, подающего воду в экономайзер *1* котла. Подогретая питательная вода направляется в парообразующую поверхность нагрева, состоящую из труб *9*, полностью экранирующих топку *8*, и конвективного пучка *10*. Почти сухой пар поступает в пароперегреватель *3*, откуда перегретый пар через главный стопорный клапан направляется к потребителям (стрелка *11*).

Прямоточные котлы могут обеспечивать большую производительность и высокие параметры пара. Они компактны, маневренны, легко вписываются в габариты котельного помещения, однако очень чувствительны к качеству питательной воды и ненадежны при работе на малых нагрузках.

Котлы, в которых горение топлива в топке происходит при давлении в 2,5–4 раза выше атмосферного, называются высоконапорными. Они могут быть как с естественной, так и с принудительной циркуляцией воды.

Для подачи воздуха в высоконапорный прямоточный котел служит турбонаддувочный агрегат. В состав ТНА входят компрессор *6*, газовая турбина *4* и добавочный двигатель *7*. Образовавшиеся в топке дымовые газы, омывая последовательно поверхности нагрева, расположенные в газоходе котла, охлаж-

даются до температуры 550–650°С и поступают (стрелка *5*) в газовую турбину ТНА, здесь происходит их расширение и снижение температуры до 150–250°С. Из турбины газ поступает в дымовую трубу (стрелка *2*). Турбина приводит во вращение компрессор. Таким образом, работа газа в турбине расходуется на сжатие и нагрев воздуха в компрессоре.

При малой нагрузке котла мощность газовой турбины может оказаться недостаточной для сжатия воздуха в компрессоре и подачи его в топку. В этом случае применяется добавочный двигатель (электродвигатель или паровая турбина). Он не только восполняет нехватку мощности газовой турбины, но и служит источником энергии во время пуска котла из холодного состояния. Пар для паровой турбины поступает от другого котла или от береговой котельной установки.

5. По роду используемого топлива – работающие на твердом топливе, на мазуте, газе, утилизационные котлы (использующие теплоту отходящих газов), а также и ядерное топливо (ядерные реакторы).

На некоторых морских газовозах в топках вспомогательных котлов сжигается газ испаряющегося груза при повышении его температуры.

6. По виду тяги – с искусственной тягой (с помощью вентилятора) и котлы с естественной тягой (с помощью дымовой трубы).

7. По типу топлива главные и вспомогательные котлы могут работать на твердом, жидком и газообразном топливе. На некоторых газовозах в топках вспомогательных котлов сжигается газ испаряющегося груза.

Рассмотренная классификация судовых паровых котлов по указанных основным признакам нуждается в дополнениях, которые определяются конструктивными и другими конкретными особенностями агрегатов и отдельных их групп. Необходимость дополнительной классификации требует большая группа котлов с естественной циркуляцией, которые, кроме обычной схемы, могут быть выполнены и в виде двухконтурной компоновки и не стандартным расположением топочных устройств.

Двухконтурные котлы применяют, как вспомогательные агрегаты на танкерах с главными дизельными установками.

В настоящее время используются паросиловые установки с главным парогенератором с потолочным расположением горелок, т.е. не на фронтальной, а в верхней части котла.

1.5. Основные характеристики рабочего процесса судовых паровых котлов и параметры теплоносителей

Рабочий процесс парогенератора можно рассматривать состоящим из нескольких отдельных процессов, которые происходят в воздушно-газовом и пароводяном трактах.

В воздушно-газовом тракте происходит непрерывный подвод воздуха и топлива, горение топлива и отвод продуктов сгорания (дымовых газов), которые являются основным теплоносителем. Горение топлива и движение продуктов сгорания по газоходам обуславливают основной процесс, связанный с тепловыделением и передачей теплоты поверхностям нагрева котла. При движении воздуха и газов возникают аэродинамические сопротивления, на преодоление которых требуется определенный расход энергии.

В пароводяном тракте происходят процессы подвода питательной воды, подогрева ее до насыщения, парообразования, перегрева пара и отвод его к потребителям.

Для оценки теплотехнических особенностей процессов, происходящих в воздушно-газовом и пароводяном трактах, используют ряд показателей, зависимости между которыми называют характеристиками рабочего процесса.

К основным эксплуатационным показателям парогенератора относят такие величины, определяющие его надежность, безопасность и эксплуатационную эффективность. Основными показателями являются:

- **паропроизводительность** ($D_г$) - количество пара, производимого котлом в единицу времени при заданных параметрах пара. Это главный показатель, характеризующий нагрузку и у главных котлов он может составлять 10 – 80 т/час и более.

Вспомогательные котельные установки теплоходов могут иметь самые разные значения паропроизводительности – от 0,5 до 50 т/час. Эти цифры определяются, прежде всего, назначением судна;

- **расход топлива** (B) определяется общей экономичностью энергетической установки, его качеством, условиями эксплуатации и определяется в килограммах на час ($м^3$/час);

- **поверхность нагрева** (F) это площадь поверхности всех металлических стенок котла, которая с одной стороны обогревается пламенем горящего топлива и дымовыми газами, а с другой стороны омывается водой, из которой в результате нагрева образуется пар. Поверхность нагрева позволяет судить о размерах котла и измеряется в квадратных метрах ($м^2$) со стороны обогрева пламенем и газом. На современных судах поверхность нагрева вспомогательных паровых котлов составляет 10 ... 100 $м^2$.

- **удельная паропроизводительность (удельный паросъем)** (d) – количество пара, получаемого в котле с 1 $м^2$ поверхности нагрева в единицу времени:

$$d = D_к/F, \ (т/м^2 \cdot ч \text{ или } кг/м^2 \cdot с),$$

где $D_к$ – паропроизводительность, кг/ч или т/ч.

F – поверхность нагрева, $м^2$.

Удельная паропроизводительность (удельный паросъем) (d) характеризует интенсивность производства пара. На современных судах с каждого $м^2$

поверхности котла вырабатывается до 60 кг/м^2 · час пара, у высоконапряженных $80 - 120$ кг/м^2 · час.

- **удельное теплонапряжение поверхности нагрева котла** ($d_т$) – среднее количество тепла, воспринимаемого 1 м^2 поверхности нагрева в течение часа, т.е.

$$d_т = Q/H_к = D(i_п - i_{п.в.})/H_к, (ккал/м^2 \cdot час)$$

где $H_к$ – поверхность нагрева котла, м^2;

$i_п$ – энтальпия пара вырабатываемого котлом, ккал/кг;

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

Удельные теплонапряжения отдельных поверхностей нагрева котла имеют различные значения; например, лучевоспринимающая (радиационная) поверхность высоконапряженных котлов имеет тепловое напряжение $(4{,}5 - 5{,}0) \cdot 10^5$ ккал/м^2 · час, а конвективная $(2{,}0 - 6{,}5) \cdot 10^5$ ккал/м^2 · час и выше.

- **испарительность топлива** (u) – это условный показатель, который представляет отношение паропроизводительности к расходу топлива, т.е. его значение соответствует количеству пара, производимого при сжигании 1 кг топлива.

$$u = D_к/B;$$

Для главных котлов испарительность топлива составляет $13 - 14$ кг/кг, а для вспомогательных эта величина может быть несколько ниже;

- **рабочее давление и температура перегретого пара** (P; $t_{п.п.}$).

Обеспечение оптимальных параметров пара во время эксплуатации позволяет поддерживать требуемую экономичность установки при заданной ее мощности. Выбор оптимальных параметров пара для судовых установок представляет весьма обширную и самостоятельную проблему. Можно отметить, что развитие судовых главных пароэнергетических установок характеризуется повышением давления и температуры перегретого пара, так как это является основным средством снижения расхода топлива. Экономическая целесообразность повышения параметров пара тем больше, чем выше мощность энергетической установки.

В стационарной практике для мощных турбинных установок тепловых электростанций применяют сверхвысокие параметры пара (давление до 30 МПа и температура 650°С для энергоблоков мощностью $300 - 800$ МВт и более). Судовые пароэнергетические установки на крупных танкерах работают с параметрами – рабочее давление до 9 МПа и температура перегретого пара 515°С.

Главный судовой котел должен обеспечивать судно не только перегретым , но и охлажденным паром, необходимым для работы некоторых вспомогательных потребителей установки. Для получения охлажденного пара используют пароохладитель, который размещают обычно внутри пароводяного

барабана. Весь генерируемый насыщенный пар в котле проходит через пароперегреватель, а требуемое количество охлажденного пара получается за счет снижения температуры перегретого пара в пароохладителе. Основной параметр охлажденного пара – его температура, так как падение давления в пароохладителе сравнительно невелико. Пар за пароохладителем должен быть слабоперегретым.

Для вспомогательных котельных установок используют низкие параметры: давление примерно $0{,}5 - 1{,}2$ МПа, иногда до $3{,}0 - 3{,}5$ МПа, пар насыщенный или с небольшим перегревом. На современных морских теплоходах с мощными двигателями применяют энергетические установки с утилизационными турбогенераторами, работающими на слабоперегретом паре с температурой $240 - 280$°С.

- **температура питательной воды** ($t_{\text{п.в.}}$) является показателем, который характеризует работу котла и всей установки в целом. Температура питательной воды определяется тепловой схемой установки. В современных турбинных установках транспортных судов осуществляется регенеративный подогрев питательной воды паром, отбираемым из турбин и подогрев уходящими газами в экономайзере. Абсолютное значение температуры питательной воды определяется в основном начальными параметрами пара. Как правило чем выше эти параметры, тем больше будет и температура питательной воды, поступающей в котел. При использовании сверхвысоких параметров пара температура питательной воды при ее многоступенчатом подогреве достигает 280°С.

Для судовых установок температура питательной воды имеет большое значение, так как в эксплуатационных условиях ее изменение влияет на паропроизводительность (или на расход топлива) и на температуру перегретого пара.

- **температура воздуха**, поступающего в топку, зависит в основном от компоновки агрегата. Подача в топку подогретого воздуха улучшает процесс горения топлива и повышает экономичность котлов, в связи, с чем их, как правило, оборудуют воздухоподогревателями. В условиях морского транспорта судна температура горячего воздуха при сжигании мазута в топках главных котлов может достигать $200 - 250$°С, иногда и выше.

- **относительное водосодержание,** ω, характеризуется зависимостью:

$$\omega = G_{\text{в}}/D_{\text{к}},$$

где $G_{\text{в}}$ – количество воды в парообразующих элементах, кг;

$D_{\text{к}}$ – полная паропроизводительность, кг/час.

Физический смысл величины ω состоит в том, что она показывает, сколько потребуется времени на испарение всей воды, содержащейся в котле, если его нагрузка будет соответствовать паропроизводительности, равной $D_{\text{к}}$. Следовательно, чем выше нагрузка $D_{\text{к}}$, тем меньше ω, так как количество воды

$G_в$ практически мало зависит от нагрузки. При этом следует иметь в виду, что в величину $G_в$ входит лишь то количество воды, которое содержится в парообразующих элементах (экранных трубах, трубы водогрейных пучков, водяных и пароводяном барабанах). В экономайзерах судовых котлов вода доводится до состояния парообразования, поэтому ее запас в экономайзере не включен в величину $G_в$. Водосодержание характеризует аккумулирующую способность, т.е. инерционность котла, а следовательно, его работоспособность при изменениях нагрузки.

Для водотрубных котлов морских судов $\omega = 0{,}25 - 0{,}4$ ч. Возможны более высокие значения – $\omega = 0{,}5 - 1{,}0$ ч.

Чем меньше водосодержание, тем более заметны колебания уровня воды и давления пара при изменениях рабочего режима. При низких значениях ω надежная работа котла обеспечивается специальной системой автоматического регулирования уровня воды в барабане. На вспомогательных и утилизационных котельных установках водосодержание $\omega \geq 0{,}5$ ч, поэтому допускается установка простых систем автоматического регулирования уровня воды.

Котел, имеющий при прочих равных условиях большее водосодержание, всегда будет предпочтительнее для морского судна.

- **относительный вес котла** – отношение полного веса котла с водой к его часовой паропроизводительности:

$$g = G_к/D_к, \text{ кг/(кг/час)}.$$

Относительный вес высоконапряженных котлов бывает $g = 0{,}65 - 0{,}75$ кг/(кг/час), у низконапряженных $g = 2{,}5 \div 5{,}0$ кг/(кг/час).

- **удельная тепловая нагрузка топочного объема** – отношение количества тепла, выделяющегося в течение 1 часа в топке, к ее объему:

$$q_т = Q_т/V_т, \text{ ккал/(м}^3\text{/час)},$$

Высоконапряженные котлы работают с большой нагрузкой топочного объема, равной $q_т = (2 \div 3{,}5) \cdot 10^6$ ккал/(м^3/час), а низко напряженные обычно – $q_т = (4{,}0 \div 8{,}0) \cdot 10^5$ ккал/(м^3/час).

- **Коэффициент полезного действия котла** (к.п.д.) это отношение количества тепла, использованного в котле на парообразование, к количеству тепла, которое выделяется при сгорании топлива, т.е.

$$\eta_к = D_к(i_{пе} - i_{п.в.})/BQ_р^н,$$

где $i_{пе}$ – энтальпия перегретого пара, ккал/кг;

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

B – расход топлива, кг/час;

$Q_р^н$ – низшая теплота сгорания топлива, ккал/кг.

Коэффициент полезного действия (к.п.д.) является основной качественной характеристикой, отражающей экономичность работы парового котла. Для судовых котлов к.п.д. равен 0,75 ... 0,96. Это значит, что 75 ... 96% теплоты,

полученной от сжигания топлива, затрачивается на парообразование, а от 4 до 25% теплоты теряется с уходящими дымовыми газами в окружающую среду.

Паровой котел морского судна должен обладать высокой надежностью, иметь простую и удобную в обслуживании конструкцию и наивысшую экономичность при возможно меньших габарите и массе.

Паропроизводительность и параметры пара являются основными показателями, позволяющими получить в установке заданную мощность, поэтому паровые котлы должны удовлетворять требованию надежного поддержания расчетных значений этих показателей в эксплуатационных условиях. При резких изменениях нагрузки энергетическая установка должна работать не менее надежно, чем на любом другом расчетном установившемся режиме, что предопределяется, прежде всего, эксплуатационными возможностями котла. Основным показателем, обуславливающим надежную работу котла на изменяющихся нагрузках, является его водосодержание. Для морского судна будет предпочтительнее большее водосодержание при прочих равных условиях.

Требования, предъявляемые к паровым котлам по экономичности, необходимо оценивать не только при их нормальной нагрузке, но и по среднеэксплуатационному значению к.п.д., учитывая изменения режимов и ухудшение условий работы при различных сортах топлива, загрязнения элементов агрегата и т.д.

Для вспомогательных паровых котлов должны быть обеспечены заводом изготовителем, прежде всего простота конструкции, удобство обслуживания и высокая экономичность.

Для оптимального решения экономической эффективности и надежного использования судового энергетического оборудования является:

- правильный выбор параметров теплоносителей (воды, пара, топлива, воздуха, продуктов сгорания);

- показателей рабочего процесса и других характеристик, определяемых требованиями, которым должен удовлетворять паровой котел как агрегат оборудования судовой энергетической установки.

ГЛАВА 2

Топливо для судовых парогенераторов. Горение органического топлива. Коэффициент избытка воздуха. Тепловой баланс.

2.1. Виды топлива и требования, предъявляемые к нему

Топлива, которые сжигаются в топках котлов различных назначений, можно разделить на три основных вида: жидкое, твердое и газообразное. В судовых установках в основном используют жидкое топливо. В главных котлах применяют, как правило, только мазут, а во вспомогательных агрегатах могут использоваться кроме различных сортов нефтяного топлива, также газы, выделяющиеся из груза (при установке вспомогательного котла на танкерах или газовозах). В настоящее время появились паротурбинные суда, установки которых оборудованы паровыми котлами на угольном топливе (каменный уголь размалывается в специальных мельницах и угольная пыль подается на топочные форсунки).

Натуральное органическое топливо состоит из углерода C, водорода H, кислорода O, азота N, серы S, золы A, влаги W.

Элементарный состав топлива в процентах по весу обычно выражается формулой

$$C^{\text{р}} + H^{\text{р}} + O^{\text{р}} + N^{\text{р}} + S_{\text{л}}^{\text{р}} + A^{\text{р}} + W^{\text{р}} = 100\%$$

Химические элементы топлива находятся в топливе в виде органических соединений, часть серы и зола в виде минеральных соединений при сгорании распадаются и образуют новые химические соединения, которые составляют продукты сгорания. Горючие элементы топлива – это углерод, водород и часть серы, азот является инертной составляющей топлива, а кислород находится в соединении с горючими элементами и поэтому теплоту сгорания топлива уменьшает.

Сера в топливе содержится в основном в двух видах: горючую и негорючую. Горючая сера в сернистых соединениях с углеродом, водородом с металлами (FeS_2, $ZnSb$ др.) называется летучей. Негорючая сера находится в топливе в виде сульфатов. Сульфаты (соли серной кислоты), являются предельными окислами серы, вследствие чего эта часть серы топлива не горит и входит в состав минеральных негорючих примесей топлива, образующих золу. Золой топлива принято считать остаток, который получается от прокаливания топлива при температуре 800°С.

Влага топлива характеризуется общим значением влагосодержания, которая складывается из внешней и гигроскопической влаги. От внешней влаги топливо освобождается просушкой его при температуре $15-20$°С. Гигроскопическая влага удаляется сушкой топлива при температуре, несколько

превышающей 100°С. После удаления внешней и гигроскопической влаги из топлива его считают абсолютно сухим.

Состав топлива доведенного до абсолютно сухого состояния определяет сухую массу

$$C^{с} + H^{с} + O^{с} + N^{с} + S_{л}^{с} + A^{с} = 100\%;$$

состав горючей массы включает

$$C^{г} + H^{г} + O^{г} + N^{г} + S_{л}^{г} = 100\%.$$

Для перерасчета элементарного состава топлива одной массы на другую используют переводные множители.

Мазуты в зависимости от их качества и марки могут иметь примерно следующий состав рабочей массы: $C^{р} = 82 \div 86\%$; $H^{р} = 10{,}5 \div 11{,}5\%$; $S_{л}^{р} = 0{,}5 \div 3{,}5\%$; $N^{р} = 0{,}2 \div 0{,}3\%$; $O^{р} = 0{,}3 \div 0{,}5\%$; $W^{р} = 1 \div 3\%$; $A^{р} = 0{,}1 \div 0{,}2\%$.

Теплотой сгорания или теплотворной способностью топлива называется количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании 1 кг топлива. В зависимости от того, до какой температуры будут охлаждены продукты сгорания топлива, различают две теплоты сгорания: высшую и низшую.

Высшая теплота сгорания $Q_{в}^{р}$ – количество тепла, выделяющегося при полном сгорании 1 кг топлива с последующим охлаждением продуктов сгорания до температуры конденсации водяных паров и использованием их теплоты конденсации для парообразования в котле.

Низшая теплота сгорания $Q_{н}^{р}$ – количество тепла, выделяющегося при полном сгорании 1 кг топлива без использования теплоты конденсации водяных паров для парообразования в котле. При сгорании топлива в топке используется тепло равное $Q_{н}^{р}$, так как образующиеся при этом водяные пары отводятся в атмосферу и теплота парообразования их не используется.

Связь между низшей и высшей теплотой сгорания, учитывая потерю теплоты парообразования, выражается формулой

$$Q_{н}^{р} = Q_{в}^{р} - b(9H^{р} + W^{р})/100,$$

где $b = 2510$ кДж/кг – теплота образования 1кг водяных паров;

$9H^{р}/100$ – весовое количество водяных паров, образовавшихся в результате горения водорода;

$W^{р}$ – весовое количество воды находящееся в топливе и испарившейся при его сгорании.

Низшая теплота сгорания для мазутов составляет $39400 - 40700$ кДж/кг.

Требования, предъявляемые к топливу, используемому для морских котлов, являются: высокая теплота сгорания (теплотворная способность); малое содержание балласта (влажность и зольность) и других примесей; невысокая стоимость.

Основными характеристиками различных сортов мазута являются:

• **Плотность (density)** – представляет собой отношение массы вещества к занимаемому им объему при определенной температуре. Значение плотности зависит от температуры, которая определяется коэффициентом объемного расширения вещества. Плотность имеет размерность кг/м^3. Стандартная температура к которой приводят (пересчитывают) плотность нефтепродуктов при проведении торговых операций является 15°С.

• **Удельный вес («specific gravity» SG)** вещества определяется как отношение массы, содержащейся в заданном объеме, при некоторой температуре, к массе эквивалентного объема воды при той же температуре. Следовательно, характеристика удельного веса вещества, должна сопровождаться ссылкой на стандартную температуру SG при 60/60°F или 15/15°С. SG определяется ареометром (нефтеденсиметром) и приводится к стандартной температуре.

• **Вязкость (viscosity)** нефтепродуктов представляет собой меру сопротивления сдвигу слоев жидкости. В международной практике принята единица измерения вязкости в «сантистоксах» (1 сСт = 1мм^2/сек). Значение вязкости приводится обязательно с указанием температуры, при которой она была определена. Принято морские сорта топлив определять при 40°С, для дистиляторных и при 100°С – для остаточных тяжелых топлив. В торговых сделках принято оценивать вязкость остаточных топлив при 50°С. Максимальное значение вязкости топлива в цистерне хранения запаса, при которой обеспечивается эффективная перекачка топлива составляет 600 сСт.

• **Температура вспышки** называется минимальная температура, при которой пары мазута образуют с окружающим воздухом смесь, вспыхивающую при кратковременном соприкосновении с пламенем. Правилами классификационных обществ установлено требование, что топлива, имеющие температуру вспышки ниже 60°С (определенной в закрытом тигле), запрещены к использованию на судах за исключением особого оборудования.

• **Температура воспламенения** называется минимальная температура, при которой мазут не только вспыхивает, но и загорается с поверхности при поднесении к нему пламени и горит, не менее 5 сек.

• **Температура застывания (pour point)** – это температура, при которой мазут теряет подвижность. От температуры застывания зависит возможность транспортировки топлива по трубопроводам без его подогрева.

Требование высокой эксплуатационной эффективности энергетических установок, обеспечивающей снижение затрат на топливо, а, следовательно, и уменьшение себестоимости перевозок, предопределяет для морских котлов основной вид жидкого топлива – топочный мазут. На теплоходах для вспомогательных котлов допускается применение более высококачественных сортов жидких топлив.

2.2. Горение органического топлива. Коэффициент избытка воздуха

Горением называется химический процесс окисления топлива, с сопровождающимся интенсивным тепловыделением. Элементарным окислителем является кислород воздуха. В технике могут быть применены в качестве окислителя и другие вещества, способные выделить в свободном виде атомарный кислород (азотная кислота, чистый кислород). На сегодняшний день в обычных энергетических установках, к которым относятся также и судовые установки, окислителем применяется кислород из воздуха. Сложный химический процесс горения топлива может рассматриваться, как состоящий из отдельных актов горения элементов входящих в состав топлива – углерода C, водорода H и серы S.

Для горения элементов топлива необходим расчет необходимого количества окислителя (кислорода воздуха O) расчет, который, возможен из стехиометрических соотношений, устанавливающих количественные зависимости, характеризующие рассматриваемый химический процесс.

Горение может быть полным – с образованием негорючих продуктов сгорания (полного окисления): углекислого газа CO_2, водяных паров H_2O и сернистого ангидрида SO_2 – и не полным, когда в составе продуктов сгорания имеются также CO, CH_4, H_2 и различные углеводороды. Основным продуктом неполного сгорания является окись углерода CO так как количество других веществ (водорода H, углеводородов CH_4, и C_nH_n) ничтожно мало.

Требуемый расход кислорода и количество образующихся продуктов сгорания, а также тепловой эффект реакции определяются из стехиометрических уравнений горения.

Стехиометрия (от греческих слов стехио – элемент, иметрия – измеряю) – это область термохимии. Основной закон термохимии, согласно которому тепловой эффект реакции не зависит от промежуточных стадий, а определяется лишь начальным и конечным состоянием системы, был открыт в 1840 году русским химиком Г.И. Гессом. Согласно этому закону требуется лишь знать начальное состояние системы топливо – воздух и конечное состояние ее – продукты сгорания. Для использования стехиометрических уравнений расчеты выполняют для количеств реагирующих веществ, которые равны их килограмм-молю или кило-молю (кмоль). Киломоль это такое количество вещества, масса которого, выраженная в килограммах, численно равна молекулярной массе.

Вначале из стехиометрических соотношений определяют объем кислорода, требуемый для сжигания соответственно C, H, S, а затем их суммируют и, вычитая кислород, который содержится в топливе, получают объемную долю кислорода, необходимую для сжигания 1 кг топлива. Это позволяет подсчитать теоретическое количество воздуха для сжигания топлива. Использование

стехиометрических соотношений позволяет составить зависимости для сгорания элементов входящих в состав топлива.

Для примера рассмотрим сгорание углерода:

$$C + O_2 = CO_2 + Q^c;$$

$$1 \text{ моль } C + 1 \text{ моль } O_2 = 1 \text{ моль } CO_2.$$

Согласно закону Авогадро при нормальных условиях 1 кмоль O_2 имеет объем 22,4 м^3, а CO_2 – 22,29 м^3. Поэтому можно записать

$$12\text{кг } C + 22{,}4\text{м}^3 CO_2 = 22{,}29\text{м}^3 CO_2$$

При сгорании 1 кг углерода C получим

$$1\text{кг } C + 1{,}866\text{м}^3\ O_2 = 1{,}866\text{м}^3\ CO_2 + 33700 \text{ кДж}.$$

В 1 кг рабочей массы топлива содержится $C^р/100$ кг углерода. Поэтому можно определить объемное количество кислорода, необходимого для сгорания углерода 1 кг топлива, а также объемного количества образовавшегося при этом углекислого газа, м^3/кг,

$$V_{O_2}^C = 1{,}866\ C^р/100;$$

$$V_{CO_2} = 1{,}866\ C^р/100;$$

Аналогично для сгорания серы

$$V_{O_2}^S = 0{,}7\ S_л^р\ /100;$$

$$V_{SO_2} = 0{,}685\ S_л^р\ /100.$$

И для сгорания водорода

$$V_{O_2}^H = 5{,}61\ H^р\ /100;$$

$$V_{H_2O}^H = 11{,}2\ H^р\ /100,$$

(с учетом плотности водяных паров $\rho_{H_2O} = 0{,}804$ кг/м^3).

Полученные зависимости, а также известное количество вещества кислорода в топливе позволяют получить суммарный теоретический объем кислорода, необходимый для полного сгорания 1 кг топлива.

$$V_{O_2}^0 = 1{,}866C^р/100 + 0{,}7S_л^р/100 + 5{,}6H^р/100 - O^р/100\rho_{O_2},$$

где $\rho_{O_2} = 1{,}44$ кг/м^3 – плотность кислорода.

Для горения топлива подводится воздух, в котором содержится кислорода по объему около 21 %. Поэтому теоретическое необходимое количество воздуха может быть определено по

$$V^0 = V_{O_2}^0/0{,}21 = 0{,}0889(C^р + 0{,}375S_л^р) + 0{,}265H^р - 0{,}0333O^р.$$

Величина V^0 может быть оценена с достаточной для практических расчетов точностью по эмпирической формуле

$$V^0 = 0{,}262Q_н^р/1000.$$

Для эффективного сжигания любого топлива требуется определенное количество воздуха. Теоретически необходимого количества воздуха было бы достаточно для полного сгорания топлива лишь при условии вступления в реакцию с топливом всего кислорода воздуха. В эксплуатационных условиях

достичь столь однородной смеси воздуха и топлива нельзя, так как в процессе горения происходит неравномерное выгорание горючих составляющих топлива. Расходование определенных количеств топлива и воздуха связано с уменьшением их концентрации, что замедляет процесс выгорания частиц топлива. Поэтому приходится подводить воздуха больше, чем теоретически необходимо.

Отношение действительно подведенного количества воздуха $V_д$ к теоретически необходимому V^0 для сжигания топлива называется **коэффициентом избытка воздуха**:

$$\alpha = V_д/V^0 \geq 1$$

Оптимальное, т.е. обеспечивающее наименьшие тепловые потери, значение коэффициента избытка воздуха зависит от ряда факторов: рода топлива, совершенства топочного устройства, нагрузки котла и др.

Для главных котлов это значение может составлять $\alpha = 1{,}1 \div 1{,}2$, а в современных новых агрегатах $\alpha = 1{,}03 \div 1{,}05$. Для вспомогательных котлов коэффициент избытка воздуха несколько выше, т.е. $\alpha = 1{,}2 \div 1{,}3$.

Количество продуктов сгорания (дымовых газов), образовавшихся при сжигании 1 кг топлива, определяется в соответствии с рассмотренными стехиометрическими уравнениями.

Полное объемное количество продуктов сгорания 1кг топлива определяют по уравнению:

$$V_г = 1{,}866K^р/100 + 0{,}008N^р + (1{,}0161\alpha - 0{,}21)V^0 + 0{,}5V_{CO} + \\ + 0{,}0124(9H^р + W^р) + 1{,}24G_{пр}$$

где $K^р = C^р + 0{,}375S_л^р$ % - приведенный углерод.

Масса продуктов сгорания 1 кг топлива $G_г$ включает: массу 1 кг собственно топлива за вычетом массы золы $A/100$ (кг/кг), которая в дымовые газы не переходит; массу сухого воздуха $1{,}293\alpha V^0$, кг/кг, и массу влаги воздуха $0{,}01293\alpha V^0$, кг/кг (при влажности $d = 10$г/кг) или $1{,}293\alpha V^0 + + 0{,}01293\alpha V^0$ кг/кг. При наличии расхода пара на распыливание мазута учитывается также величина $G_{пр}$, кг/кг

$$G_г = 1 - A^р/100 + 1{,}306\alpha V^0 + G_{пр}.$$

Рассчитанные величины $V_г$ и $G_г$ позволяют определить плотность продуктов сгорания $\rho_г$, кг/м^3,

$$\rho_г = G_г/V_г.$$

Необходимые для расчетов котлов парциальные давления RO_2 и H_2O рассчитываются соответственно по зависимостям, МПа:

$$P_{RO_2} = PV_{RO_2}/V_г; \quad P_{H_2O} = PV_{H_2O}/V_г$$

где P – давление в топке, МПа.

2.3. Определение коэффициента избытка воздуха по данным анализа дымовых газов

Коэффициент избытка воздуха является важным показателем рабочего процесса котла, характеризующим его экономичность и надежность, прежде всего хвостовых поверхностей нагрева. В связи с этим при теплотехнических испытаниях котла, проводимых с целью определения его показателей, всегда устанавливают также и коэффициент избытка воздуха α. Для этого производят анализ состава и свойств дымовых газов. Во время эксплуатации для оценки качества сгорания топлива также выполняют упрощенный анализ газов по газоанализатору и определяют величину α. Расчетная формула коэффициента избытка воздуха имеет вид:

$$\alpha = 1/(1-3{,}76)(O_2 - 0{,}5CO)/[100-(RO_2 + O) - CO],$$

где RO_2, O_2, CO – процентные содержания соответственно трехатомных газов, кислорода, окиси углерода в продуктах сгорания, определяемые во время работы котла с помощью газоанализатора.

Полученные непосредственным измерением величины RO_2 и O_2 позволяют рассчитать значение CO по следующей зависимости:

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

где β – характеристика топлива, которая в зависимости от качества топлива меняется в пределах $\beta = 0{,}28 \div 0{,}35$.

Если бы полное сгорание можно было обеспечить при коэффициенте избытка воздуха, равном единице ($\alpha = 1$), тогда в дымовых газах свободного кислорода не было бы ($O_2 = 0$). В этом случае в продуктах сгорания было бы максимальное количество вещества RO_2, которое можно определить по уравнению:

$$(RO_2)_{\max} = 21/1 + \beta\ \%,$$

эта величина постоянная и зависит только от элементарного состава сжигаемого топлива и, следовательно, от значения β и можно считать, что

$$(RO_2)_{\max} = 16{,}4 \div 15{,}6\ \%.$$

Во время эксплуатации котлов $RO_2 < (RO_2)_{\max}$ и определяется это величиной избытка воздуха, т.е. значением O_2. Приближенно можно определять коэффициент избытка воздуха,

$$\alpha = (RO_2)_{\max}/RO_2.$$

Также по данным анализа продуктов сгорания газоанализатором можно определить объем сухих газов:

$$V_{с.г.} = 1{,}866K^{р}/RO_2 + CO,$$

где $K^{р} = C^{р} + 0{,}375S_{л}^{р}$ %. – приведенный углерод, RO_2 – содержание образовавшихся трехатомных газов (CO_2 и SO_2) при сгорании топлива.

2.4. Энтальпия дымовых газов

Количество теплоты, которое получают продукты сгорания 1кг топлива при постоянном давлении, называется их энтальпией: $I_г$, кДж/кг.

Энтальпия дымовых газов при температуре $t_г$ определяется по уравнению

$$I_г = I_г^0 + (\alpha - 1) I_в^0 + I_{H_2O}^{\alpha},$$

где $I_г^0$ и $I_в^0$ – теоретические энтальпии соответственно дымовых газов (при $\alpha = 1$) и избыточного воздуха;

$I_{H_2O}^{\alpha}$ – энтальпия водяных паров, содержащихся в избыточном воздухе.

Характерной особенностью рабочего процесса современных парогенераторов является сжигание топлива при малых избытках воздуха ($\alpha = 1{,}03 \div 1{,}02$), что может быть обеспечено при сравнительно низких значениях теплового напряжения топочного объема – $520 - 640$ МВт/м^3, а также за счет рациональной компоновки высокоэффективных топочных устройств, включающих форсунки обычно с паромеханическим распылением мазута. Малые избытки воздуха позволяют уменьшить температуру точки росы дымовых газов. В этих условиях возможное значительное повышение к.п.д. котла до $96 - 97$ %.

Таблица 1. Энтальпия 1 м^3 газов и влажного воздух ($d = 10$ г/кг)

Температура t, °C	Энтальпия, кДж/м^3					Температура t, °C	Энтальпия, кДж/м^3				
	$^{(ct)}CO_2$	$^{(ct)}N_2$	$^{(ct)}H_2O$	$^{(ct)}O_2$	$^{(ct)}B$		$^{(ct)}CO_2$	$^{(ct)}N_2$	$^{(ct)}H_2O$	$^{(ct)}O_2$	$^{(ct)}B$
100	169	130	151	132	132	1200	2717	1696	2131	1800	1754
200	357	260	304	267	266	1300	2976	1850	2344	1963	1913
300	559	392	463	407	403	1400	3240	2009	2558	2127	2076
400	772	527	626	552	542	1500	3504	2164	2779	2294	2239
500	996	664	794	699	684	1600	3767	2323	3001	2461	2403
600	1222	804	967	850	830	1700	4035	2482	3227	2629	2566
700	1461	946	1147	1005	979	1800	4303	2642	3458	2796	2729
800	1704	1093	1335	1160	1130	1900	4571	2805	3688	2968	2897
900	1951	1243	1524	1319	1281	2000	4843	2964	3926	3139	3064
1000	2202	1394	1725	1478	1436	2100	5115	3127	4161	3307	3232
1100	2457	1545	1926	1637	1595	2200	5387	3290	4399	3483	3399

где $^{(ct)}CO_2$, $^{(ct)}N_2$, $^{(ct)}H_2O$, $^{(ct)}O_2$, $^{(ct)}B$ - энтальпия 1 м^3 углекислого газа, азота, водяных паров, кислорода и влажного воздуха (кДж/м^3).

В зависимости от коэффициента избытка воздуха (α) строят графическую зависимость энтальпии дымовых газов ($I_г$) от температуры (t°C) в диаграмме $I-T$ (Рис. 2.1.).

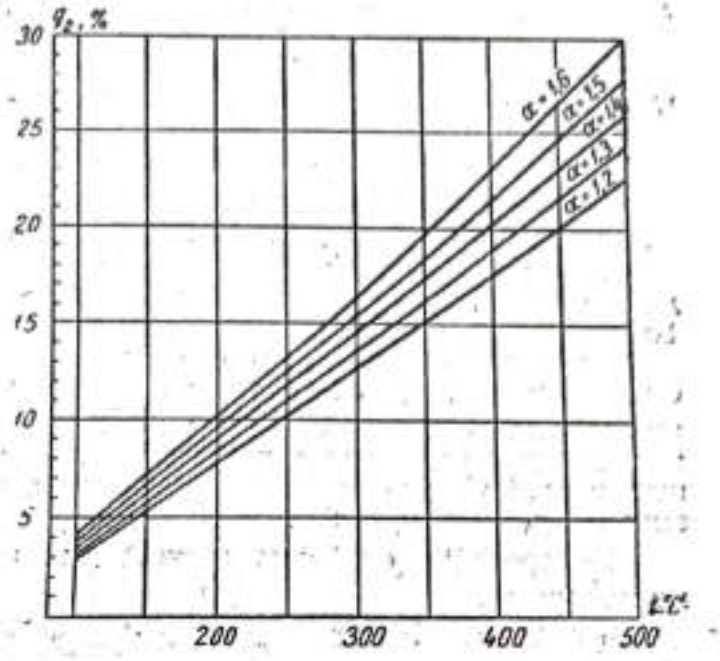


Рис. 2.1. Зависимость потери с уходящими газами от их температуры и коэффициента избытка воздуха

q_2 – потеря тепла с уходящими газами, (%); t°C – температура уходящих газов.

2.5. Типовой тепловой баланс котлов

При сжигании топлива в топке котла может теоретически выделиться тепло, равное его низшей теплотворной способности. В действительности, из-за потерь, сопровождающих процесс горения, получается меньшее количество тепла, но и оно также полностью не используется. Часть тепла теряется в окружающую среду, а часть уходит из котла с дымовыми газами.

Полезное тепло Q_1, используемое при сжигании 1 кг топлива для получения пара будет определить по уравнению:

$$Q_1 = \frac{D_{\text{пе}}(i_{\text{пе}} - i_{\text{пв}}) + D_{\text{н}}(i_{\text{н}} - i_{\text{пв}})}{B}, \text{кДж, кг}$$

где $D_{\text{пе}}$, $D_{\text{н}}$- вес перегретого и насыщенного пара, вырабатываемого котлом, кг/час;

$i_{\text{пе}}, i_{\text{н}}$- теплосодержание перегретого и насыщенного пара, кДж/кг;

$i_{\text{пв}}$- теплосодержание питательной воды, кДж/кг;

B- массовый расход топлива, кг/час.

Таким образом, потери тепла при преобразовании химической энергии 1 кг топлива в тепловую энергию пара будут определить по уравнению:

$$\sum Q_{\text{пот}} = Q_{\text{р}}^{\text{н}} - Q_1, \text{кДж/кг}.$$

Различают следующие потери тепла: с уходящими газами Q_2, от химического недожога Q_3, от механического недожога Q_4 и в окружающую среду Q_5.

Потеря тепла с уходящими газами обусловлена тем, что температура дымовых газов, уходящих из котельного агрегата в дымовую трубу, значительно больше, чем наружного воздуха.

При неполном горении в дымовых газах содержатся горючие газы: водород, метан и другие углеводороды и главным образом окись углерода. Потеря теплоты от химической неполноты горения Q_3 имеет место при неполном окислении углерода и водорода топлива. Значение ее определяется суммарной теплотой сгорания продуктов неполного горения CO, H_2, CH_4, и других углеводородов, содержащихся в дымовых газах.

Основными факторами, определяющими потери теплоты от химической неполноты горения, является сорт топлива, совершенство топочного устройства и качество его обслуживания. Потеря Q_3 возрастает при уменьшении коэффициента избытка воздуха α (относительно наилучшего его значения) при низкой температуре и недостаточном объеме топки. При рациональной компоновке котла и правильном его обслуживании эта потеря может быть сведена к малому значению, которое при мазутном отоплении редко превышает 0,5 %.

Потерю теплоты от механической теплоты горения обычно учитывают для котлов с угольным отоплением.

Для агрегатов с мазутным отоплением потеря теплоты от механической неполноты горения возможна при неправильном обслуживании, при работе с чрезмерным избытком или недостатком воздуха и при низком качестве распыливания мазута. В этих случаях потеря появляется вследствие сажеобразования и коксования мазута. Коксование может происходить и при очень низкой температуре в топке.

В нормальных условиях эксплуатации котлов с мазутным отоплением потеря практически отсутствует при всех его нагрузках.

Тепловые потери Q_3 и Q_4 связаны с качеством процесса сжигания топлива, поэтому их относят к топочным потерям.

Потеря тепла в окружающую среду связана с тем, что часть тепла дымовых газов, а также воды и пара, находящихся в котле, передается через обмуровку и изоляцию окружающему воздуху.

Зависимость между количеством тепла, приходящегося на 1 кг топлива, равным его теплотворной способности (приход), и полезно использованным теплом, и потерями (расход) называется тепловым балансом и выражается следующим уравнением:

$$Q_{\text{р}}^{\text{н}} = Q_1 + \sum Q_{\text{пот}}, \text{кДж/кг}.$$

где

$$\sum Q_{\text{пот}} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \text{кДж/кг}.$$

Разделив все члены уравнения на $Q_р^н$ и умножив на 100, - можно выразить тепловой баланс котла в процентах от теплотворной способности топлива:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 100, \%$$

$$\sum q_{пот} = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 100 - q_1, \%$$

где $q_1 = \frac{Q_1}{Q_р^н} \cdot 100$ – полезно использованное тепло 1 кг топлива, %;

$q_2 = \frac{Q_2}{Q_р^н} \cdot 100$ – потери тепла с уходящими газами, %;

$q_3 = \frac{Q_3}{Q_р^н} \cdot 100$ – потери тепла от химического недожога, %;

$q_4 = \frac{Q_4}{Q_р^н} \cdot 100$ – потери тепла от механического недожога, %;

$q_5 = \frac{Q_5}{Q_р^н} \cdot 100$ – потери тепла в окружающую среду, %.

Рассмотрим основные причины, влияющие на величину тепловых потерь, и способы уменьшения тепловых потерь.

Потеря тепла с уходящими газами q_2 зависит от конструкции котла и его эксплуатации. При умеренной форсировке и соблюдении правил эксплуатации q_2 составляет $8 - 15\%$. Эта потеря уменьшается с понижением температуры уходящих газов и коэффициента избытка воздуха.

К конструктивным мероприятиям, направленным на снижение температуры уходящих газов, относятся: увеличение поверхности нагрева котлов, установка экономайзеров и воздухоподогревателей, а также повышение скорости газов.

Среди эксплуатационных мероприятий в первую очередь следует указать на регулярную очистку поверхностей нагрева от накипи, масла, сажи и золы, что улучшает переход тепла от газов к воде, пару или воздуху. Соблюдение установленных правил водоподготовки, периодическая очистка котла от накипи и сажи, а также систематическая обдувка поверхностей нагрева являются обязательными.

Для снижения потери q_2 необходимо вести процесс сжигания топлива с возможно низким коэффициентом избытка воздуха, однако без ущерба для полноты горения. Нужно устранять подсосы воздуха через не плотности обмуровки водотрубных и комбинированных котлов, смотровые лючки прогарные дверцы и т.п. Подсос воздуха в дымоходах и трубе ухудшает тягу, что ограничивает форсировку котла.

Для современных судовых котлов с развитыми поверхностями нагрева (экономайзер и воздухоподогреватель) температура уходящих газов снижена до $140 - 160°C$. Это дало возможность уменьшить q_2 до $6 - 8\%$.

Однако полностью устранить эту потерю тепла нельзя, так как для этого необходимо, чтобы температура уходящих газов равнялась температуре окружающей среды.

Потеря от химического недожога q_3 вызывается недостаточным количеством воздуха, подаваемого в топку, или неравномерным его распределением в слое топлива.

При мазутном отоплении причинами потери могут быть недостаточный подогрев топлива, низкое его давление перед форсунками (что приводит к плохому распыливанию), неправильная установка форсунок, плохое смесеобразование воздуха с распыленным мазутом в факеле и т.д.

Необходимо добиваться равномерной толщины слоя топлива на колосниковой решетке и увеличивать подачу вторичного воздуха в топку после забросси топлива, т.е. в момент бурного выделения летучих горючих.

Редко встречаются старые модели котлов с использованием угля в качестве топлива. При сжигании пламенных углей хорошие результаты дает установка острого дутья, т.е. введение в топочный объем вторичного воздуха, обладающего большой скоростью (в количестве не более $8-10\%$ от общего расхода). Острое дутье хорошо перемешивает газы в топке, что снижает потерю q_3 до $0-0{,}5$ %. Наименьшие величины q_3 наблюдаются при сжигании углей с малым содержанием летучих.

Низкая температура топки уменьшает скорость горения летучих горючих. Последние не успевают сгорать в топочном объеме, поэтому даже при достаточном количестве воздуха потеря q_3 может достигнуть значительной величины $(4-5\%)$.

Подогрев воздуха способствует повышению температуры топки, улучшает условия горения топлива и увеличивает его скорость. Температуру горячего воздуха для мазутных топок можно довести до $250-300$°C, если это допускает конструкция воздухоподогревателя; для каменных углей она обычно не превышает $120-160$°C, а для антрацитов 80°C. Дальнейшее повышение этой температуры опасно для колосниковой решетки.

Условия смесеобразования в топке должны обеспечивать полное сгорание летучих до соприкосновения их со сравнительно холодными поверхностями нагрева.

При мазутном отоплении потеря q_3 составляет $0{,}5 \div 2$ %, а при угольном $1 \div 3$ %. Форсировка котла значительно увеличивает эти потери. Потеря q_3 относится к числу устранимых потерь. При регулярном контроле горения ее можно довести практически до нуля.

Потеря тепла в окружающую среду q_5 составляет от 2 до 6 % в зависимости от размеров площади наружной поверхности, качества изоляции и нагрузки котла.

С увеличением нагрузки потеря котла уменьшается и наоборот, достигает $70-80\%$ при нахождении котла в горячем резерве.

При эксплуатации необходимо уделять серьезное внимание качеству изоляции котла и паропроводов, применяя стекловату, магнезито-асбестовые плиты, сегменты и т.д.

Коэффициент полезного действия котла (к.п.д. котла) называется отношение полезного тепла, использованного на подогрев, испарение воды и перегрев пара к общему количеству тепла, которое может выделить при сгорании без тепловых потерь топливо, затраченное для получения данного количества пара.

Так как полезное тепло, отнесенное к 1 кг топлива, равно Q_1 кДж/кг, а затраченное $Q_{\text{р}}^1$, то к.п.д котла

$$\eta_{\text{к}} = \frac{Q_1}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \cdot 100\% = \eta_1$$

К.П.Д. котла зависит от степени совершенства его конструкции, нагрузки, свойства сжигаемого топлива (Рис. 2.2.), качества обслуживания и технического состояния.

Так как $\sum q_{\text{пот}} = 100 - q_1$, то к.п.д. котла можно выразить в виде

$$\eta_{\text{к}} = 100 - \sum q_{\text{пот}}$$

Это выражение иногда называют к.п.д. котла по обратному балансу тепла.

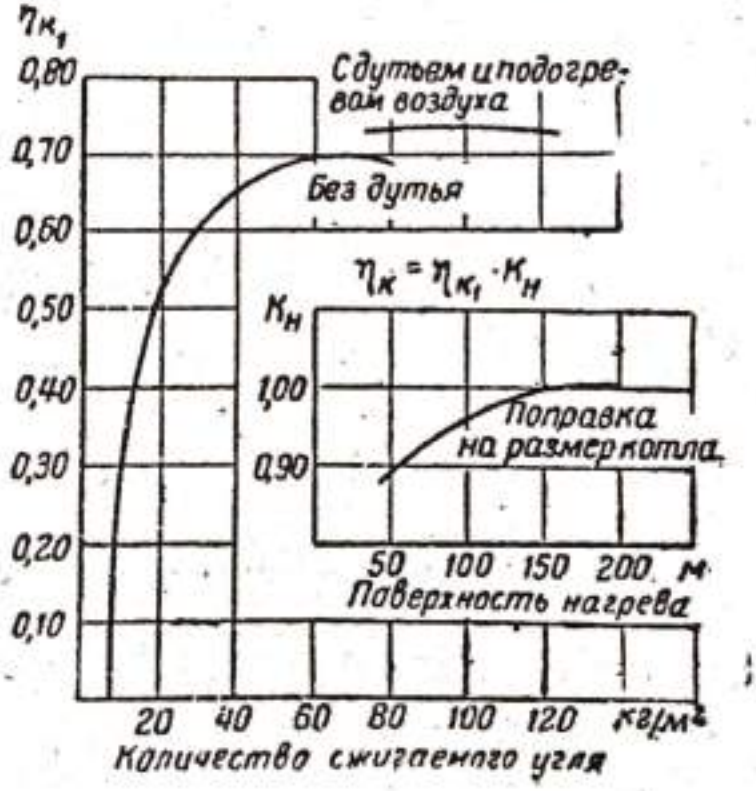


Рис. 2.2. Зависимость к.п.д. котла от степени форсировки

Для водотрубных котлов, работающих на твердом топливе, к.п.д. достигает $77 - 85\%$ и увеличивается до $91 - 93\%$ при мазутном отоплении.

В соответствии с определением полезно использованного тепла и приведенными выше соотношениями к.п.д. котла может быть выражен в виде

$$\eta_к = \frac{D_{пе}(i_{пе} - i_{пв}) + D_и(i_и - i_{пв})}{B \cdot Q_Н^Р}$$

откуда часовой расход топлива

$$B = \frac{D_{пе}(i_{пе} - i_{пв}) + D_и(i_и - i_{пв})}{\eta_к \cdot Q_Н^Р}$$

Для выработки пара заданных параметров, определяющих его теплосодержание, и при постоянстве теплотворной способности сжигаемого топлива часовой расход его будет тем меньше, чем выше температура питательной воды и к.п.д. котла. Очевидно, что при прочих равных условиях часовой расход топлива уменьшается с увеличением его теплотворной способности.

Из выражения для часового расхода топлива видно, что чем больше израсходовано топлива, тем больше будет получено и пара. Однако увеличение часового расхода топлива возможно для каждого котла только до определенных пределов. Форсировка котла приводит к падению его к.п.д. (см. выше), тем более резкому, чем она интенсивнее. Помимо падения экономичности котла, форсировка ограничена предельной мощностью топочных устройств для мазутных топок и механических угольных, а также предельными тепловыми нагрузками для котла и футеровки топки.

На практике были выработаны предельные нагрузки по удельному расходу топлива. Например, для угольных топок применяется понятие о видимой весовой и тепловой нагрузке площади колосниковой решетки.

Для мазутных топок применяется понятие *удельной видимой тепловой нагрузки топочного объема*:

$$q_V = \frac{B \cdot Q_Р^Н}{V}, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \text{ час}$$

где V – объем топки, м^3.

Величина q_V обычно не превышает $500 - 700$ тыс. кДж/м^3 · час, но в напряженно работающих котлах военного флота доходит до $0{,}7 - 1{,}2$ млн. кДж/м^3 · час и более. Специальные топочные устройства обеспечивают экономичное горение мазута при величине q_V до $2{,}4 - 3{,}6$ млн. кДж/м^3 · час и более.

Уже из этих цифр видно, что объем топки не может быть определяющим для суждения о ее предельной нагрузке. К более важным величинам относятся: тип топочного устройства, условия его эксплуатации и характер смесеобразования топлива и воздуха в топке.

Для ориентировочной оценки нагрузки котла по его поверхности нагрева пользуются величиной удельного паросъема

$$d = \frac{D_{пе} + D_{н}}{H}$$

где H - поверхность нагрева котла, м^2.

По величине d можно сравнивать только однотипные котлы. Например, у современных водотрубных котлов, у которых поверхность нагрева экономайзера, пароперегревателя и воздухонагревателя в несколько раз превышает поверхность нагрева котла, величина d также может быть применена только для ориентировки. У водотрубных котлов, работающих на мазуте, удельный паросъем достигает $38 - 45$ кг/м^2 час, у двухбарабанных котлов $60 - 80$ кг/м^2 час и более.

Понятие о видимой испарительной способности топлива, т.е. о числе килограммов пара, получаемого от сжигания 1 кг топлива в данном котле, также применяется для ориентировочных расчетов.

Видимая испарительная способность топлива

$$u_{в} = \frac{D_{пе} + D_{н}}{B}, \text{кг/кг}$$

Для современных водотрубных котлов, работающих на жидком топливе и при высоком подогреве питательной воды, $15 - 16$ кг/кг.

Приведенные выше характеристики топок и котлов q_b, q_n, q_v, d, $u_в$ и $\eta_к$ позволяют не только сравнительно оценивать различные паровые котлы, но и выполнять ориентировочные расчеты.

2.6. Особенность уравнений теплового баланса утилизационных котлов

Для утилизационных котлов составление уравнений теплового баланса может быть выполнено, на основе зависимостей, для главных и вспомогательных котлов.

В данном случае можно также применить основное уравнение $Q_{под} = Q_1 + Q_{пот}$ в котором $Q_{под}$, кДж/кг, будет равно количеству теплоты, подведенной газами, образовавшимися при сгорании 1 кг топлива в дизеле или газовой турбине, т.е.

$$Q_{под} = I_1 c,$$

где I_1 – энтальпия газов при входе в утилизационный котел;

$c \leq 1$ – коэффициент, учитывающий протечки или перепуск газов помимо утилизационного котла через специальное газоперепускное устройство.

Уравнение прямого теплового баланса утилизационного котла составляется также для пароводяного тракта.

На рис. 2.3. приведена одна из схем утилизационного котла дизельной установки с паровым турбогенератором. Особенность этой схемы состоит в том,

что циркулирующая вода забирается насосом 4 из сепаратора 5 и подается в экономайзер 1, который включен последовательно с парообразующей поверхностью 2. Насыщенный пар из сепаратора 5 направляется в пароперегреватель 3 и по трубопроводу 6 к вспомогательным потребителям.

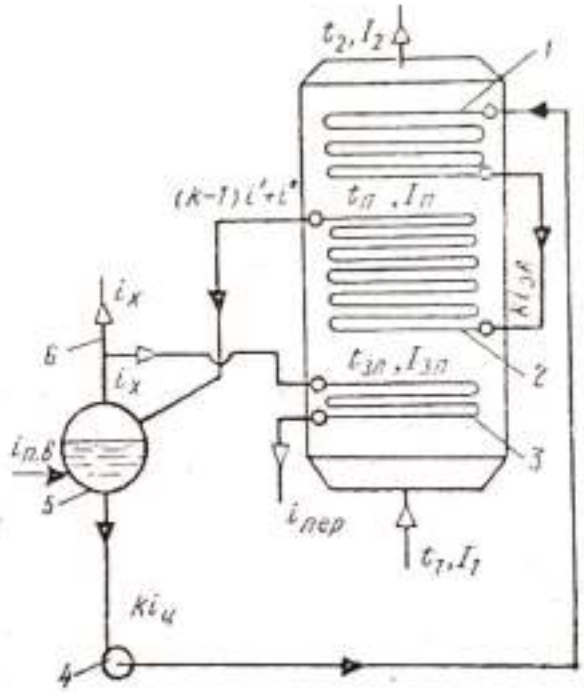


Рис. 2.3. Принципиальная схема утилизационного котла с экономайзером, включенным последовательно с парообразующей поверхностью

Полезно использованное тепло в пароводяном тракте в соответствии с принятыми на схеме обозначениями можно записать в форме:

$$Q_1 = \frac{D_{\text{пер}}}{B}\left(i_{\text{пер}} - i_{\text{п.в.}}\right) + \frac{D_{\text{н}}}{B}\left(i_{\text{х}} - i_{\text{п.в.}}\right)$$

где $D_{\text{пер}}$, $D_{\text{н}}$ – количество пара, соответственно перегретого и насыщенного, кг/с;

B – расход топлива в двигателе, кг/с;

$i_{\text{пер}}$, $i_{\text{х}}$, $i_{\text{п.в.}}$ – энтальпии перегретого и насыщенного пара и питательной воды, кДж/кг.

Следовательно получим зависимость для условного к.п.д. утилизационного котла согласно уравнению прямого теплового баланса

$$\eta_{\text{к}} = \frac{D_{\text{пер}}\left(i_{\text{пер}} - i_{\text{п.в.}}\right) + D_{\text{н}}\left(i_{\text{х}} - i_{\text{п.в.}}\right)}{cBI_1}$$

Для котлов, генерирующих только насыщенный пар, формула может быть упрощена, т.е.

$$Q_1 = \frac{D_{\text{к}}}{B}\left(i_{\text{х}} - i_{\text{п.в.}}\right)$$

где $D_{\text{к}}$ – полная паропроизводительность котла, кг/с.

Тогда уравнение к.п.д. запишется в виде

$$\eta_к = \frac{D_к(i_х - i_{п.в.})}{cBI_1}$$

Уравнение обратного теплового баланса будет иметь следующий вид

$$cI_1 = cQ_1 + c\sum_{i=2}^{i=5} Q_i$$

или

$$I_1 = Q_1 + Q_2 + Q_5$$

где Q_1 – полезно использованная теплота в пароводяном тракте, отнесенная к 1 кг топлива, сжигаемого в главном двигателе, кДж/кг;

Q_2 – тепловые потери с уходящими из котла газами.

Q_5 – тепловые потери в окружающую среду.

Разделив левую и правую части на I_1 и умножив на 100, можно записать уравнение обратного теплового баланса утилизационного котла:

$$\eta_к + q_2 + q_5 = 100\%$$

где $\eta_к = \frac{Q_1}{I_1}100\%$; $q_2 = \frac{Q_2}{I_2}100\%$; $q_5 = \frac{Q_5}{I_5}100\%$.

Следует отметить отсутствие в утилизационном котле тепловых потерь, связанных с процессом сжигания топлива (q_3 и q_4). Эти потери имеют место в двигателе, и поэтому их нет в уравнении теплового баланса, однако потери q_3 и q_4 оказывают влияние на эффективность работы утилизационного котла по условию низкотемпературной коррозии (точка росы газов) и загрязнение поверхностей нагрева. Таким образом, в утилизационном котле имеются две тепловые потери q_2 и q_5.

Потери тепла с уходящими газами q_2 может быть условно определена по формуле:

$$q_2 = \frac{I_2}{I_1}100\%$$

где I_2 – энтальпия газов, уходящих из утилизационного котла при температуре t_2, кДж/кг.

Для уменьшения q_2 необходимо снижать температуру t_2. Ограничениями к снижению температуры t_2 являются рабочее давление пара при обычной утилизации тепла и условия, исключающую низкотемпературную коррозию хвостовой поверхности нагрева котла в установке с утилизационным турбогенератором.

Потеря тепла в окружающую среду q_5 в утилизационных котлах также учитывается введением в уравнение теплового баланса по газовому тракту множителя – коэффициента сохранения тепла φ, определяемого по формуле $\varphi = 1 - q_5/100$. Величина q_5 в этой формуле может выбираться равной 1 – 3%;

меньшие значения относятся к котлам с более высокой паропроизводительностью.

Величина Q_1 может быть определена также из уравнения теплового баланса по газовой стороне:

$$Q_1 = (I_1 - I_2)\varphi$$

Уравнение для к.п.д. по обратному тепловому балансу :

$$\eta_к = (1 - \frac{I_2}{I_1})\varphi$$

Необходимо отметить, что к.п.д. утилизационного котла согласно уравнению выше следует рассматривать как некоторую условную величину, характеризующую степень использования тепла в агрегате.

ГЛАВА 3
Общее устройство котлов

3.1. Огнетрубные паровые котлы

Огнетрубными называют такие паровые котлы, в которых продукты сгорания топлива движутся внутри труб, омываемых снаружи водой. В зависимости от компоновочной схемы различают следующие виды огнетрубных котлов:

• оборотные огнетрубные котлы, в которых топки и дымогарные трубы размещены параллельно друг другу, а газы в них движутся в противоположных направлениях (рис. 3.1. а, б);

• пролетные огнетрубные котлы, в которых топка и дымогарные трубы размещены последовательно и газы в них движутся в одном направлении (рис. 3.1. в).

Огнетрубные котлы имеют следующие характеристики:

паропроизводительность: $D = 0{,}5 - 6{,}5$ т/ч;

параметры пара: - $P_к = 1{,}5 - 1{,}8$ МПа $(15 - 18$ кгс/см$^2)$;

- $t_{пе} = 300 - 320$°С;

- к.п.д.: $70 - 75$ %.

При использовании дополнительных хвостовых поверхностей нагрева: пароперегревателя водяного экономайзера и воздухоподогревателя, к.п.д. огнетрубного котла можно довести до значения $82 - 83$ %.

Основные элементы огнетрубного котла размещены внутри корпуса и дымовой коробки. Корпус представляет собой цилиндр с приваренными к нему передним и задним днищами. В переднем днище выполнены отверстия для крепления дымогарных труб, жаровой трубы и длинных анкерных связей, а в заднем - для крепления коротких и длинных анкерных связей. Жаровая труба (топка) выполняется диаметром $700 - 1200$ мм и длиной $1800 - 2500$ мм и имеет круглое поперечное сечение. Количество жаровых труб, в зависимости от паропроизводительности котла, может быть от одной до трех. Жаровые трубы огнетрубных котлов работают в тяжелых условиях и имеют, как правило, гофрированную поверхность, обеспечивающую тепловые расширения и самоочистку трубы от накипи. Наиболее напряженные участки жаровой трубы защищаются кольцами из огнеупорного кирпича. В жаровой трубе происходит сгорание топлива, распыливаемого через форсунку, в струе воздуха, подаваемого через воздухонаправляющее устройство (ВНУ), и образование горячих газов.

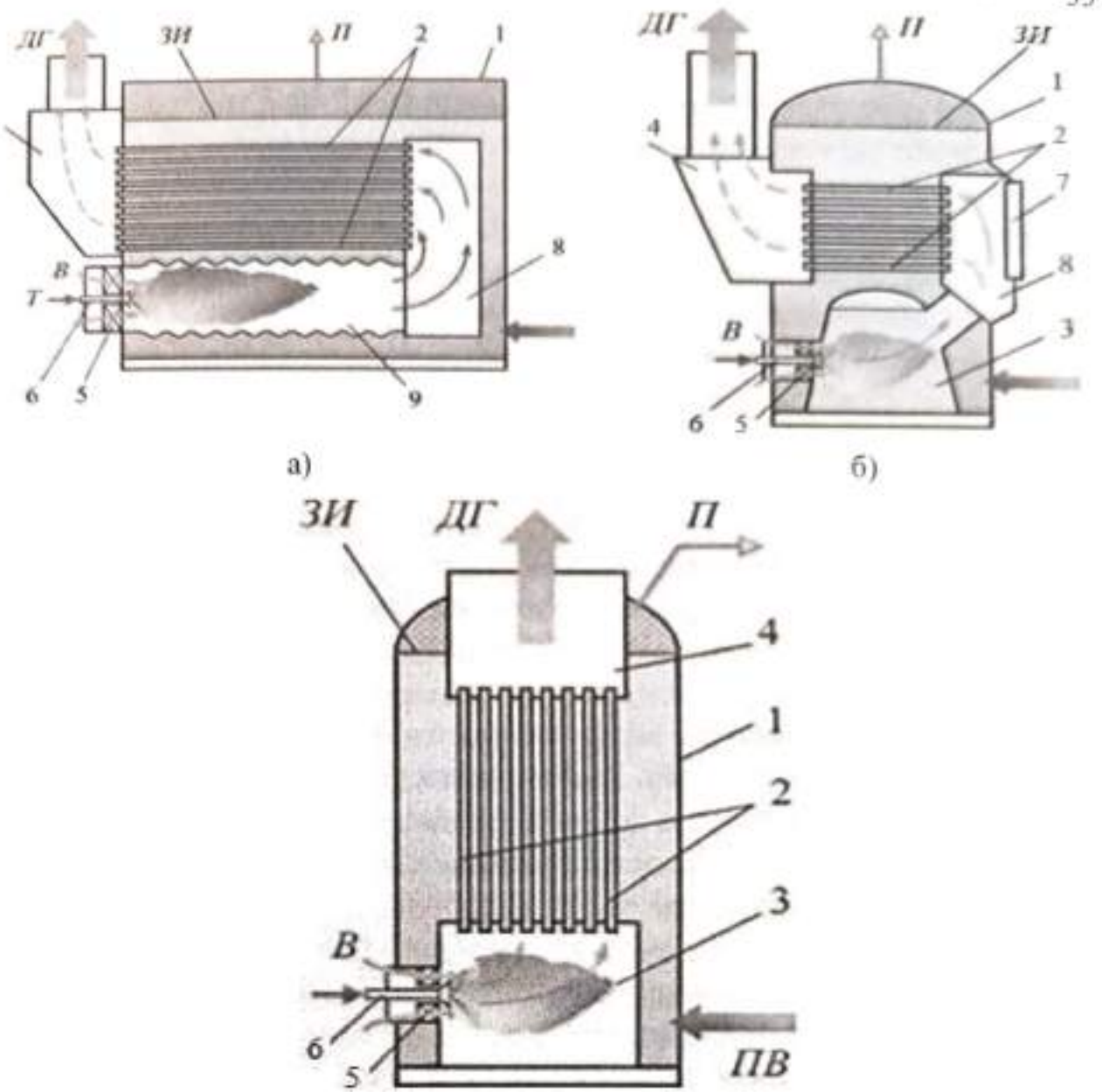


Рис. 3.1. Принципиальные схемы огнетрубных паровых котлов

а – оборотный огнетрубный котел; б – вертикальный оборотный огнетрубный котел с горизонтальными трубами; в – вертикальный пролетный огнетрубный котел с вертикальными трубами.

1 - корпус котла; 2 - дымогарные трубки; 3 - топка (камера сгорания); 4 - дымовая коробка; 5 - воздухонаправляющее устройство; 6 - топливная форсунка; 7 - съемные щитки; 8 - огневая камера; 9 - жаровая труба, ПВ - подача питательной воды; Т - подача топлива; В - подача воздуха; П - отбор насыщенного пара; ДГ - выброс дымовых газов; ЗИ - зеркало испарения.

Огневая камера служит для догорания топлива, не успевшего сгореть в топке, поворота газов и перенаправления их в дымогарные трубы котла. Передняя стенка огневой камеры представляет собой трубную доску, в которой закреплены дымогарные трубы. Как правило, каждая топка (жаровая труба)

имеет свою индивидуальную огневую камеру и пучок дымогарных труб. Дымогарные трубы соединяют огневую коробку с дымовой коробкой и составляют основную часть поверхности нагрева котла. Внутри дымогарных труб проходят горячие продукты сгорания, нагревают стенки труб и передают свое тепло воде, омывающей их с наружной стороны. Дымогарные трубы имеют диаметр 50 – 70 мм при толщине стенок 2,5 – 4,5 мм. Некоторые дымогарные трубы выполняются большим диаметром, с увеличенной толщиной стенки и образуют дополнительные связи, повышающие прочность конструкции огнетрубного котла. Площадь поверхности нагрева огнетрубных котлов составляет от 15 м^2 у однотопочных котлов, до 230 м^2 - у трехтопочных котлов. На горячих наружных поверхностях стенок дымогарных труб, огневой камеры и жаровой трубы образуются паровые пузырьки, отрываются от стенок поверхностей нагрева, всплывают через толщу воды, и образовавшийся пар собирается в верхней части корпуса парового котла. Часть пара через парозаборную трубу поступает в пароперегреватель. Насыщенный пар отбирается на потребители из верхней части корпуса котла, а перегретый пар - из пароперегревателя. Продукты сгорания, пройдя через дымогарные трубы и отдав часть теплоты на испарение воды, собираются в дымовой коробке, откуда направляются в дымовую трубу. Часто, с целью более полного использования теплоты продуктов сгорания, в дымовой коробке размещают трубную систему пароперегревателя и воздухоподогреватель. Корпус огнетрубного котла заполняется питательной водой с таким расчетом, чтобы вода покрывала все поверхности нагрева и огневую камеру с учетом возможных кренов и дифферентов судна. Расход воды, испарившейся в котле, восполняется подачей свежей питательной воды в корпус котла.

Кроме рассмотренной выше конструкции оборотного котла существуют другие типы, например - вертикальный оборотный котел с горизонтальными трубами (б), который имеет цилиндрический вертикальный корпус. Прямые дымогарные трубы расположены горизонтально. В огневой камере предусмотрены съемные щитки, упрощающие чистку поверхностей нагрева.

Вертикальный огнетрубный пролетный котел с вертикальными трубами (в) широко распространен на судах в качестве вспомогательного. Котел имеет вертикальный цилиндрический корпус и вертикальные прямые дымогарные трубы, соединяющие топку с дымовой коробкой.

Основные преимущества огнетрубных котлов заключаются в:

- большой аккумулирующей способности, благодаря чему давление пара и уровень воды при резких изменениях нагрузки меняются очень незначительно;

- малой чувствительности к резким колебаниям нагрузки (расходу пара) за счет большой аккумулирующей способности котла (количество воды в котле в несколько раз превышает его паропроизводительность);

- большим относительным водосодержанием т.е. количество воды в котле в несколько раз превышает его часовую производительность, поэтому с момента прекращения питания котла водой до падения уровня воды до нижнего допустимого предела проходит достаточно много времени;

- относительно малая чувствительность к качеству питательной воды, так как основная поверхность нагрева, образованная дымогарными трубами, омывается газами относительно невысокой температуры $700 - 850°C$

- длительный срок службы (до 40 лет);

- простота в обслуживании.

Недостатками огнетрубных котлов являются:

- невозможность получения пара давлением более 20 МПа;

- большая масса по сравнению с водотрубным котлом такой же паропроизводительности;

- жесткость конструкции не допускает быстрого подъема и снижения давления пара, т.к. возникновение температурных напряжений может привести к образованию трещин и появлению течи. Из-за этого недостатка на подъем давления пара до рабочего значения затрачивается до 12 и даже 24 часов;

- не высокий коэффициент полезного действия;

- взрывоопасность (при значительной силе возможного взрыва почти всегда приводило к гибели судна);

- неорганизованная циркуляция воды, не позволяющая увеличивать паросъем с $1\ м^2$ поверхности нагрева более чем на 0,007 кг/с и, вследствие этого, низкая паропроизводительность - до 1,8 кг/с;

- повышенные металлоемкость и трудоемкость изготовления;

- возможность взрыва из-за мгновенного вскипания большой массы воды, находящейся в корпусе котла.

Указанные недостатки послужили причиной того, что огнетрубные котлы в настоящее время не применяются на судах и кораблях в качестве главных, и используются только в качестве вспомогательных котлов.

3.2. Водотрубные паровые котлы

В водотрубных котлах пламя и горячие газы омывают трубы снаружи, а внутри труб перемещается нагреваемая рабочая среда – вода и пароводяная смесь (за счет тепловой конвекции и изменении плотности при нагревании среды). Принципиальное устройство водотрубного котла изображено на рис. 3.2. В простейшем случае паровой водотрубный котел состоит из двух цилиндрических барабанов, соединенных между собой трубками, заполненными водой и обогреваемыми горячими газами, полученными в результате сгорания топлива. Пространство котла, заполненное водой (оба барабана и трубки), называется водяным, а занимаемое паром – паровым.

Поверхность, разделяющая водяное и паровое пространство в верхнем пароводяном барабане называется зеркалом испарения.

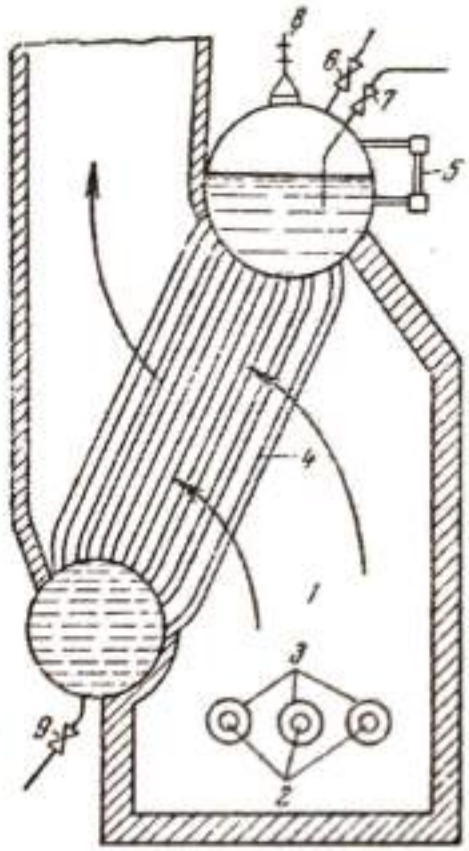


Рис. 3.2. Принципиальная схема водотрубного котла

1 – топочное пространство; 2 – топливные механические форсунки; 3 – воздухоподающее устройство; 4 – основной пучок водогрейных (кипятильных) труб; 5 – водоуказательное устройство; 6 – главный запорный клапан; 7 – питательный клапан; 8 – предохранительный клапан; 9 – продувочный (сливной) клапан;

Топливо сгорает в топке 1, снабженной мазутными форсунками 2. Воздух в топку поступает от вентилятора через отверстия 3 воздухонаправляющего устройства.

Поверхность, обогреваемая с одной стороны газами, а с другой – омываемая водой, называется поверхностью нагрева котла. В нашем котле она образована трубками 4.

Низший, допускаемый уровень воды в котле должен быть выше уровня, обогреваемого горячими газами. Для уменьшения тепловых потерь барабан котла изолируется.

Для непрерывной и безопасной работы котел снабжается комплектом приборов и устройств, называемых арматурой котла. На котел устанавливается манометр для контроля давления пара. На шкале манометра наносится красная

черта, отмечающая наибольшее допускаемое давление пара в котле. Для контроля уровня воды устанавливаются два водомерных стекла 5. В месте отбора пара из котла устанавливается главный запорный клапан 6. Дополнительно может быть установлен клапан с малым проходным сечением для отбора пара на вспомогательные нужды. Для подачи воды в котел служит питательный клапан 7. Для предотвращения взрыва котла по правилам классификационных обществ устанавливается сдвоенный предохранительный клапан 8. Для удаления воды при ремонте котла, а также для продувания котла в процессе эксплуатации устанавливается клапан нижнего продувания 9.

Также может устанавливаться клапан верхнего продувания в пароводяном барабане для удаления верхнего загрязненного слоя воды.

Для повышения к.п.д. котла на пути газов устанавливают пароперегреватель, а на выходе из котла – экономайзер для подогрева питательной воды, поступающей в котел и воздухоподогреватель для подогрева воздуха, поступающего в топку.

Преимущества водотрубных котлов:

- удельный паросъем (количество пара, полученное с единицы площади нагрева) в $2 \div 3$ раза выше, чем у огнетрубных. Это объясняется лучшим теплообменом между горячими газами и водой. Так, общая паропроизводительность водотрубного котла в $10 \div 15$ раз выше максимальной паропроизводительности огнетрубного котла;
- масса и габариты водотрубных котлов в несколько раз меньше, чем огнетрубных такой же производительности;
- быстрый ввод в действие (минимальное время поднятие пара до рабочего давления составляет $1,5 \div 3,0$ часа);
- меньшая взрывоопасность (из-за малого объема воды, находящегося внутри котла).

Недостатки водотрубных котлов:

- малая теплоаккумулирующая способность, что при резком изменении нагрузки отрицательно влияет на параметры пара;
- высокая чувствительность к качеству питательной воды. Так, при значительных отложениях накипи на поверхности нагрева создается опасность перегрева металла водогрейных труб и их разрыва;
- для обслуживания водотрубных котлов требуется более высокая квалификация персонала.

3.3. Процессы парообразования и естественной циркуляции

Процесс естественной циркуляции неразрывно связан с процессом парообразования, характеристики которого определяют показатели надежности циркуляции.

Процесс парообразования.

Кипение – процесс образования пара внутри объема жидкости. Для поддержания процесса парообразования к воде подводится теплота через твердую стенку. Различают кипение в большом объеме (или кипение на твердой поверхности в условиях свободного движения жидкости в неограниченном пространстве) и кипение при вынужденном течении в трубах. Первый вид характерен для огнетрубных и огнетрубно – водотрубных котлов, в которых основное количество пара образуется при кипении на поверхностях жаровых труб, топочных камер, огневых патрубков и камер, а также дымогарных труб. При кипении в большом объеме в зависимости от поверхностной плотности теплового потока q могут наблюдаться два режима кипения: пузырьковый и пленочный. Это стационарные режимы, протекающие при $q = const$. Им всегда сопутствуют два переходных режима: в начале парообразования наблюдается режим поверхностного кипения, а в момент перехода от пузырькового к пленочному кипению – переходный режим. Оба эти режима кратковременны и при кипении в большом объеме не играют существенной роли.

Механизм кипения в вертикальных и слабонаклонных обогреваемых трубах представляется следующим: в трубу входит питательная вода, недогретая до кипения, на экономайзерном участке происходит подогрев воды до температуры кипения. При больших тепловых нагрузках в конце парообразующего участка поверхности нагрева возникает поверхностное кипение, которое достаточно быстро переходит в пузырьковое. Пузырьки пара, имея меньшую плотность, чем вода ($\rho' < \rho''$) всплывают, увлекая за собой воду. **В этом физическая сущность естественной циркуляции.**

Непрерывное движение воды и пара (пароводяной смеси) по замкнутому контуру, в который входят опускные и подъемные трубы, а также соединяющие их барабаны (водяные и пароводяные), называется **естественной циркуляцией.**

Естественная циркуляция отличается от остальных процессов тем, что она не требует каких-либо дополнительных устройств обеспечивающих ее и характеризует надежность работы котла. В соответствии с современными требованиями к циркуляции в котле ее надежность может, обеспечена за счет следующих условий: непрерывное покрытие стенок парообразующих труб водяной пленкой, отсутствие отложений солей на стенках этих труб, нормальный подвод воды к ним. В обычном водотрубном котле температура питательной воды и способ ее подвода в барабан также оказывает определенное влияние на процесс циркуляции.

Процесс естественной циркуляции характеризуется некоторыми понятиями и определениями, основными из которых являются: контур циркуляции, недогрев до кипения, застой и опрокидывание циркуляции, кавитация.

Контур циркуляции.

На схематическом рис. 3.3. показаны два контура циркуляции: экрана (индекс "э") и конвективного пучка (индекс "п"). В опускных трубах (длина труб обозначена $l_{оп}$) движется только вода, а не пароводяная смесь эти трубы, как правило, необогреваемые

Из нижнего водяного барабана вода поступает в подъемные трубы, где в начальном участке она уже подогрета в экономайзере до состояния кипения. Этот участок труб называется экономайзерным и характеризуется высотой $h_{эк}$ ($h_{пол}$ – полезная высота).

Верхний большой участок подъемных труб, в которых происходит парообразование и восходящее движение воды и пара, характеризуется высотой паросодержащей части $h_{пар}$.

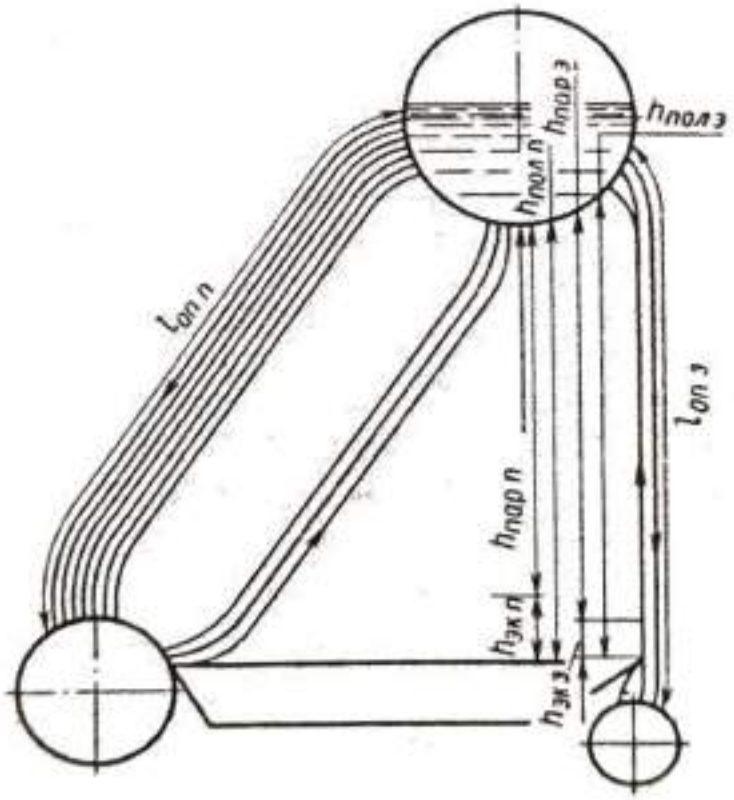


Рис. 3.3. Схема циркуляционных контуров экрана и конвективного пучка труб

Таким образом, в результате теплообмена между дымовыми газами, омывающими поверхность нагрева труб, и водой, находящейся в трубах, происходит парообразование, следствием чего и является естественное движение воды и пароводяной смеси в трубах котла (естественная циркуляция). Пар генерируется только в паросодержащей части подъемных труб. В барабанах нет парообразования, так как в них отсутствует подвод теплоты от дымовых газов. В пароводяном барабане происходит лишь отделение пара от воды, которая вместе с питательной водой вновь поступает в опускные трубы контуров циркуляции котла.

Движущий и полезный напор.

Движущий напор $P_{дв}$, в подъемной трубе любого диаметра и различным образом наклоненной к вертикали может быть определен по формуле:

$$P_{дв} = h_{пар}(\rho' - \rho_{см})g,$$

где ρ' и $\rho_{см}$ – плотность волды и пароводяной смеси, кг/м^3.

g – ускорение свободного падения, $g = 0{,}981$ м/сек^2.

За счет движущего напора пароводяная смесь перемещается вверх в подъемных трубах, а вода вниз – в опускных. При установившемся режиме

$$P_{дв} = \Delta P_{оп} + \Delta P_{под},$$

где $\Delta P_{под}$, $\Delta P_{оп}$ – сопротивления в подъемных и опускных трубах.

Полезным напором называется избыточная часть движущего напора, остающаяся после компенсации внутренних сопротивлений подъемных труб. Полезный напор расходуется на преодоление внешних сопротивлений, т.е. сопротивлений, возникающих в опускных трубах. В соответствии с таким определением полезный напор

$$P_{пол} = P_{дв} - \Delta P_{под}.$$

Кратность циркуляции.

В каждом ряду подъемных труб и в отдельном контуре развиваются определенные движущий и полезный напоры. В результате этого количество воды, проходящей через поперечное сечение звена каждого циркуляционного контура, во много раз больше количества пара, которое в нем генерируется. В связи с этим вводится понятие кратности циркуляции. Под кратностью циркуляции некоторого циркуляционного контура понимается отношение

$$k = G_ц/G',$$

где $G_ц$ – количество воды, проходящей через циркуляционный контур, кг/с;

G' – количество пара, генерирующегося в этом контуре, кг/с.

Существует аналогичное понятие средней кратности для отдельного ряда, а также для всего котла в целом:

$$k = \Sigma G_ц/D_к.$$

где $\Sigma G_ц$ – общее или суммарное количество воды, циркулирующей во всех трубах котла кг/с;

$D_к$ – полная паропроизводительность котла, кг/с.

Физический смысл кратности циркуляции состоит в том, что она показывает, сколько раз должна пройти по контуру определенная масса воды, до ее полного испарения.

Примерные значения кратности циркуляции при нормальной нагрузке судовых котлов:

50 ÷ 70 - основной пучок труб, образующих конвективную поверхность нагрева;

20 ÷ 30 - экранные поверхности нагрева;

40 ÷ 60 - в целом котел.

Скорость циркуляции.

Скоростью циркуляции w_0 называется скорость входа воды в подъемные трубы. Ее значение будет выше у тех элементов, которые воспринимают больше тепла от продуктов сгорания. Судовые котлы имеют примерно следующие значения w_0, м/с:

Первый пучок труб:

0,5 ÷ 1,5 - первый и второй ряды парообразующих труб;

0,4 ÷ 0,9 - третий и четвертый ряды парообразующих труб;

0,3 ÷ 0,7 - второй пучок труб;

0,8 ÷ 1,5 - экранные трубы.

Недогрев до кипения (рис. 3.4.).

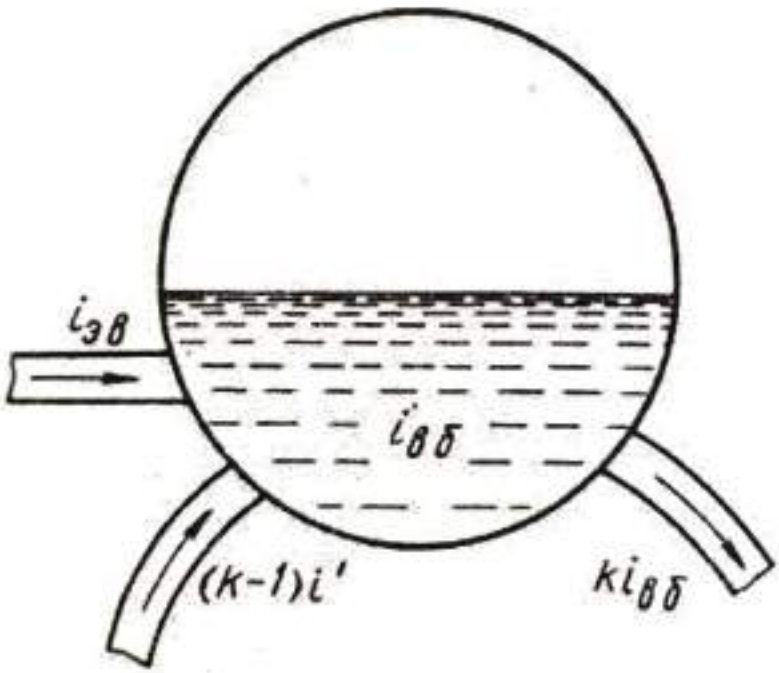


Рис. 3.4. Схема к определению недогрева до кипения в пароводяном барабане

Иногда недогрев до кипения называется также нехваткой до кипения и обозначается Δi. Размерность этой величины соответствует энтальпии, (кДж/кг). Недогрев до кипения имеет место в барабанах, в опускных трубах и на экономайзерном участке подъемных труб. Оценку этой величины $\Delta i_{в.б}$. можно сделать, например, для пароводяного барабана. Для этого необходимо составить уравнение теплового баланса пароводяного барабана, отнесенное к 1 кг воды:

$$i_{э.в} + (k-1)i' = ki_{в.б}.$$

Отсюда:

$$\Delta i_{в.б} = i' - i_{в.б} = (i' - i_{э.в})/k$$

где i', $i_{в.б}$ и $i_{э.в}$ – энтальпия воды, энтальпия кипения воды при рабочем давлении, в пароводяном барабане и энтальпия на выходе из экономайзера (при входе в барабан).

Застой и опрокидывание циркуляции. Явление застоя и опрокидывания циркуляции возникают в основном из-за неравномерного обогрева труб, расположенных в одном и том же ряду. Трубы обогреваются неравномерно по нескольким причинам: вследствие различной освещенности, неодинакового характера омывания, различной степени загрязнения поверхностей нагрева и т.д.

В одном звене – ряду могут оказаться трубы с разной тепловой нагрузкой, что часто приводит к изменению сопротивления опускных труб. При постепенном увеличении сопротивления опускных труб может наступить такой момент, когда в наименее обогреваемой подъемной трубе рассматриваемого звена скорость воды будет весьма близка к нулю. Пузырьки пара, образовавшиеся в такой трубе, легко всплывают в неподвижной воде. Паровые пузырьки непосредственно соприкасаются со стенкой трубы, что вследствие малой скорости движения пароводяной смеси вызовет перегрев стенки трубы. Такое явление носит название застоя. В трубе, воспринимающей меньше тепла, чем остальные трубы ряда, может иметь место и другой характер движения пароводяной смеси, когда пузырьки пара поднимаются при одновременном опускном движении воды. Наличие восходящего и нисходящего потоков смеси в подъемных трубах является неустойчивым движением, что резко снижает интенсивность теплообмена. Такое изменение нормального направления циркуляционного потока называется опрокидыванием циркуляции.

Застой и опрокидывание – явление расслоения пароводяной смеси и заключается в том, что при движении смеси с малой скоростью в слабонаклонных или горизонтальных трубах пар, имеющий меньший удельный вес, чем вода, поднимается и отделяется от воды. Таким образом, произойдет раздельное движение по трубке пара и воды. Так как пар значительно менее теплопроводен, чем вода, возникает перегрев той части стенок трубок, которая омывается паром. Чтобы избежать этого явления в высоконапряженных судовых котлах, угол наклона трубок к горизонту должен быть не менее 25°.

Кавитация.

Надежный подвод требуемого количества воды к подъемным трубам обеспечивается при отсутствии кавитации и кипения воды в опускных трубах. Кавитация (парообразование) в опускных трубах может возникнуть вследствие падения давления до давления насыщенного пара во входном сечении трубы, а также в том случае, если статическое давление во входном сечении опускной трубы станет меньше давления в паровом пространстве барабана. Во время кавитации происходит образование паровых пузырьков и их конденсация, вызывающая малые гидравлические удары, которые могут привести к образованию трещин в опускных трубах.

Для предотвращения кавитации необходимо обеспечить подпор на входе в опускные трубы, создаваемый путем поддержания высоты уровня воды над верхней кромкой их входного сечения не менее 50 мм.

Для обеспечения необходимых количественных характеристик, определяющих надежность естественной циркуляции, производят ее расчет.

Основная цель расчета циркуляции – определить требуемое число опускных труб, т.е. достаточную площадь их проходного сечения. Количественной оценкой такого определения являются кратность и скорость циркуляции, а также недогрев до кипения в пароводяном барабане.

Поскольку расчет производится путем последовательного приближения, необходимо сначала выбрать величину кратности циркуляции, которая позволит затем определить недогрев до кипения по формуле:

$$\Delta i_{\text{в.б}} = i' - i_{\text{в.б}} = (i' - i_{\text{э.в}})/k;$$

и построить циркуляционные характеристики подъемных рядов (звеньев) парообразующих труб.

Надежность циркуляционного режима будет обеспечена, если отношение $F_{\text{оп}}/F_{\text{под}} = 0{,}2 \div 0{,}5$ – для контуров с необогреваемыми опускными трубами (включая экраны) и $F_{\text{оп}}/F_{\text{под}} = 0{,}4 \div 0{,}7$ – для контуров с обогреваемыми опускными трубами. Где $F_{\text{оп}}$, $F_{\text{под}}$ - площади живых сечений опускных и подъемных труб соответственно. При этом скорость циркуляции в подъемных трубах должна составлять не менее 0,25 м/сек.

ГЛАВА 4
Конструкции судовых паровых котлов

4.1. Конструкции судовых паровых котлов

Водотрубные котлы (Рис. 4.1.), которые нашли широкое применение на судах транспортного флота, различаются главным образом конструктивной компоновкой поверхностей нагрева. В судовой практике подразделяют три основных типа: секционные, однопроточные и вертикально-водотрубные радиационного типа.

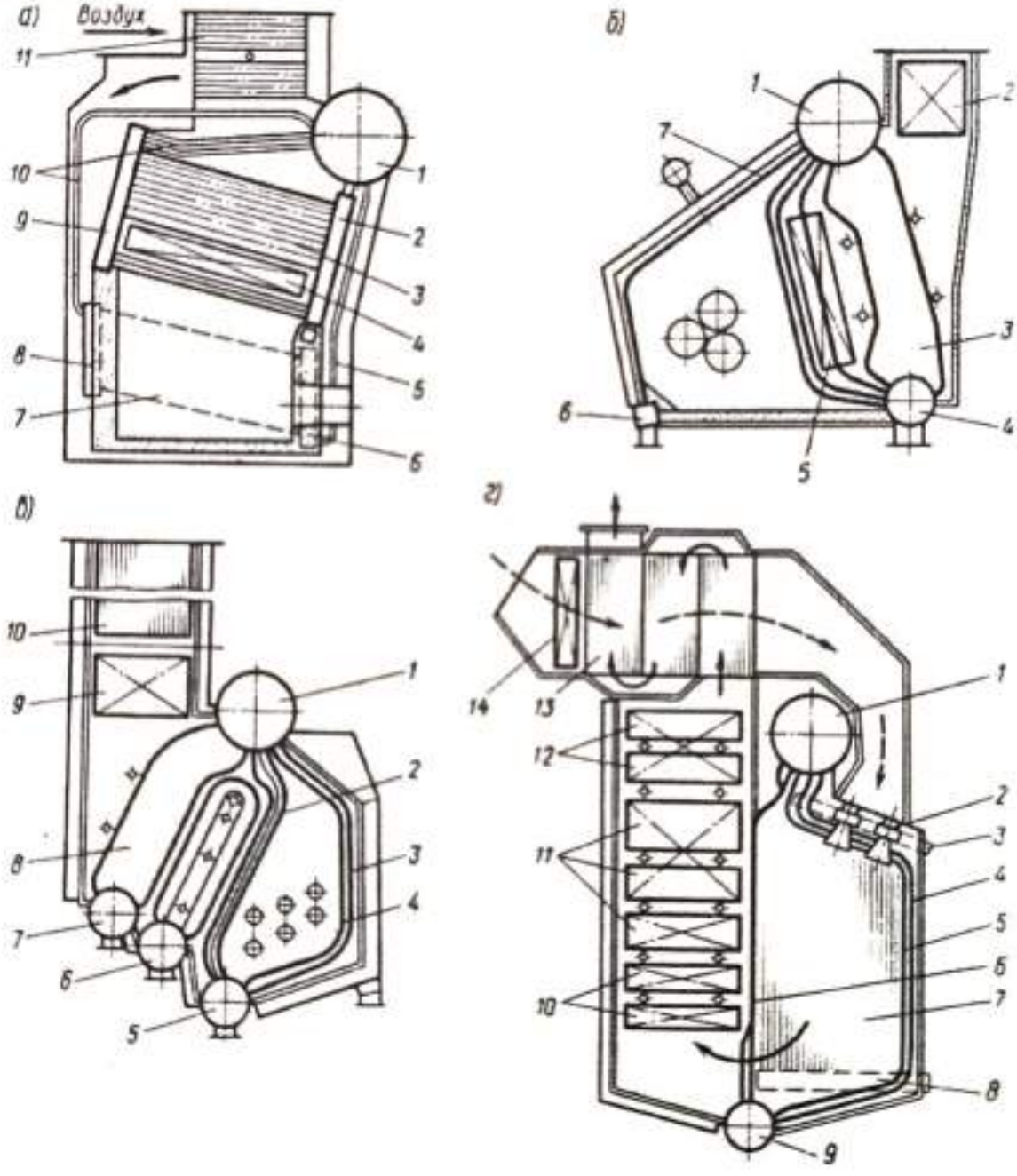


Рис. 4.1. Принципиальные схемы компоновок главных однопроточных водотрубных котлов

а) – секционные; б), в) – однопроточные; г) – вертикально-водотрубные радиационного типа;

Что касается секционных котлов, то они применялись в основном на судах сравнительно давней постройки. На смену котлам секционного типа пришли однопроточные. Однопроточный котел содержит соединенные трубами два основных барабана: пароводяной и водяной. Обязательным элементом топки такого агрегата является боковой экран, образующий сплошную или разреженную стенку труб, которая воспринимает лучистое тепло. Односторонний ход газов позволяет сделать компактной поверхность нагрева основного конвективного пучка труб, внутри которого размещают пароперегреватель.

Однопроточные агрегаты всегда имеют хвостовые поверхности нагрева; экономайзер или/и воздухоподогреватель. Их общая конструктивная компоновка довольно проста и удобна в обслуживании.

Повышение параметров пара, а также требование высокой экономичности котла предопределили такую компоновку, в которой нет конвективного пучка, а парогенерирующими элементами являются лишь лучевоспринимающие поверхности нагрева.

Следует отметить, что такой принцип компоновки котлов является характерным для современной судовой практики создания паротурбинных установок, как с промежуточным перегревом пара, так и обычных. Такие котлы иногда называют котлами радиационного типа.

4.2. Типовая схема секционного водотрубного котла (а)

В основном такие котлы установлены на судах давней постройки, где в качестве главного двигателя использовалась паровая машина (на рыбопромысловых судах рыбного флота еще и сейчас эксплуатируются СЭУ с паровыми машинами). На судах транспортного флота секционные котлы используют только как вспомогательные. Основные особенности конструкции секционного котла хорошо видны на рис. 4.1.(а).

Корпус котла состоит из основного контура циркуляции, включающего пароводяной барабан 1, водяные 2 и пароводяные 9 камеры, соединенные парообразующими трубами 3. Пароводяная смесь из камеры 9 отводится в барабан по трубам 10. Петлевой горизонтальный пароперегреватель 4 расположен внутри пучка за тремя рядами парообразующих труб большого диаметра. Второй контур циркуляции образован опускными трубами 5, вертикальными водяным 6 и пароводяным 8 коллекторами, которые соединены наклонными трубами боковых экранов 7, а пароводяная смесь из коллектора 8 отводится в барабан по трубе 10. Котел оборудуется экономайзером или воздухоподогревателем 11.

Секционные котлы имеют существенные недостатки:

- жесткость конструкции, обусловленная прямыми парообразующими трубами;
- сложность изготовления волнистых камер;
- большое число лючков в камерах;
- низкая экономичность и невысокие параметры пара;
- ненадежная циркуляция, что привело к замене их на более совершенные однопроточные и вертикально-водотрубные котлы.

4.3. Типовые схемы однопроточных котлов (б), (в)

б) Экранный циркуляционный контур состоит из однорядного экрана 7, двух опускных труб, расположенных за пределами топки, водяного экранного коллектора - 6 и пароводяного барабана - 1. Второй контур циркуляции: конвективный пучок - 3, необогреваемые опускные трубы в межобшивочном пространстве, водяной коллектор - 4 и барабан - 1. Пароперегреватель – 5, петлевой, горизонтальный, водяной экономайзер – 2, змеевиковый из ошипованных труб. В пароводяном барабане установлены циклоны, в которых вода отделяется от пара.

в) Главные однопроточные водотрубные котлы, типа КВГ25, КВГ34 и КВГ43 (Рис. 4.2.) (которые использовались на сухогрузных судах серии «Ленинский комсомол», танкерах типа «София» и плавбазе «Восток»). В свое время это были высокоэкономичные (к.п.д. до 93 %) и достаточно надежные котлы.

1 – пароводяной барабан; 2 – радиационный водогрейный пучок трубок; 3,4 – 2-х рядный экран топочного пространства; 5 – водяной барабан радиационной части; 6 – коллектор пароперегревателя; 7 – водяной барабан конвективной части; 8 – конвективный пучок водогрейных трубок; 9 – экономайзер; 10 – воздухоподогреватель; (на котлах КВГ34 воздухоподогреватель паровой).

4.4. Типовая схема вертикально-водотрубного радиационного типа котла (г)

г) Топка котлов с промежуточным перегревом пара радиационного типа полностью экранирована и имеет потолочное расположение топочных устройств. Большие объемы топки и потолочное расположение горелок обеспечивают эффективное сжигание топлива с малыми избытками воздуха ($\alpha = 1{,}03 \div 1{,}05$), что позволяет уменьшить температуру точки росы дымовых газов и повысить к.п.д. до $96 \div 97$ %. При этом значительно увеличиваются размеры хвостовых поверхностей нагрева. Особенно это относится к воздухоподогревателю, поскольку размеры экономайзера ограничиваются

применением развитой системы регенеративного подогрева питательной воды (вне котла) до температуры 220 ÷ 230°С. Применение промежуточного перегрева пара в паротурбинных установках потребовало дополнительного усложнения главных котлов путем установки в конвективной части поверхности промежуточного пароперегревателя.

Как видно на рис. 4.2. корпус котла состоит из трех контуров циркуляции, образующих полностью экранированную топку с потолочным расположением горелок 2. Первый контур образован опускными трубами 4, подъемными трубами бокового экрана 5 и центрального экрана 6, замкнутыми на продольный водяной коллектор экрана 9 и пароводяной барабан 1. Два других контура циркуляции образованы подъемными трубами двух фронтовых экранов 7, опускными трубами, расположенными за пределами газохода, двумя поперечными экранными коллекторами 8, промежуточным (сборным) пароводяным коллектором 3 и пароводяным барабаном 1. Центральный экран отделяет топку от шахты котла, в которой расположены две секции основного пароперегревателя 10, промежуточный (вторичный) пароперегреватель 11, водяной экономайзер 12 и трехходовой (по газовой стороне) воздухоподогреватель 13. На входе воздухоподогревателя (по воздушной стороне) расположен подогреватель воздуха 14, повышающий его температуру на входе в последний (холодный) ход газов с целью предотвратить низкотемпературную коррозию. Промежуточный пароперегреватель состоит из двух последовательно включенных (по схеме противотока) секций 11, между которыми размещены элементы системы регулирования температуры пара. В рассечку пароперегревателя 10 включен внутрибарабанный пароохладитель системы регулирования температуры перегретого пара. В пароводяном барабане установлен также вспомогательный пароохладитель, обеспечивающий охлажденным паром турбоприводные вспомогательные механизмы.

4.5. Главные котлы однопроточные типа КВГ-25, 34, 43

Котлы типа КВГ широко применялись в середине XX – века на транспортных судах. КВГ25К – на сухогрузных судах серии «Ленинский комсомол», КВГ34К на танкерах типа «София», КВГ43 на рыболовецкой плавбазе «Восток».

В то время это были высокоэкономичные (к.п.д. 93 %) и достаточно надежные котлы.

Конструктивные особенности котлов типа КВГ – организация процесса циркуляции и подача воздуха в топку котла.

Котлы имеют два контура циркуляции – притопочный и внешний.

Внешний независимый контур включает конвективный пучок 1, все трубки этого пучка являются подъемными, а для опуска служат трубы обратной воды

соединяющие пароводяной 2 и водяной 3 барабаны расположенные с переднего и заднего фронтов.

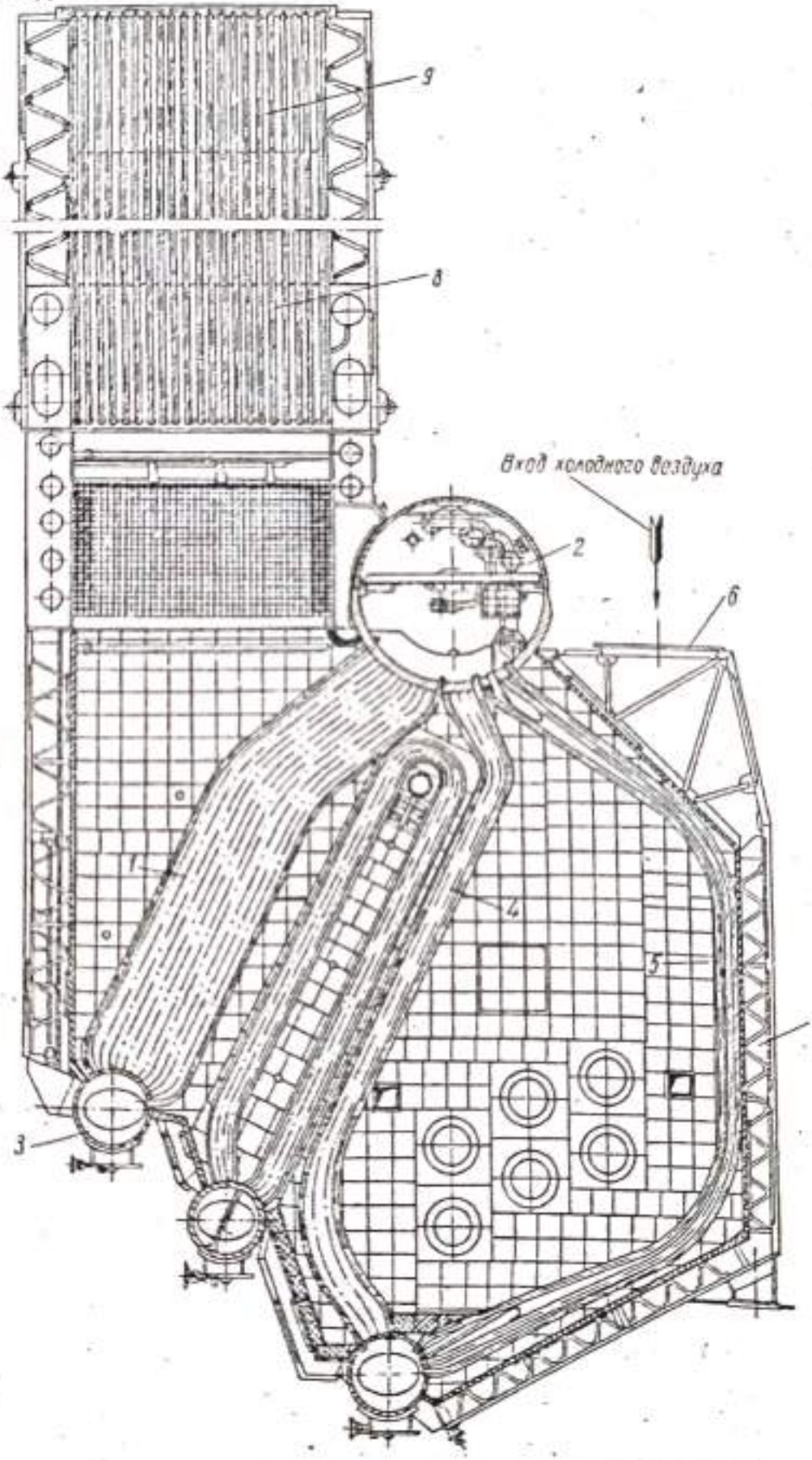


Рис. 4.2. Главный водотрубный котел КВГ-25 (34, 43)

Притопочный сложный контур циркуляции образуется притопочным пучком 4 и экранным пучком 5. Все трубки этого пучка являются подъемными.

Экранный пучок состоит из двух подъемных рядов трубок образующих сплошную стену и двух опускных рядов трубок большего диаметра образующих также сплошную стенку.

Воздушный тракт котлов несколько усложнен, что объясняется стремлением обеспечить долговечность трубок воздухоподогревателя. Воздух подается в двойную обшивку котла через патрубок 6, откуда по вертикальному каналу 7, поступает в воздухоподогреватель, пройдя который направляется в воздухонаправляющее устройства форсунок. Такая компоновка воздушного тракта позволяет предварительно подогреть воздух в двойной обшивке котла и нижнем пакете 8 воздухоподогревателя. Он поступает подогретый примерно до 90°С (при нормальной нагрузке), чем уменьшается вероятность конденсации водяных паров, содержащихся в отработанных газах, а следовательно, и возможность коррозии трубок.

Воздухоподогреватель 9 вертикальный, трехходовой, при понижении нагрузки котла предусмотрено байпасирование воздухоподогревателя по воздушной стороне.

Котлы оборудованы петлевыми, вертикальными пароперегревателями, а также гладкотрубными экономайзерами змеевикового типа.

На котлах КВГ34К были установлены четырехсекционные экономайзеры и паровые воздухоподогреватели.

Внутри пароводяного барабана установлено сепарирующее устройство обеспечивающее влажность пара менее 0,5 % и главный и вспомогательный пароохладители. Главный пароохладитель служит для регулирования температуры перегретого пара, а вспомогательный – для получения охлажденного пара для работы вспомогательных механизмов.

4.6. Главный котел КВГ5 атомного лихтеровоза «Севморпуть»

Примером современного однопроточного водотрубного котла может служить главный котел КВГ5 (Рис. 4.3.) (котел водотрубный, главный паропроизводительностью 50 т/час), установленного на лихтеровозе «Севмортуть» с ядерной энергетической установеой. Котел обеспечивает работуглавного турбозубчатого агрегата (ГТЗА) при выключенном реакторе.

В корпусе котла расположен один контур циркуляции, который состоит из пароводяного барабана 12 и водяного коллектора 25, соединенных подъемными парообразующими трубами конвективного пучка 24, экрана 28 и опускными трубами 29. За конвективным пучком находится вертикальный пароперегреватель, состоящий из верхнего 17 и нижнего 23 коллекторов, соединенных трубами 22. Насыщенный пар из барабана 12 подводится к

верхнему коллектору по сообщительной трубе 16. Перегретый пар отводится также от верхнего коллектора. Для обеспечения требуемой скорости пара (около 10 м/с) в трубах пароперегревателя в верхнем коллекторе установлены две поперечные перегородки, а в нижнем – одна.

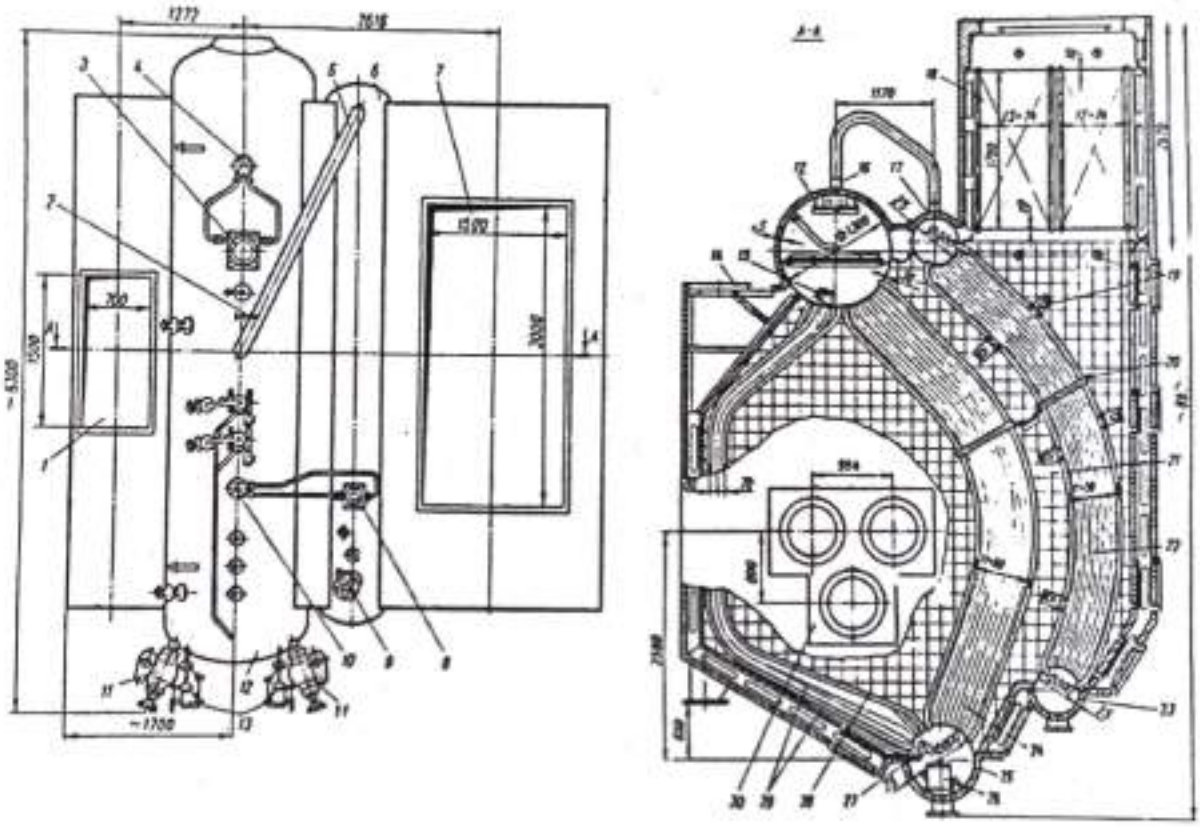


Рис. 4.3. Главный котел КВГ5

Между конвективным пучком 24 и пароперегревателем 22 для ремонта предусмотрено пространство (пазуха) 21 обеспечивающее свободный доступ для механической очистки труб и сажеобдувочных устройств 19 и трубной опоры (гребенки) 20. В барабане 25 размещен паровой подогреватель 26, обеспечивающий требуемый температурный режим котловой воды для поддержания котла в состоянии готовности к быстрому пуску. Питательная труба 15 в барабане 12 размещена таким образом, чтобы обеспечивать надежный подвод воды к опускным трубам 29. При этом труба выгорожена, что исключает попадание паровых пузырей из подъемных труб пучка 24 и экрана 28 в опускные 29. В водяном барабане 25 предусмотрен обтекатель 27, улучшающий подвод воды из опускных труб 29 в подъемные 28 и 24. На фронте котла размещены три горелки 30. Воздух подводится в патрубок 14, омывает часть двойной обшивки котла, поступает в воздухоподогреватель 18, из которого горячий воздух направляется в воздушный короб горелок.

На барабане 12 установлен сдвоенный предохранительный клапан 3 и импульсным клапаном 4 к нему, питательные клапаны 11 и водоуказательные

приборы 13. На коллекторе пароперегревателя также размещены предохранительный 8 и импульсный 10 клапаны. В одном корпусе клапана 11 смонтированы разобщительный и невозвратный клапаны. Насыщенный пар из барабана 12 подводится в коллектор 6 пароперегревателя по сообщительной трубе 5, на которой предусмотрен клапан 2 для выпуска воздуха во время ввода котла в действие. Перегретый пар отводится через стопорный клапан 9 на верхнем коллекторе пароперегревателя. Патрубки 1, 7 служат соответственно для входа воздуха и отвода уходящих газов.

Котел КВГ5 имеет паропроизводительность 50 тыс. кг/ч, рабочее давление в пароводяном барабане 2,8 МПа (за стопорным клапаном пароперегревателя 2,5 МПа); температура перегретого пара 357°С; расход топлива – 3920 кг/ч, к.п.д. 85,6 %; температура питательной воды 105°С; масса котла сухого 80 т, с холодной водой 90 т.

При работе установки с котлом КВГ5 ГТЗА обеспечивает мощность 4780 кВт (при отключенной основной АПУ), скорость судна в чистой воде составляет 10 уз; при полной нагрузке АПУ мощность ГТЗА составляет 29420 кВт, а скорость 20 уз. Лихтеровоз «Севморпуть» имеет водоизмещение 61 тыс. т, грузовместимость 74 лихтера или 1330 морских контейнеров.

4.7. Котел Фостер-Уиллер

Котлы Фостер-Уиллер устанавливались на американских торговых судах. (Рис. 4.4.), по компоновке значительно отличается от ранее рассмотренных однопроточных котлов. Испарительная часть котла состоит из парового коллектора 1, соединенного двумя вертикальными пучками трубок с водяном коллектором 2 и системой трубок – с экранными коллекторами. Конвективный пучок трубок состоит из шестнадцати рядов, причем наружный диаметр первых трех рядов несколько больше последующих тринадцати рядов. Трубки экрана ограничивают топочный объем. Несколько ниже пода топки расположены экранные камеры 3 и 4, которые снабжаются водой из водяного коллектора по необогреваемой системе труб с большим диаметром. Эти трубы покрыты сверху кирпичом и поэтому не воспринимают тепла. Стенки топки котла, за исключением фронта, со всех сторон покрыты экраном.

Пароперегреватель размещен за третьим рядом испарительных трубок, чем достигается сравнительно малая зависимость температуры перегретого пара от нагрузки котла.

Суда, на которых были установлены эти котлы, отработали свыше нормативного срока службы.

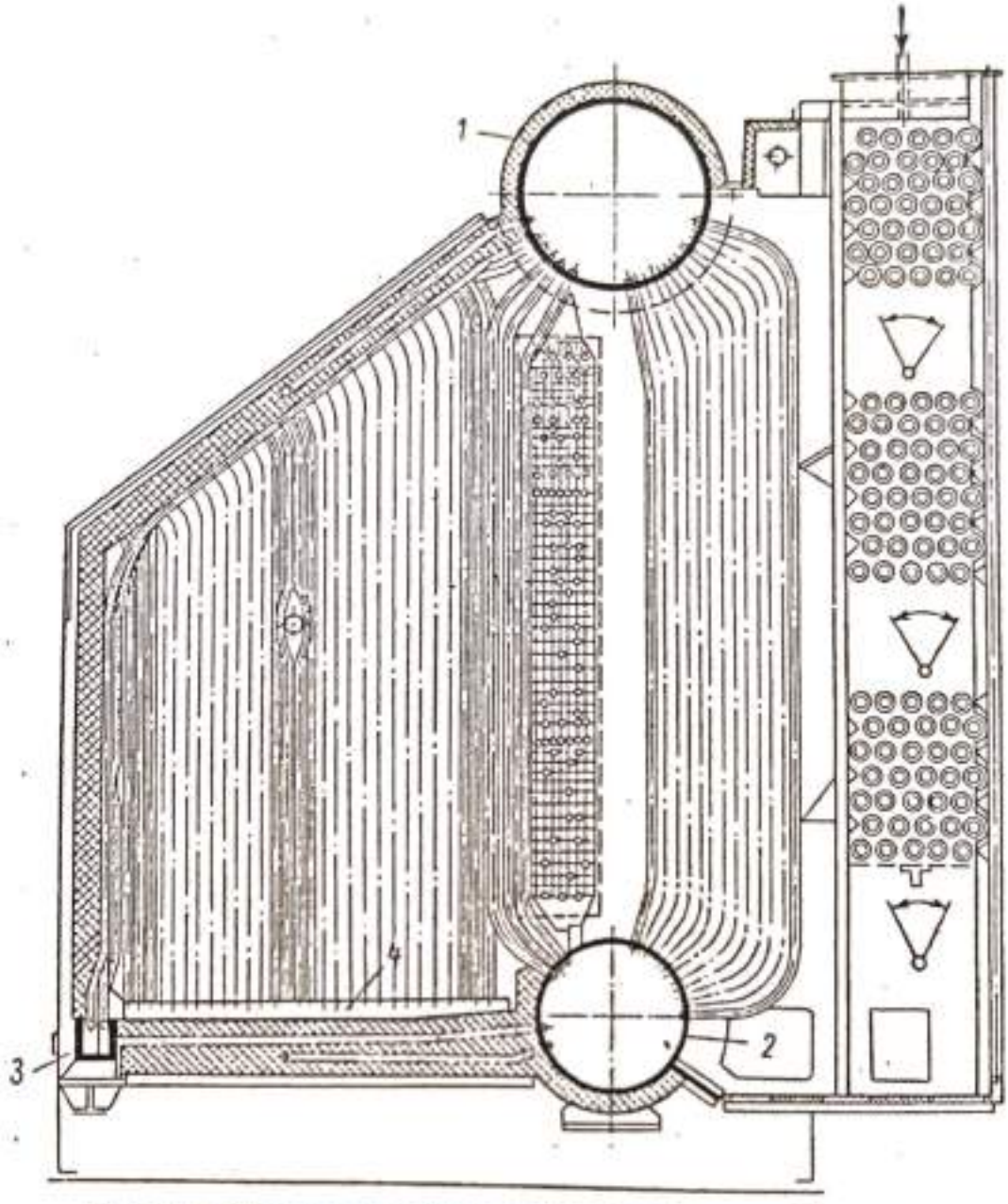


Рис. 4.4. Однопоточный котел фирмы Фостер – Уиллер

4.8. Главный котел радиационного, U-образного типа КВГ- 80

Парогенератор КВГ80 (Рис. 4.5.) имеет паропроизводительность 80 т/ч, давление перегретого пара 8 МПа. У этого котла полностью экранированная топочная камера 3 с потолочным расположением горелок 2. Газы из топки поступают на конвективные поверхности нагрева через разреженный участок труб (фестон) 4.

Основной пароперегреватель состоит из двух секций: первой 5 и второй 6. Промежуточный пароперегреватель 7 выполнен из трех пакетов труб. Хвостовые поверхности включают водяной экономайзер 8 и трехсекционный (по газовой стороне) воздухоподогреватель 1. Предусмотрен также предвключенный

водовоздушный подогреватель 9, выполненный из ребристых труб. В верхней части воздухоподогревателя размещено предохранительное устройство.

Масса котла (без воды) – около 300 тонн. Масса воды 18 тонн.

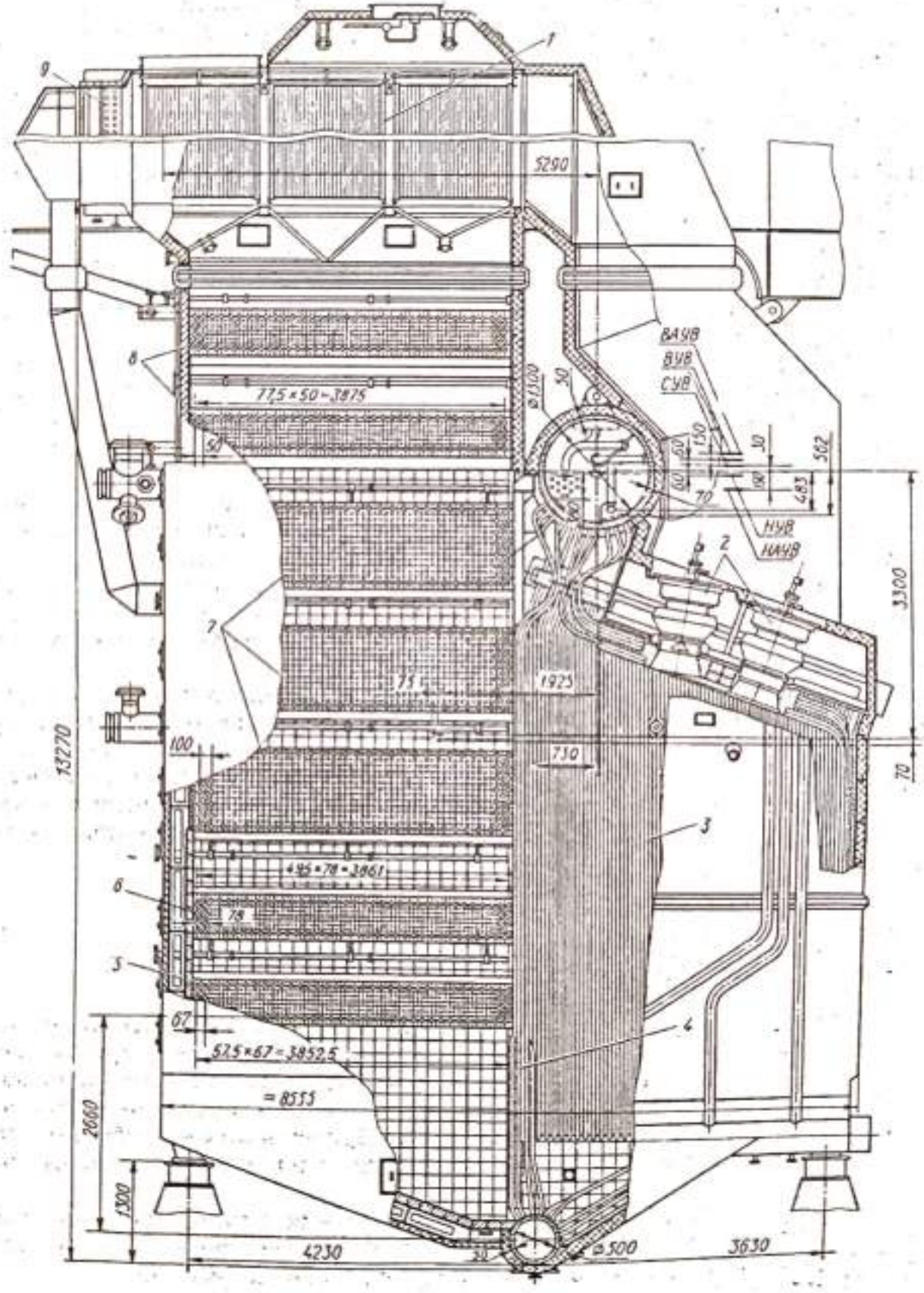


Рис. 4.5. Парогенератор КВГ80

Конструктивной особенностью компоновки U-образного котла (Рис. 4.6.) с промежуточным перегревом пара является шахта топочной камеры 22, образованной экранами (трубами) 21, 23 и 25. Экранные трубы 25 закреплены в коллекторах 20 и 26. Образовавшиеся в топке продукты сгорания поступают через фестон 28 в левую часть, которая представляет собой шахту с размещенными в ней конвективными поверхностями нагрева основного (первичного) пароперегревателя 4, водяного экономайзера 13 и воздухоподогревателя 12. Конвективные поверхности пароводяного тракта выполнены в виде змеевиковых пакетов труб. Экранные ряды труб 21 и 23 являются подъемными, а опуск воды из пароводяного барабана 16 в экранный коллектор 27 осуществляется по трубам 24. Горячий воздух от воздухоподогревателя подается по двум каналам к горелкам 19, расположенным в верхней части топочной камеры 22 (так называемое расположение горелок).

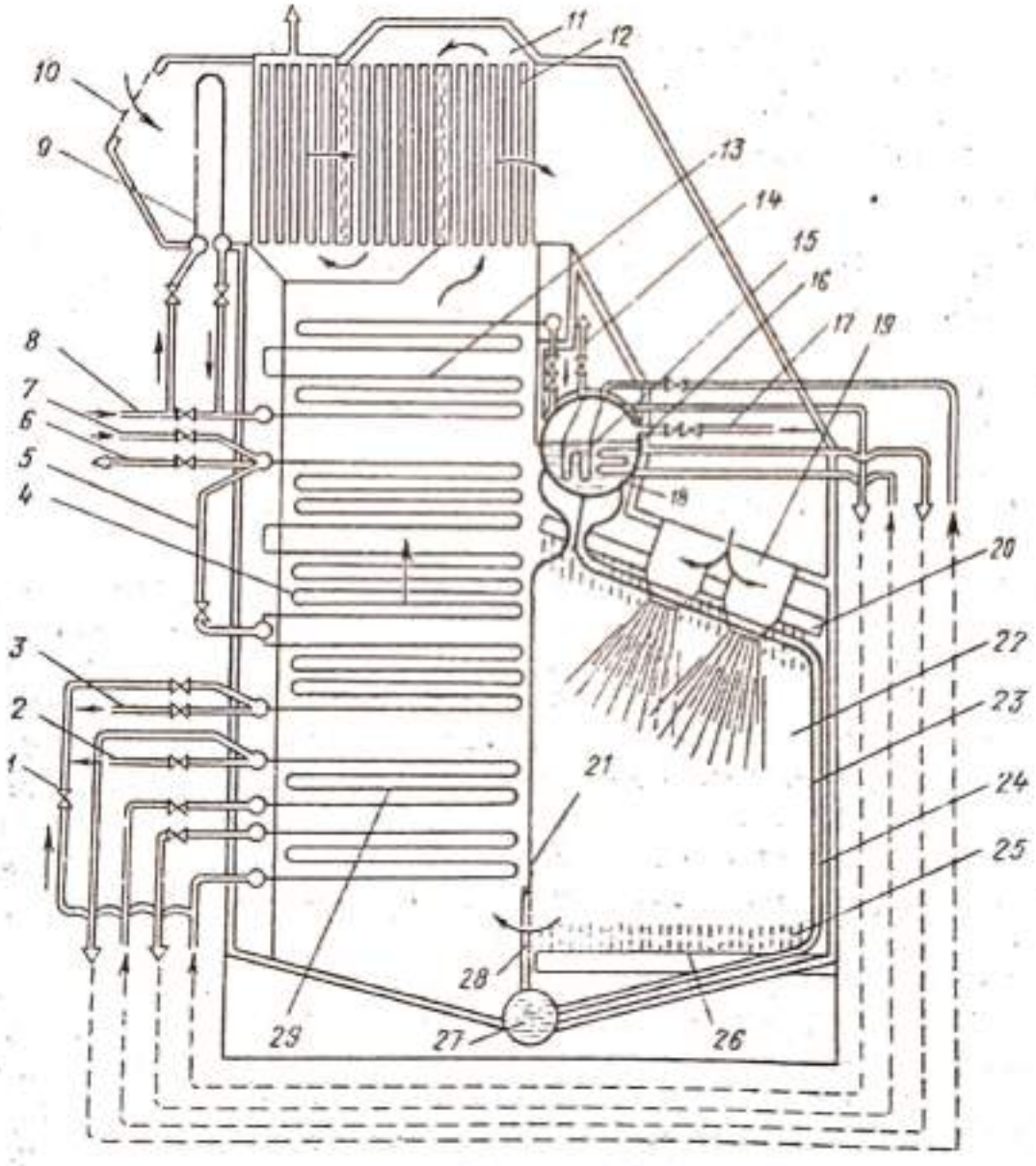


Рис. 4.6. Компоновки U-образного котла с промежуточным перегревом пара

Воздухоподогреватель 12 выполнен с тремя ходами по газовой стороне. Газы движутся внутри труб, а воздух омывает их снаружи. Учитывая такую конструкцию, включающую повороты с нисходящим потоком дымовых газов, предусмотрена установка срабатывающего (предохранительного) клапана в верхней части канала 11, что исключает нежелательные последствия от возможного скопления взрывоопасной смеси газов в этой части воздухоподогревателя. Воздух от вентилятора подводится в камеру 10, в которой расположен небольших размеров подогреватель 9, обеспечивающий предварительный подогрев воздуха питательной водой, поступающей по трубопроводу 8. Это позволяет повысить температуру стенок труб третьего хода воздухоподогревателя, из которого газы уходят с наименьшей температурой. Кроме того, внутренние поверхности труб третьего хода воздухоподогревателя имеют пластмассовое покрытие. Таким образом, исключение низкотемпературной сернистой коррозии в этом котле обеспечено за счет сжигания топлива при низком коэффициенте избытка воздуха, предварительного подогрева воздуха и применения наружного покрытия части труб воздухоподогревателя.

В промежуточный перегреватель 4 пар главной турбины подводится к турбине по линии 3. По трубопроводу 6 пар поступает в систему охлажденного пара. Верхний и средний коллекторы промежуточного перегревателя 4 сообщены трубопроводом 5, включенным в систему регулирования. Предусмотрена также защита промежуточного перегревателя с помощью подвода к нему через устройство 1 насыщенного пара. Перегретый пар от основного пароперегревателя 29 отводится к турбине по главному паропроводу 2. В рассечку пароперегревателя 29 включен пароохладитель 18 системы регулирования температуры перегретого пара. В пароводяном барабане 16 установлен также вспомогательный пароохладитель 15; от него отводится охлажденный пар по трубопроводу 14. В барабан 16 предусмотрен подвод питательной воды помимо водяного экономайзера 13 по трубопроводу 17.

4.9. Двухконтурные котлы

Появление двухконтурных котлов (Рис. 4.7., 4.8.) обусловлено стремлением создать конструкцию котла, которая могла бы надежно работать на питательной воде низкого качества.

Первичный контур представляет собой водотрубный котел с естественной циркуляцией, состоящий из парового 1 и водяного 2 коллекторов, соединенных двумя пучками трубок, ограничивающих топочный объем, и змеевики 3, в который поступает пар, вырабатываемый котлом.

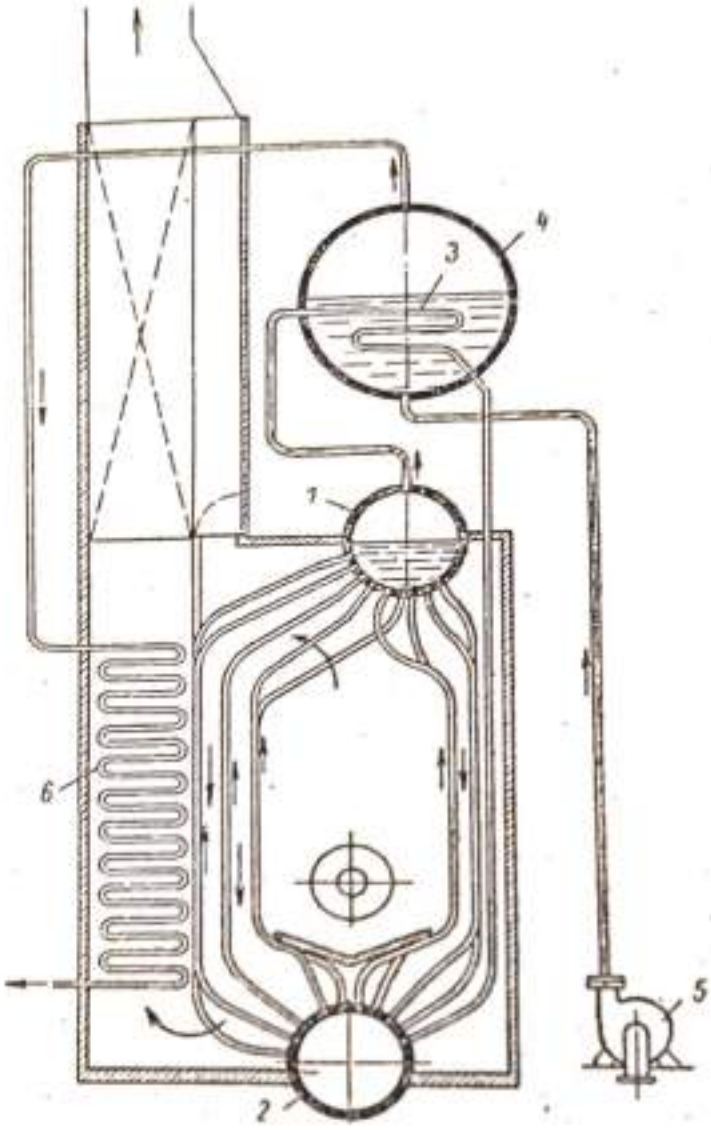


Рис. 4.7. Схема двухконтурного котла

Вторичный контур состоит из парового коллектора 4 и пароподогревателя 6. Давление в коллекторе 1 примерно в 2 – 3 раза больше давления в коллекторе 4, причем разность температур первичного (греющего) и второго (рабочего) пара должна составлять примерно 50°С. Благодаря этому создается необходимая для теплообмена разность температур пара, проходящего по змеевику 3, и воды, находящейся в коллекторе 4.

Дымовые газы, образующиеся в топке котла в результате сгорания топлива, передают свое тепло воде циркулирующей по первичному контуру. Пар собирается в коллекторе 1, затем направляется в змеевик 3, размещенный в водяном пространстве коллектора 4, где отдает свое тепло воде, превращается в конденсат и стекает в коллектор 2. В результате этого в коллекторе 4 образуется пар, который проходит через пароперегреватель 6 и направляется к потребителю. В первичном контуре котла циркулирует химочищенная котловая вода, а во вторичный контур может подаваться обычная вода. Соли,

образующиеся в результате парообразования, накапливаются в коллекторе и продуваются.

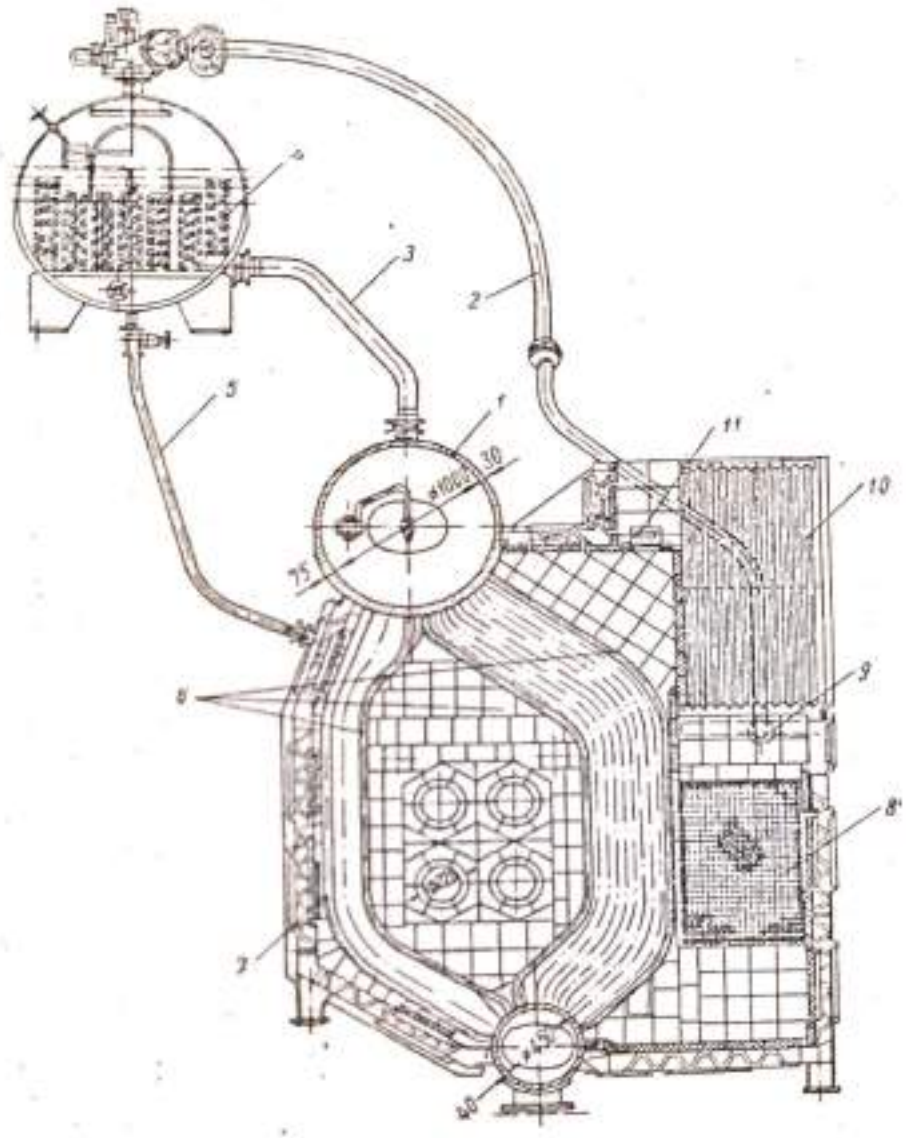


Рис. 4.8. Общий вид двухконтурного котла

Первичный контур состоит из водотрубного однопроточного котла 1 с естественной циркуляцией и испарителя 4.

Контур циркуляции котла состоит из подъемных трубок 6 и опускных 7, расположенных за экраном. Часть опускных трубок котла связана трубой 5 с испарителем 4. Котел снабжен змеевиковым пароперегревателем 10. Для регулирования температуры перегретого пара предусмотрен перепуск части газа в дымовую трубу помимо пароперегревателя через клапан 11. Из пароводяного коллектора котла по трубе 3 пар давлением 60 кг/см^2 поступает в змеевик испарителя 4, где отдает тепло воде и, конденсируясь, по трубе 5 направляется в опускные трубы котла. В испарителе образуется пар с давлением 28 кг/см^2, который по трубе 2 направляется в коллектор 9 пароперегревателя. В пароперегревателе пар перегревается до температуры 380°С и поступает к потребителю.

Достоинства двухконтурных котлов:

- благодаря наличию двух самостоятельных контуров менее требовательны к качеству питательной воды, так как обогреваемые газами поверхности нагрева омываются изнутри чистой водой, что обуславливает их надежную работу;

- дают пар относительно малой влажности без специальных устройств.

Недостатки этих котлов:

- не могут производить пар высоких параметров, так как для этого требуется чрезмерно высокое давление в первичном контуре котла;

- имеют сравнительно малую паропроизводительность, так как для повышения необходимо иметь паровой коллектор больших размеров.

Котлы этого типа применяются главным образом на речных судах.

4.10. Котлы с принудительной циркуляцией, прямоточные и высоконапорные парогенераторы

Принудительный ток воды осуществляется в прямоточных котлах и в котлах с искусственной циркуляцией (Рис. 4.9.). В зависимости от давления, при котором сжигается топливо в топке, котлы могут быть обычными и высоконапорными (с наддувом). В процессе наддува жидкое топливо сжигается в топке при избыточном давлении $0{,}1 \div 0{,}4$ МПа и выше. Причем котлы как обычные, так и с наддувом могут иметь естественную циркуляцию и принудительный ток воды. И те, и другие имеют преимущества перед обычными котлами.

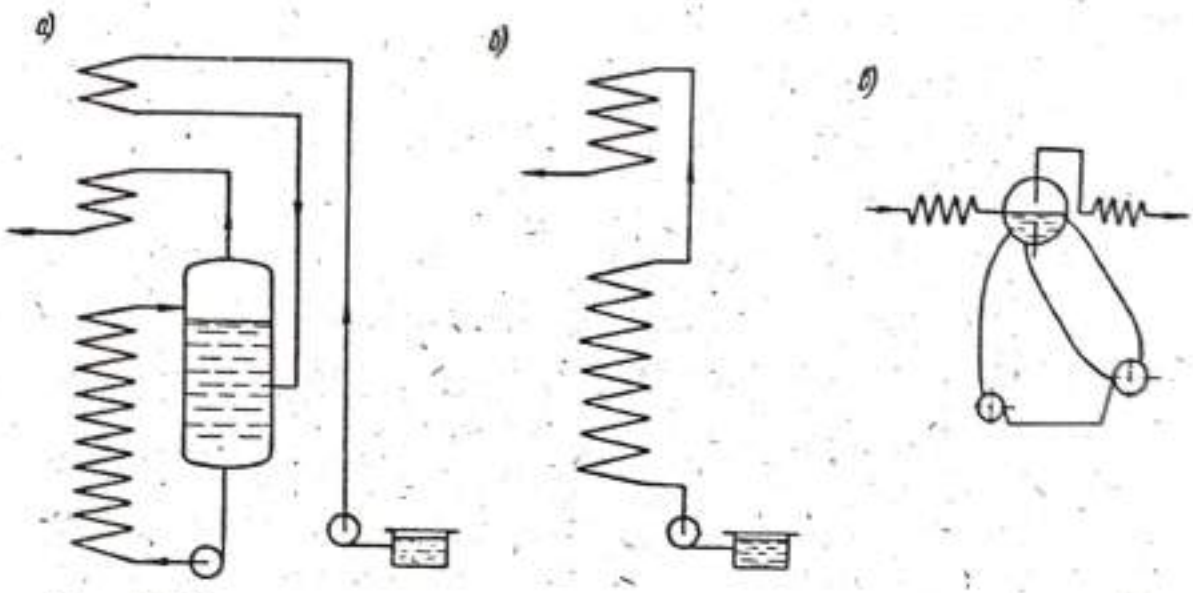


Рис. 4.9. Схемы котлов с принудительной и естественной циркуляцией
а) принудительная циркуляция; б) прямоточная; в) естественная циркуляция

Для создания искусственной циркуляции воды необходим специальный циркуляционный насос, работоспособность которого определяет по существу

надежность всей установки. Условия работы насоса весьма тяжелы, так как он должен подавать в парообразующие элементы воду с температурой, близкой к температуре кипения. Следовательно, наличие этого циркуляционного насоса значительно снижает надежность работы установки в целом.

Котлы с искусственной циркуляцией имеют и другие существенные недостатки, поэтому широкого распространения на флоте не получили, их применяют только в качестве вспомогательных и утилизационных.

У прямоточных котлов преимуществ значительно больше, чем у агрегатов с искусственной циркуляцией: нет громоздких пароводяных и водяных барабанов, так как отсутствует многократная циркуляция воды; парообразование и перегрев пара происходит в результате последовательного движения воды, пароводяной смеси и пара в отдельных элементах трубных пакетов.

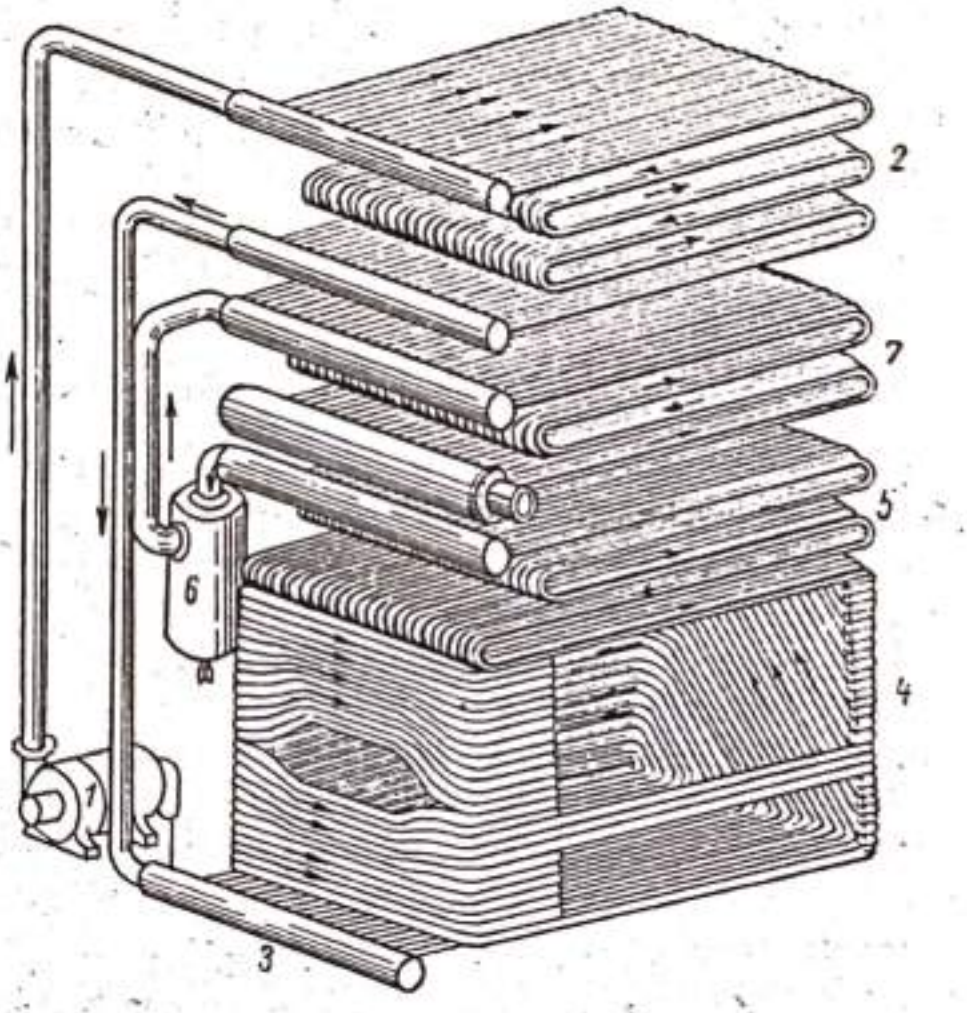


Рис. 4.10. Схема компоновки судового прямоточного котла системы Рамзина Л.К.

1 – питательный насос; 2 – экономайзер; 3 – распределительный коллектор; 4 – лучевоспринимающая часть (на входе в каждую трубку стоит дроссельная шайба); 5 – конвективный пучок; 6 – пароводяной сепаратор; 7 – пароперегреватель;

Идея прямоточного котла принадлежит выдающемуся русскому паротехнику С.В. Литвинову, который в 1820 году предложил проект паросиловой установки с прямоточным котлом. В 1893 году морские инженеры П.Д. Кузьминский и Н.Ф. Пашинин предложили прямоточный котел с поверхностью нагрева, образованной двумя витками трубок, расположенных по спирали. Идея многоходового котла с принудительной циркуляцией, заложенная в этой конструкции, нашла свое развитие в современных прямоточных котлах с принудительной циркуляцией.

В 1933 году был пущен в эксплуатацию стационарный прямоточный котел системы Л.К. Рамзина (Рис. 4.10.), что послужило мощным толчком к дальнейшему развитию прямоточных котлов.

Основные достоинства прямоточных котлов – малые габариты, простота конструкции.

Наряду с этим они имеют весьма серьезные недостатки: обладают повышенной чувствительностью к качеству питательной воды и, главное, для их нормальной работы требуется строгое соответствие между паропроизводительностью, тепловосприятием поверхностей нагрева и количеством подаваемой питательной воды. Обеспечить это соответствие в эксплуатации исключительно трудно, поэтому прямоточные агрегаты не получили пока применения на судах.

4.11. Высоконапорные парогенераторы

Определенную специфику представляют котлы с наддувом в топку, у которых наддувочный агрегат – газовая турбина и воздушный компрессор – используют энергию уходящих газов для подачи в котел воздуха при давлении 1,5 – 3,0 атм. В связи с этим открываются широкие перспективы интенсификации процесса горения и теплообмена в котле.

Согласно существующим представлениям между абсолютным давлением в топке и величиной достижимого теплового напряжения топочного объема существует прямая зависимость. Кроме того, высокое давление воздуха в топке котла позволяет весьма значительно увеличить скорости газов в газоходах.

Современные высоконапорные парогенераторы имеют тепловое напряжение топочного объема $8 \div 10 \cdot 10^6$ ккал/м^3 · час и весовую скорость в газоходах $40 \div 70$ кг/м^2 · сек вместо, соответственно, $2{,}0 \div 2{,}5 \cdot 10^6$ ккал/м^3 · час и $5 \div 7$ кг/м^2 · сек у высоконапряженных котлов без наддува.

Высокий наддув долго не мог быть осуществлен вследствие того, что для его создания необходима большая добавочная мощность для работы компрессора. Однако с появлением газовой турбины эта задача была решена комбинированным использованием теплоты топлива: частично в парогенераторе для получения пара, частично трансформацией ее с механическую энергию в

газовой турбине, вращающей компрессор. Если в обычном котле поставить паровой компрессор, который будет подавать сжатый воздух в топку, то это приведет к сильному снижению к.п.д. установки. Опыт показывает, что в котлах наддувом, осуществляемый газовой турбиной, используемой в качестве привода компрессора, к.п.д. котла может достигать 90 – 92%.Это обусловлено тем, что энергия уходящих газов возвращается в цикл в виде энергии сжатого воздуха, который благодаря сжатию повышает свою температуру до 150 – 160°С. При этом потери турбины и компрессора – механические и в окружающую среду – сравнительно невелики.

Высоконапорные парогенераторы могут быть с естественной или принудительной циркуляцией. Однако наибольший эффект может быть получен при применении принципа принудительной циркуляции.

Несмотря на несколько меньшую надежность этих агрегатов из-за большого количества механизмов, они по сравнению с котлами других типов имеют ряд преимуществ: значительный меньший вес и габариты, лучшую маневренность, более высокие тепловые нагрузки.

Высоконапорный парогенератор – вертикально-водотрубный с естественной циркуляцией (Рис. 4.11.), предназначен для обеспечения паром главной энергетической установки. Рабочее давление в паровом коллекторе – 3,5 ÷ 5,9 МПа. Суммарная паропроизводительность – 100 т/ч.

Котел имеет вертикальный двухколлекторный пароперегреватель 6, водяной экономайзер 15, газоочистное устройство 5 и турбонаддувочный агрегат типа ТНА-4 – 1, 3, 16.

В высоконапорном котле сжигание топлива осуществляется при повышенном давлении воздуха (на полной нагрузке около 3 атм).

Воздух для горения подается компрессором 1, который приводится в действие газовой турбиной 16, использующей энергию дымовых газов. Сжатие воздуха в компрессоре приводит к подогреву его до 150°С.

С изменением нагрузки котла мощность, развиваемая турбиной и необходимая компрессору для сжатия воздуха, изменяется по различным зависимостям, вследствие чего на малых нагрузках имеет место недостаток мощности. Нехватка мощности газовой турбины на малых нагрузках компенсируется паровой добавочной турбиной 3, избыток мощности на нагрузках, близких к полным, гасится путем перепуска части воздуха, подаваемого компрессором через воздушную регулирующую заслонку.

Подача топлива к форсункам 10 осуществляется топливными насосами с турбо- и электроприводами. В топку котла топливо подается и распыляется шестью паромеханическими форсунками 10 (по три с каждого фронта). Для качественного распыла топлива к форсункам подается пар давлением около 0,2 МПа.

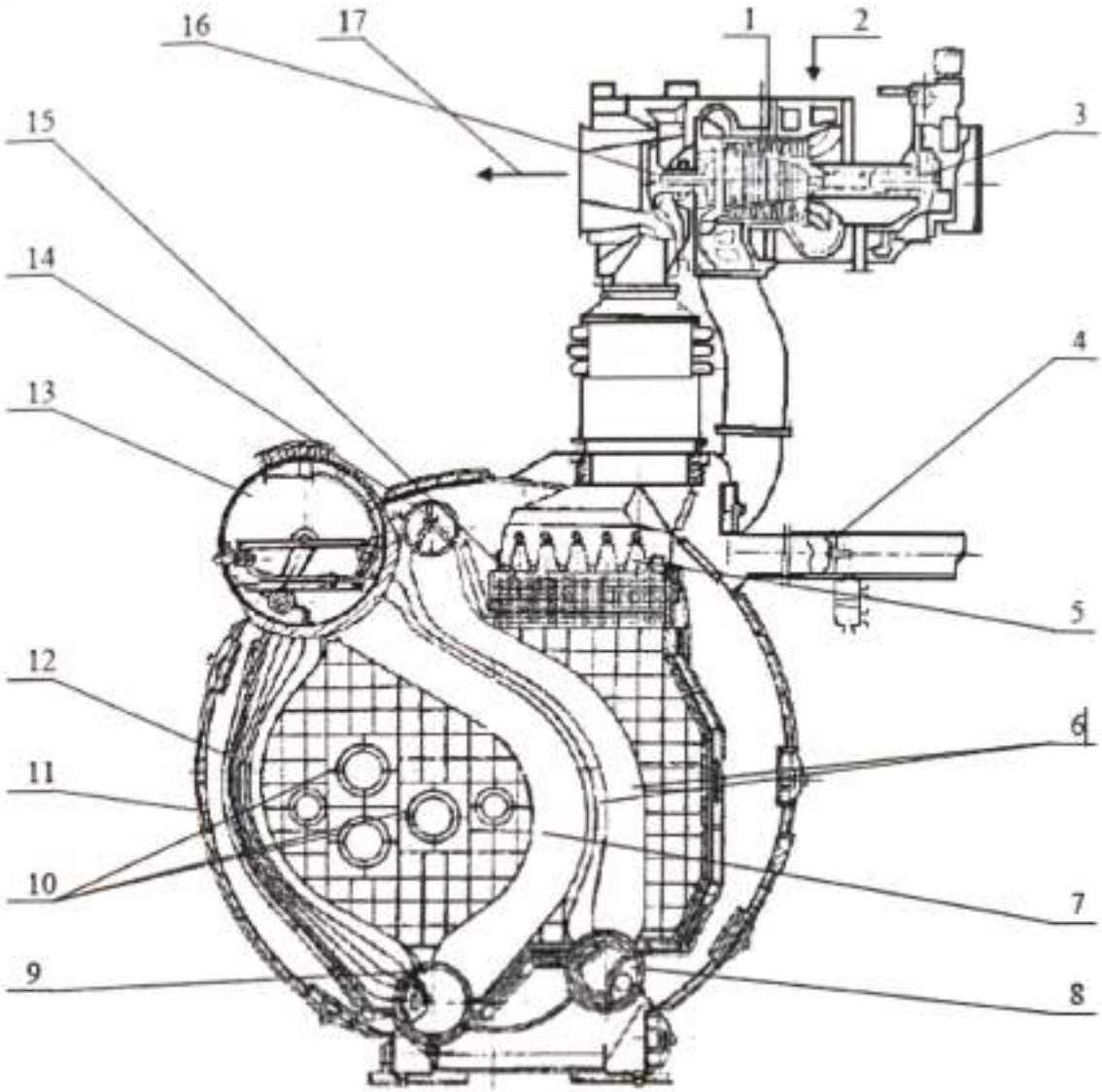


Рис. 4.11. Схема компоновки высоконапорного парогенератора с турбонаддувочным агрегатом

1– турбокомпрессор; 2 – вход воздуха; 3 – паровая добавочная турбина; 4 – воздушная заслонка системы защиты; 5 – газоочистное устройство; 6 – пароперегреватель; 7 – конвективный пучок; 8 – нижний коллектор пароперегревателя; 9 – водяной коллектор; 10 – паромеханические форсунки; 11 – опускной пучок; 12 – трубы экрана; 13 – пароводяной барабан; 14 – верхний коллектор пароперегревателя; 15 – водяной экономайзер; 16 – газовая турбина; 17 – газ на газоохладитель

Воздух после компрессора 1 проходит через межобшивочное пространство двухслойного кожуха и через воздухонаправляющее устройство поступает в топку котла, где смешивается с распыленным форсунками топливом, обеспечивая качественное его сжигание.

Продукт сгорания топлива, отдав часть своего тепла поверхностям нагрева – испарительной 7, 12, пароперегревательной 6 и экономайзерной 15, поступает в газовую турбину 16, предварительно очищаясь от твердых частиц в

газоочистном устройстве 5. Отработавшие в газовой турбине газы через газоохладитель выходят в дымовую трубу.

Питательная вода подается питательным насосом через экономайзер 15 в пароводяной барабан котла 13.

Генерация пара осуществляется за счет тепла, воспринятого через поверхности нагрева циркулирующей в котле водой.

Котел имеет один контур циркуляции, образующий испарительную часть котла, состоящий из труб опускного пучка 11, экрана 12 и конвективного пучка 7, замкнутых на паровой 13 и водяной 9 коллекторы. Циркуляция воды осуществляется за счет разности удельных весов пароводяной смеси в обогреваемых трубах и воды в опускных трубах.

Для обеспечения надежной циркуляции воды питательная вода, подогретая в экономайзере, подается в паровой коллектор непосредственно к опускным трубкам в специальную выгородку. Опускные трубы по сравнению с трубами экрана и конвективного пучка имеют больший диаметр.

Насыщенный пар из парового коллектора по специальной выгородке входит в трубы трехходового пароперегревателя, который состоит из верхнего 14 и нижнего 8 коллекторов и труб 6, образующих пароперегревательную часть котла, и поступает к потребителю. Помимо этого отбор насыщенного пара к потребителю производится через вспомогательный стопорный клапан.

Пароперегреватель и экономайзер являются прямоточными элементами котла. В экономайзере движение воды происходит за счет напора питательного насоса, а в пароперегревателе пар движется за счет отбора его из котла через запорное устройство.

Котел автоматизирован. Автоматизированное управление работой котла осуществляется системами регулирования питания и горения.

Котел может вырабатывать пар переменного давления в зависимости от нагрузки. При этом для каждого давления установлена максимально допустимая нагрузка. Изменение нагрузки осуществляется как изменением количества включенных форсунок, так и изменением давления топлива перед форсунками. Нижний предел рабочего давления пара в паровом коллекторе 3,5 МПа. Верхний предел – 5,9 МПа.

4.12. Схема компоновки высоконапорного парогенератора типа «Сюраль»

Котел типа «Сюраль» представленный на рис. 4.12. состоит из трубной системы 2, заключенной в прочноплотный кожух 5, экономайзера 8, компрессора 11, приводящихся в движение турбинами 12. Компрессором 11 воздух забирается из атмосферы и подается под давлением около 0,2 МПа в кожух 5 котла, откуда направляется в топку котла 7. Продукты сгорания топлива у задней стенки 6 топки поворачивается на 180° и направляется в трубную

систему 2, состоящую из разряженного пучка 4, пароперегревателя 3 и тесного пучка 1.

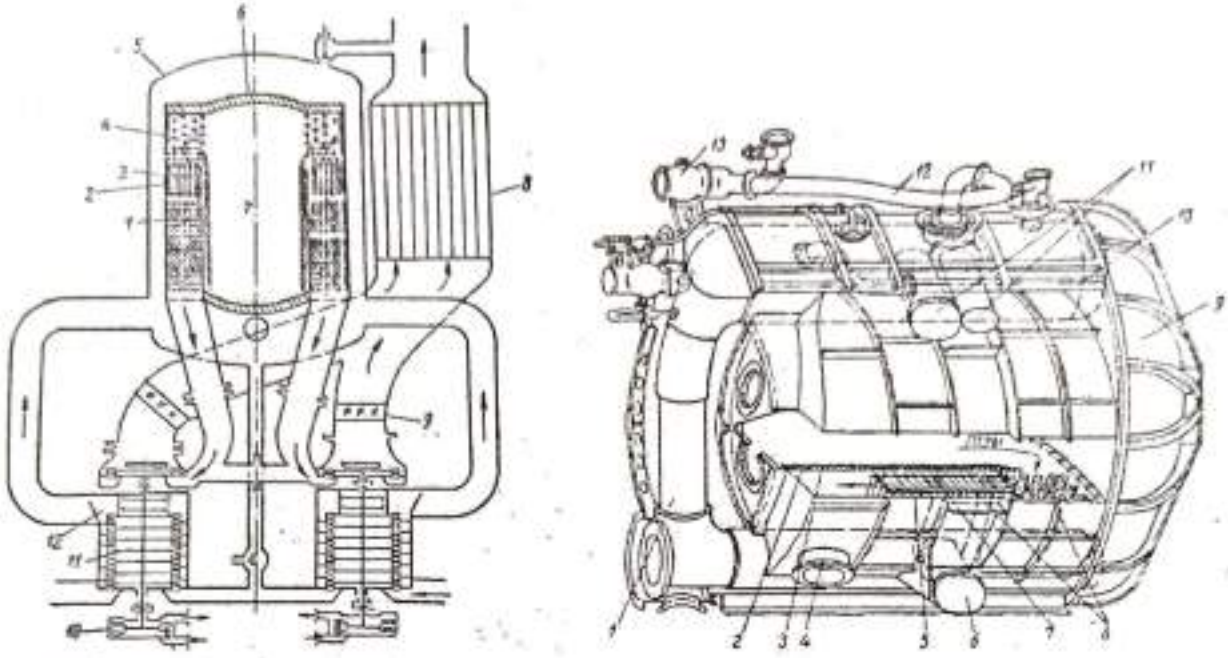


Рис. 4.12. Схема и общий вид котла с наддувом в топке типа «Сюраль», получивший распространение на кораблях французского военно-морского флота

Из трубной системы продукты сгорания поступают в газовую турбину 12, откуда через регистры 9 и экономайзер 8 уходят в атмосферу. Для запуска компрессора служит паровая турбина 10.

Котел двухколлекторный с естественной циркуляцией. Котел выполнен с необогреваемым опуском воды, осуществляемым по трубе 1 (см. Рис. 4.12.). Вся трубная система подъемная.

Для улучшения циркуляции в некоторых котлах в районе опускных труб устанавливается крыльчатка пропеллерного насоса, приводящаяся в движение паровой турбиной.

Топка котла образованная сплошным экраном 2. Трубная система размещена в канале, образованном листами 3 и 5 из жаропрочной стал, по которому газы движутся от задней стенки к передней и омывают трубки испарительного пучка 8.

Из правого и левого кольцевых газоходов газы поступают в полость 4, откуда отводятся в газовую турбину. Пароперегреватель состоит из двух верхних коллекторов 11 и одного нижнего 6, соединеннвх между собой трубками 7. Он расположен симметрично в левой и правой части газоходов. Обе части пароперегревателя вне прочно-плотного кожуха 10 соединены трубой 12 и имеют общий стопорный клапан 13.

Котел снабжен четырьмя регулируемыми форсунками. Плотно-прочный кожух 10 имеет форму цилиндра, закрытого днищами 9. Ребра на днищах 9 служат для усиления их прочности и установки изоляции котла. Котел снабжен

турбонаддувочным агрегатом, состоящим из газовой турбины, осевого компрессора и паровой турбины, служащей в качестве пускового и добавочного двигателя.

Котел имеет экономайзер. К.П.Д. котла составляет 84 ÷ 87%. Котлы типа «Сюраль» строятся как с естественной так и с принудительной циркуляцией.

4.13. Судовые ядерные энергетические установки (ЯЭУ)

Ядерная энергетическая установка работает на энергии ядерных превращений изотопов урана и тория. Энергия ядерного топлива, освободившаяся в результате цепной ядерной реакции превращается в теплоту в ядерном реакторе. При делении 1 кг изотопа урана 235U выделяется энергия, равная 20 млн кВт · час. Судно с ЯЭУ имеет практически неограниченный район плавания, не требует заходов в порты для пополнения запасов топлива, при работе не использует кислород. Существуют установки одноконтурные, двухконтурные (Рис. 4.13.) и трехконтурные установки. Ядерный реактор может работать на газовую турбину.

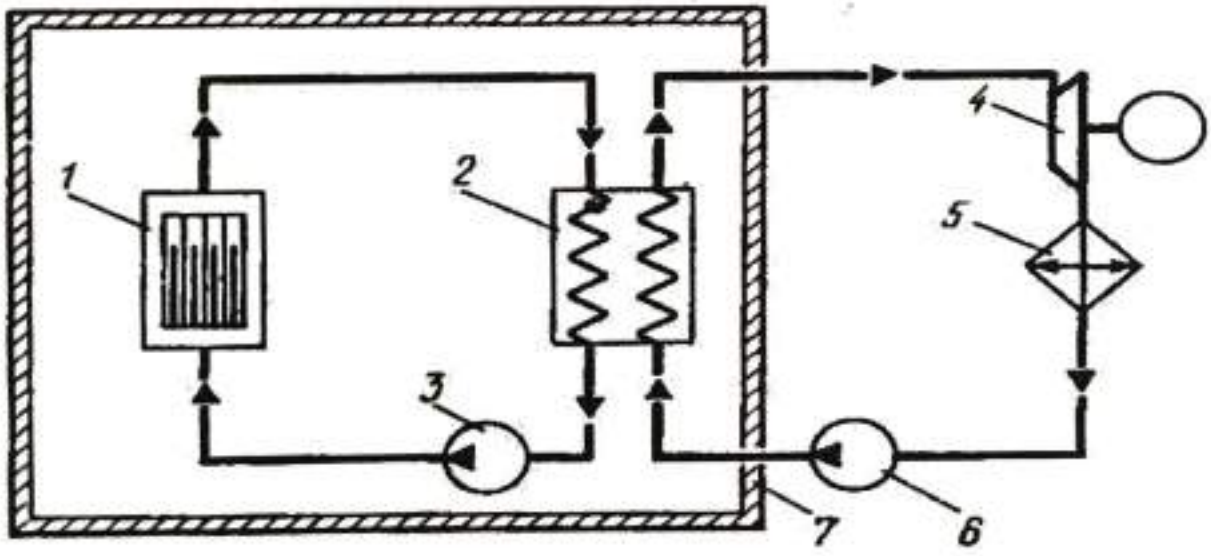


Рис. 4.13. Схема двухконтурной ядерной энергетической установки

Двухконтурные ЯЭУ в основном применяются в ядерной энергетике. Схему такой установки рассмотрим на рис. 4.13. В реакторе 1 происходит деление ядер урана. Теплоноситель, омывающий тепловыделяющие элементы, облучается нейтронами и становится радиоактивным, поэтому направляется не в турбину, а в промежуточный теплообменник – парогенератор 2, где передает свою теплоту рабочему телу (обычная вода и водяной пар) второго контура ПТУ, после чего насосом 3 теплоноситель снова возвращается в реактор. Вся установка первого контура вследствие своей большой радиоактивности отделяется от основной части ЯЭУ специальной биологической защитой 7.

Водяной пар второго контура, образованный в парогенераторе, поступает в турбогенератор 4, вырабатывающий электроэнергию, затем направляется в конденсатор 5, где конденсируется. Затем водяным насосом 6 он опять подается в парогенератор 2.

Необходимость большой автономности плавания по запасам топлива и большая мощность энергетической установки предопределили первоочередное применение ЯЭУ на ледокольных судах.

В 1957 году был заложен атомный ледокол «Ленин», который успешно осуществлял проводки судов в Арктике, прошел 650000 миль и сейчас находится на стоянке в Мурманске. На нем было установлено три водоводяных реактора общей мощностью установки 32000 кВт.

Позднее были построены более совершенные атомные ледоколы «Арктика» с мощностью атомной установки 55000 кВт. В 2007 году введен в эксплуатацию новый атомный ледокол, строительство которого должно было закончиться в 1995 г и ему было присвоено имя «50-тилетие Победы».

В состав ЯЭУ новых ледоколов входят ядерная паропроизводительная установка, турбоэлектрическая установка с двумя главными турбогенераторами и тремя гребными электродвигателями, судовая электростанция, вспомогательная котельная установка, два парогенератора низкого давления, комплекс систем автоматического управления и контроля. Ядерная паропроизводящая установка (Рис. 4.14.) состоит из двух автономных блоков, в каждый из них входит атомный реактор, четыре парогенератора, четыре циркуляционных насоса первого контура, компенсаторы объема и другое оборудование.

Ядерный реактор представляет собой толстостенный сосуд с эллиптическим днищем. Внутри реактора расположена активная зона, состоящая из 241 технологического канала с тепловыделяющими элементами. Парогенератор выполнен в виде вертикальной цилиндрической камеры с эллиптическим днищем, внутри которой размещена трубная система. Система первого контура замкнутая, циркуляционный насос подает теплоноситель по напорным патрубкам в реактор, в активной зоне которого происходит его нагрев, откуда он поступает в парогенераторы, где отдает тепло теплоносителю второго контура, и возвращается к циркуляционному насосу.

Вода в ядерном реакторе в активной зоне совершает один ход. Она нагревается в 241 рабочей кассете, расположенной в узлах треугольной решетки. Рабочая кассета представляет собой пучок тепловыделяющих элементов, заключенных в кожух в виде трубы. Для быстрой остановки реактора предусмотрена система аварийной защиты, состоящая из 16 поглощающих нейтроны стержней, объединенных в четыре самостоятельные группы, которые вводятся в зону по аварийному сигналу.

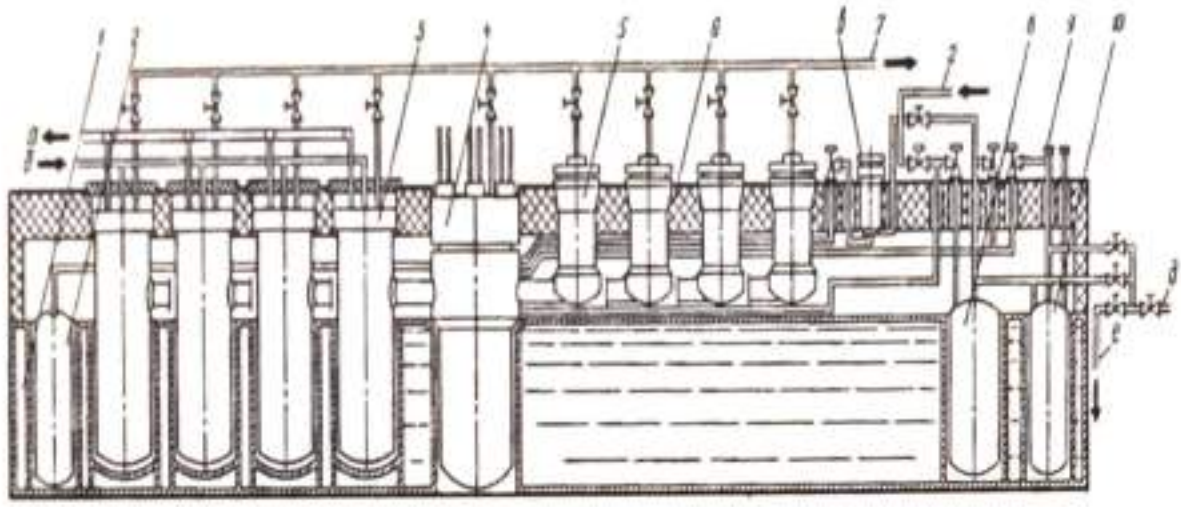


Рис. 4.14. Схема первого контура ЯЭУ ледокола «Арктика»
1 – бак железноводной защиты; 2 – компенсационная емкость; 3 - парогенератор; 4 – реактор; 5 – циркуляционный насос; 6 – биологическая защита; 7 – трубопровод газоотвода; 8 – холодильник фильтра; 9 - штуцера перегрузки фильтра; 9 – штуцера перегрузки фильтра; 10- фильтр; а, б, г, д, е – трубопроводы соответственно перегретого пара, питательной воды, газоотвода, от потпиточного насоса, отбора проб, отвода в дренажную систему; в – циркуляционный насос расхолаживания.

Паротурбинная установка ледокола состоит из двух главных турбогенераторов мощностью по 27,5 кВт и пяти вспомогательных мощностью по 2000 кВт. Турбина вращает три последовательно соединенных с ней по одной оси синхронных генератора переменного тока мощностью по 9000 кВт. Длина агрегата 9,2 м, масса 234 тонн.

Гребная энергетическая установка выполнена на двойном токе по схеме – генератор переменного тока – кремниевый выпрямитель – электродвигатель постоянного тока с тиристорной схемой возбуждения.

Гребные двухякорные двигатели постоянного тока имеют одинаковую мощность по 17600 кВт при частоте вращения 130 об/мин. Они расположены в отдельных отсеках. Ледокол оснащен ЭВМ централизованного контроля, которая автоматически регистрирует наиболее ответственные параметры и выводит их на печать, автоматически регистрирует все параметры с отклонением выше нормы.

Биологическая защита обеспечивает нормальную радиационную обстановку во всех помещениях. Радиационный контроль на ледоколе осуществляется с помощью комплексной автоматической системы, она обеспечивает постоянную информацию об уровнях различного рода излучений в помещениях вблизи реактора, а также контроль радиоактивности теплоносителя

первого контура, которая является показателем состояния активной зоны реактора.

В период эксплуатации ледокола «Арктика» не было ни одного непланового вывода из эксплуатации судна вследствие отказов ядерной парогенерирующей установки или нарушений радиационной обстановки, которые бы создали угрозу здоровью экипажа, что свидетельствует о большой надежности судна.

Глава 5

Конструкция вспомогательных и утилизационных судовых паровых котлов. Котлы систем с органическим теплоносителем

Вспомогательная судовая котельная установка служит для получения пара или горячей воды, используемых различными потребителями. Часть этих потребителей обеспечивает работу главной энергетической установки. Это: подогреватели топлива и масла, обогреватели кингстонов забортной воды и др. Другая часть, включает в себя отопительные приборы, душевые, камбуз, прачечные, хозяйственные и бытовые нужды. Системы обеспечивающие перечисленных потребителей называют общим названием – системы теплоснабжения судна.

Значительный расход пара требуется для подогрева жидкого груза на танкерах и обеспечения технологических нужд на промысловых судах. На крупнотоннажных дизельных танкерах, а также промысловых судах – рыбозаводах и плавбазах производительность парогенераторных установок может достигать достаточно больших значений. На теплоходах и газотурбоходах пар выполняет вспомогательные функции. По этой причине установки, его производящие, называются – вспомогательными.

Парогенераторная установка современного теплохода, газотурбоходах состоит из вспомогательного и утилизационного паровых или водогрейных котлов. Исключение составляют суда небольшой мощности и суда с маневренными режимами работы (портовые буксиры), где устанавливают только один вспомогательный паровой либо водогрейный котел.

Во вспомогательных паровых и водогрейных котлах источником энергии для получения пара служит топливо, сжигаемое в их топках. В утилизационных паровых и водогрейных котлах работающих только на ходу судна, используется теплота выпускных газов главных двигателей. Теплота уходящих газов является основной тепловой потерей в двигателе; поэтому утилизация теплоты может дать экономию топлива в пределах 8– 11 %.

У большинства судов (за исключением танкеров, перевозящих нефтепродукты и требующих значительных расходов теплоты на подогрев груза) количество теплоты, которое можно использовать в утилизационных котлах, значительно превышает судовые потребности. Избыток располагаемой теплоты выпускных газов над ее потреблением на теплоснабжение и другие нужды (кроме подогрева груза) возрастает с увеличением мощности главной энергетической установки. Поэтому на современных крупных морских судах применяют системы глубокой утилизации теплоты, где пар утилизационных котлов используется для теплоснабжения и выработки электрической энергии паровыми турбогенераторами. Опыт эксплуатации морских судов показал, что системы глубокой утилизации тепла позволяют полностью обеспечить

потребность судна в тепловой и электрической энергии на основных ходовых режимах, а при мощности главной энергетической установки более 18,5 тыс. кВт часть избыточной утилизируемой энергии передать на гребной винт для движения судна.

Утилизационная энергетическая установка, состоящая из утилизационного парового котла, турбогенератора, конденсатора и других элементов входящих в состав обычной паротурбинной энергетической установки, может полностью заменить в основных ходовых режимах вспомогательный паровой котел и дизель-генератор. Если расход пара превышает паропроизводительность утилизационного парового котла, то включается вспомогательный котел генерирующий недостающее количество пара.

На судах торгового флота, за исключением крупных пассажирских судов, танкеров и судов, эксплуатируемых в условиях продленной навигации, а также на некоторых морских сухогрузных судах каботажного плавания и небольших промысловых судах в качестве теплоносителя применяется не пар, а горячая вода. Замена пара горячей водой в системах теплоснабжения судов явилась прогрессивным техническим решением, позволившим перейти на компактные и простые по устройству и эксплуатации водогрейные котлы, оборудованные более простой и дешевой системой автоматического регулирования по сравнению с паровыми котлами. Кроме того, для водогрейных котлов не требуется такое высокое качество питательной воды, как для паровых.

5.1. Водотрубные вертикальные вспомогательные паровые котлы с естественной циркуляцией

Водотрубные вертикальные вспомогательные паровые котлы с естественной циркуляцией являются самыми распространенными на морских судах. Некоторые из них выполняются с развитыми поверхностями нагрева, другие имеют только парообразующую поверхность нагрева (Рис. 5.1.).

а) двухконтурный: первый контур образован подъемными трубами 6 экрана, опускными трубами 7, водяным коллектором 5 и пароводяным барабаном 1. У второго контура подъемные 2 и опускные 3 трубы, соединяющие водяной коллектор 4 и пароводяной барабан 1, являются обогреваемыми. Котел оборудован двумя горелками с паромеханическими форсунками.

б) одноконтурный контур циркуляции образованный опускными трубами 2, подъемными трубами 3 экрана и трубами 6 конвективного парообразующего пучка, водяным коллектором 5 и пароводяным барабаном 1. Топочное устройство состоит из двух горелок 4 с паромеханическими форсунками. За конвективным пучком 6 в начале дымохода расположены змеевики 7 подсушки пара, идущего к паромеханическим форсункам.

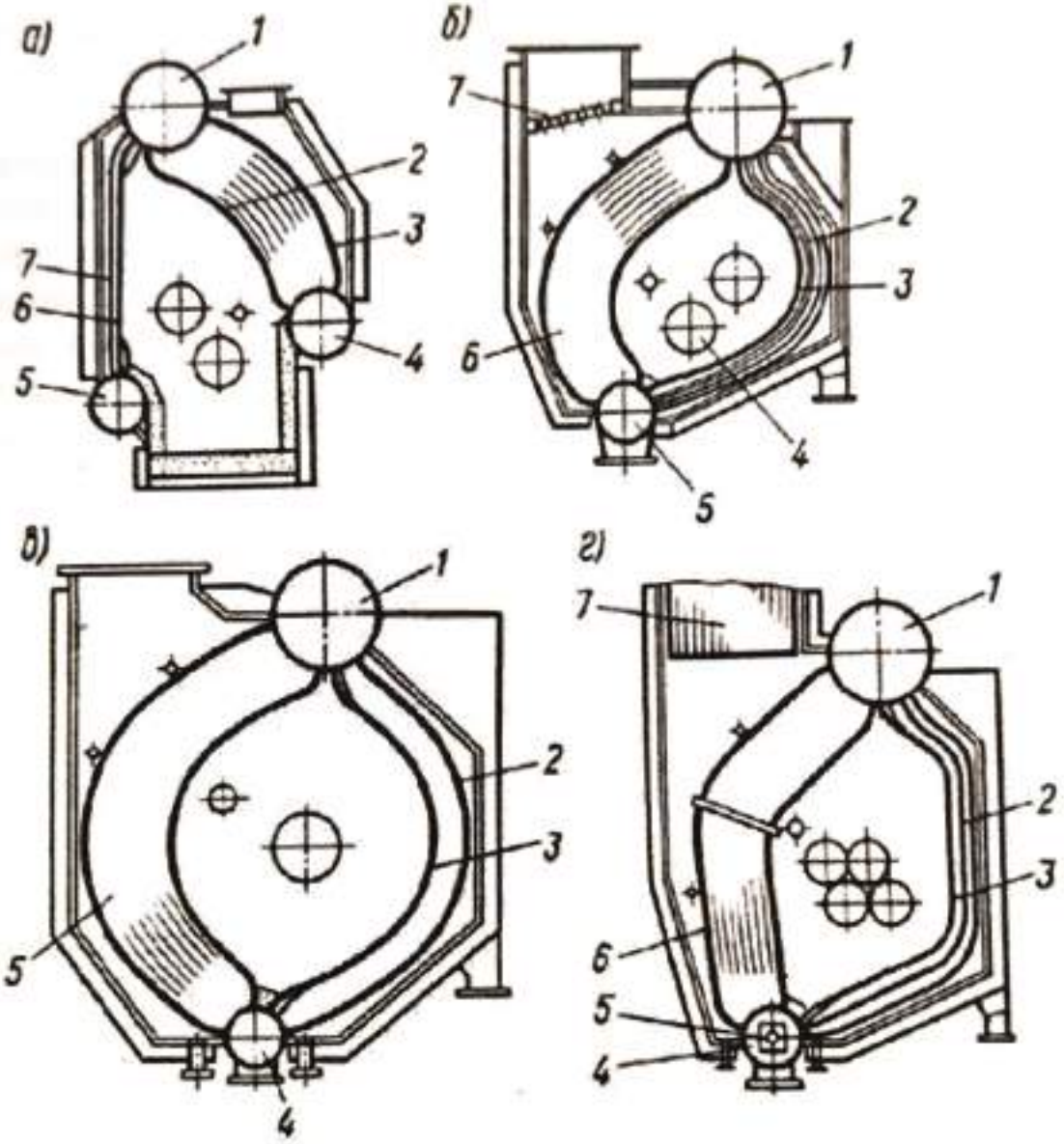


Рис. 5.1. Принципиальные схемы вспомогательных водотрубных котлов

в) двухколлекторный однопроточный котел, имеющий один контур циркуляции: опускные трубы 2, водяной коллектор 4, подъемные трубы 3 и 5, пароводяной барабан 1. В котлах большой паропроизводительности предусматриваются хвостовые поверхности нагрева.

г) одноконтурный контур циркуляции: опускные трубы 2, водяной коллектор 4, подъемные трубы 3 и 6, пароводяной барабан 1. В водяном коллекторе размещен подогреватель 5 для поддержания котла в готовности (на ходу).

На крупных теплоходах и газотурбоходах, а также в качестве вспомогательных на паротурбинных судах устанавливают котлы с пароперегревателем, для обеспечения перегретым паром турбоэлектрогенераторов, грузовых турбонасосов и т.д.

5.2. Водотрубный вертикальный вспомогательный паровой котел с естественной циркуляцией с пароперегревателем

Водотрубный вертикальный паровой котел с пароперегревателем (Рис. 5.2.) состоит из пароводяного коллектора 5, верхняя часть которого заполнена паром – эта часть называется *паровым пространством*. Нижняя часть пароводяного коллектора 5 вместе с водяным коллектором 10 и соединяющими их трубами 7, 8 и 11 заполнена водой – эта часть называется *водяным пространством*.

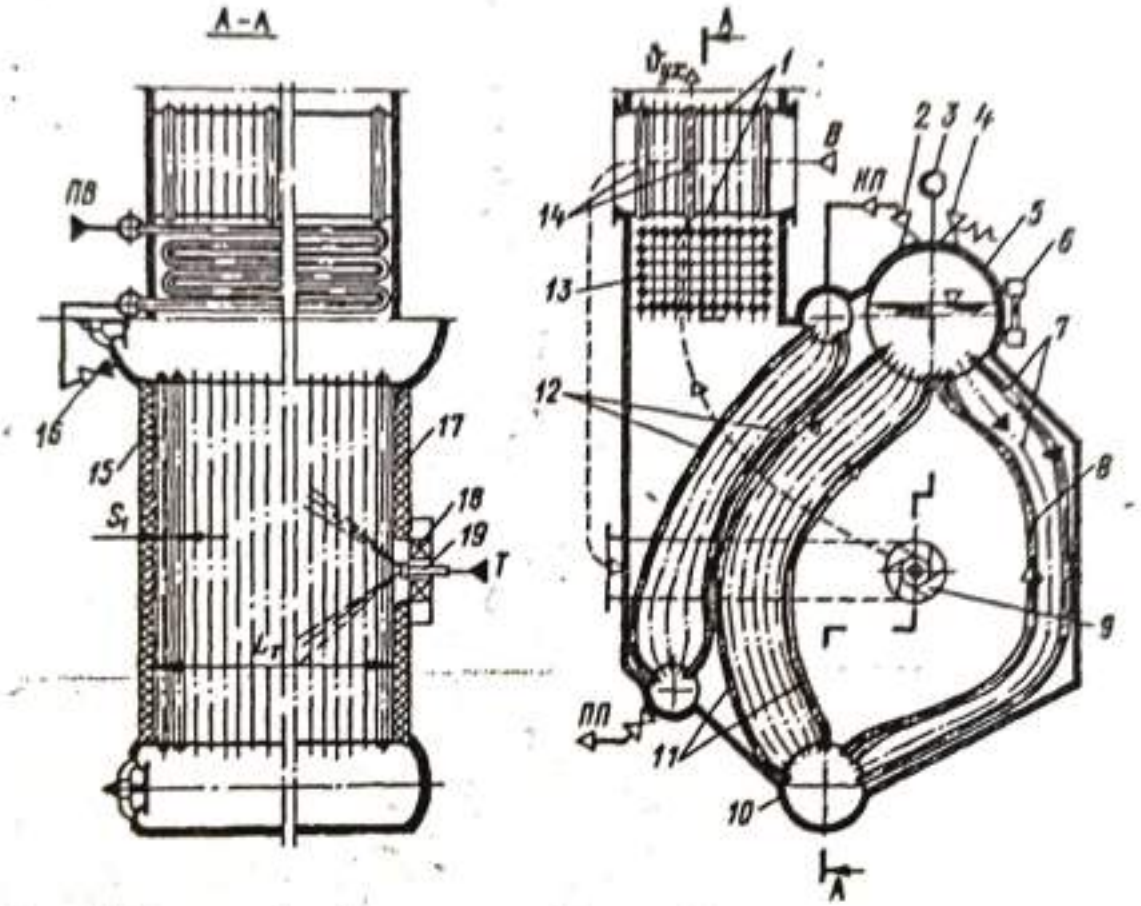


Рис. 5.2. Водотрубный вертикальный паровой котел с пароперегревателем

Водотрубный вертикальный паровой котел с пароперегревателем состоит из пароводяного коллектора 5, верхняя часть которого заполнена паром – эта часть называется паровым пространством. Нижняя часть пароводяного коллектора 5 вместе с водяным коллектором 10 и соединяющими их трубами 7, 8 и 11 заполнена водой – эта часть называется водяным пространством.

Поверхность раздела двух сред- пара и воды называется *зеркалом испарения*, уровень которого обозначается на всех схемах знаком Δ. Трубы 8 обычно расположены вплотную друг к другу и образуют сплошной боковой экранный ряд (или просто экран). Относительный шаг - отношение расстояния между осями двух соседних труб в ряду, называемые шагом s_1 к диаметру трубы d для такого ряда равен единице. Перед вводом в коллектор трубы 8 разводятся

и образуют два ряда с относительным шагом $s_1/d = 2$. Трубы 11 составляют многорядный притопочный парообразующий пучок. Величина шага s_1 в пучке является очень важным параметром, от которого зависит скорость газов, что, в конечном итоге, определяет тепловую напряженность в паровом котле.

Необогреваемые трубы 7, расположенные за сплошным экранным рядом труб 8, называются *опускными*. По ним парогенераторная вода из пароводяного коллектора 5 опускается вниз в водяной коллектор 10 и далее поступает в трубы 8 и 11. Эти трубы обогреваются, и на внутренних стенках труб образуются пузырьки пара, которые вместе с водой поднимаются вверх. Поэтому трубы 8 и 11 называются *подъемными*. Суммарная наружная поверхность всех подъемных труб составляет парообразующую поверхность нагрева водяного парового котла.

При выходе из подъемных труб пузырьки пара проходят через слой воды и зеркало испарения в пароводяном барабане 5 и попадают в его паровое пространство. Неиспарившаяся котловая вода смешивается в барабане 5 с непрерывно поступающей питательной водой (*ПВ*) и снова участвует в естественной циркуляции по описанной схеме.

Пространство, ограниченное передней 17 и задней 15 стенками, экранными трубами 8 и поверхностью, проходящей через оси труб первого ряда притопочного пучка, называется *топкой*. Длина топки определяется размером $L_{\text{Т}}$. Такую же длину имеют все газоходы парового котла, где располагаются конвективные поверхности нагрева.

Топочное устройство 9, расположенное на передней стенке, состоит из форсунки 19, куда поступает топливо (*Т*) и воздухонаправляющего аппарата 18, через который в топку проходит необходимый для сгорания топлива воздух. В топке сгорает топливо, и образуются продукты сгорания, имеющие высокую температуру, которые, двигаясь по газоходам котла, последовательно обогревают все поверхности нагрева и на выходе из котла имеют температуру $t_{\text{ух}}^0$ °С.

За притопочным парообразующим пучком располагается пароперегреватель. Насыщенный пар (*НП*) из пароводяного коллектора 5 поступает во входной коллектор пароперегревателя и, проходя по трубам 12, перегревается. Из выходного коллектора перегретый пар (*ПП*) направляется к потребителям.

За пароперегревателем располагаются так называемые хвостовые поверхности нагрева: экономайзер и воздухоподогреватель. Питательная вода в количестве, равном суммарному количеству отбираемого потребителями пара, подается питательным насосом во входной коллектор экономайзера. Из него вода поступает параллельно включенные трубы 13, где подогревается, но не доводится до кипения. Из выходного коллектора экономайзера вода через питательный клапан 16 направляется в пароводяной барабан.

5.2. Водотрубный вертикальный вспомогательный паровой котел с естественной циркуляцией с пароперегревателем

Водотрубный вертикальный паровой котел с пароперегревателем (Рис. 5.2.) состоит из пароводяного коллектора 5, верхняя часть которого заполнена паром – эта часть называется *паровым пространством*. Нижняя часть пароводяного коллектора 5 вместе с водяным коллектором 10 и соединяющими их трубами 7, 8 и 11 заполнена водой – эта часть называется *водяным пространством*.

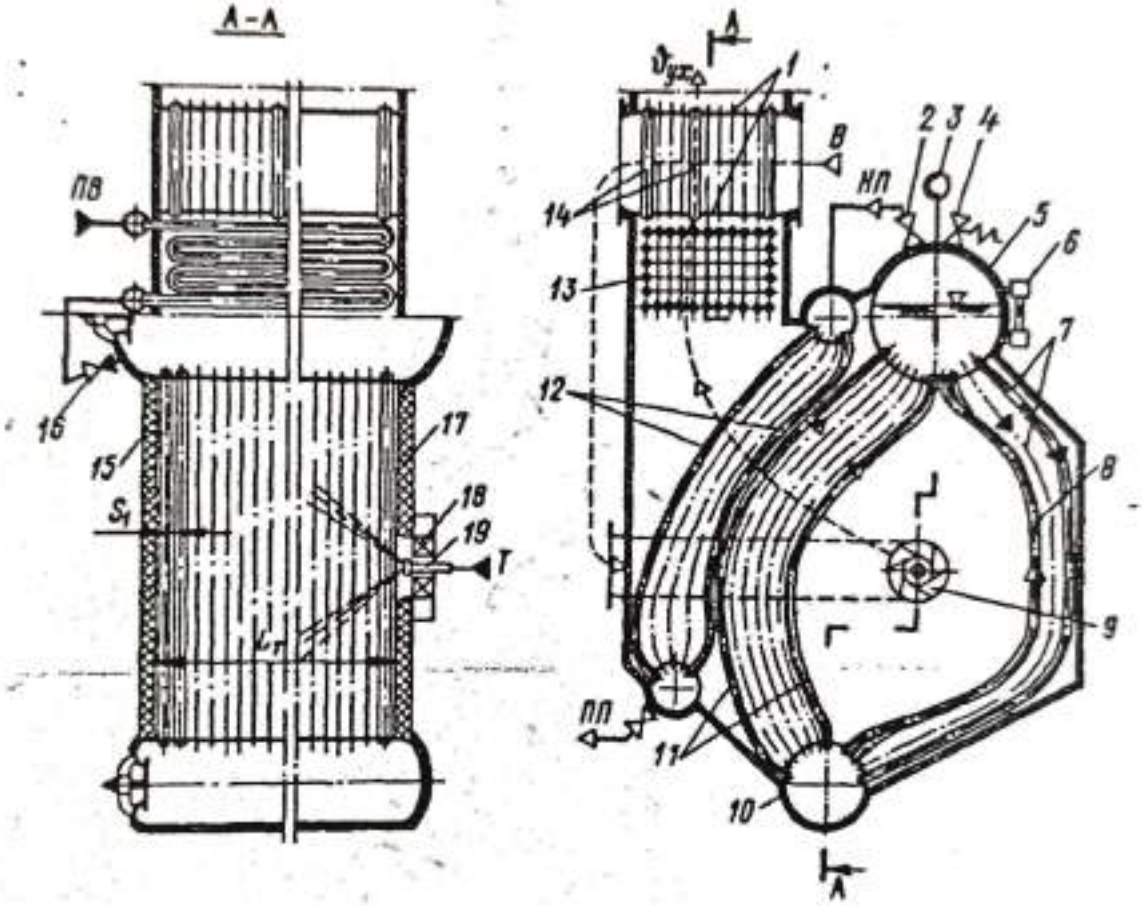


Рис. 5.2. Водотрубный вертикальный паровой котел с пароперегревателем

Водотрубный вертикальный паровой котел с пароперегревателем состоит из пароводяного коллектора 5, верхняя часть которого заполнена паром – эта часть называется паровым пространством. Нижняя часть пароводяного коллектора 5 вместе с водяным коллектором 10 и соединяющими их трубами 7, 8 и 11 заполнена водой – эта часть называется водяным пространством.

Поверхность раздела двух сред- пара и воды называется *зеркалом испарения*, уровень которого обозначается на всех схемах знаком *Δ*. Трубы 8 обычно расположены вплотную друг к другу и образуют сплошной боковой экранный ряд (или просто экран). Относительный шаг - отношение расстояния между осями двух соседних труб в ряду, называемые шагом s_1 к диаметру трубы d для такого ряда равен единице. Перед вводом в коллектор трубы 8 разводятся

и образуют два ряда с относительным шагом $s_1/d = 2$. Трубы 11 составляют многорядный притопочный парообразующий пучок. Величина шага s_1 в пучке является очень важным параметром, от которого зависит скорость газов, что, в конечном итоге, определяет тепловую напряженность в паровом котле.

Необогреваемые трубы 7, расположенные за сплошным экранным рядом труб 8, называются *опускными*. По ним парогенераторная вода из пароводяного коллектора 5 опускается вниз в водяной коллектор 10 и далее поступает в трубы 8 и 11. Эти трубы обогреваются, и на внутренних стенках труб образуются пузырьки пара, которые вместе с водой поднимаются вверх. Поэтому трубы 8 и 11 называются *подъемными*. Суммарная наружная поверхность всех подъемных труб составляет парообразующую поверхность нагрева водяного парового котла.

При выходе из подъемных труб пузырьки пара проходят через слой воды и зеркало испарения в пароводяном барабане 5 и попадают в его паровое пространство. Неиспарившаяся котловая вода смешивается в барабане 5 с непрерывно поступающей питательной водой (*ПВ*) и снова участвует в естественной циркуляции по описанной схеме.

Пространство, ограниченное передней 17 и задней 15 стенками, экранными трубами 8 и поверхностью, проходящей через оси труб первого ряда притопочного пучка, называется *топкой*. Длина топки определяется размером $L_т$. Такую же длину имеют все газоходы парового котла, где располагаются конвективные поверхности нагрева.

Топочное устройство 9, расположенное на передней стенке, состоит из форсунки 19, куда поступает топливо (*Т*) и воздухонаправляющего аппарата 18, через который в топку проходит необходимый для сгорания топлива воздух. В топке сгорает топливо, и образуются продукты сгорания, имеющие высокую температуру, которые, двигаясь по газоходам котла, последовательно обогревают все поверхности нагрева и на выходе из котла имеют температуру $t_{ух}^0$ °С.

За притопочным парообразующим пучком располагается пароперегреватель. Насыщенный пар (*НП*) из пароводяного коллектора 5 поступает во входной коллектор пароперегревателя и, проходя по трубам 12, перегревается. Из выходного коллектора перегретый пар (*ПП*) направляется к потребителям.

За пароперегревателем располагаются так называемые хвостовые поверхности нагрева: экономайзер и воздухоподогреватель. Питательная вода в количестве, равном суммарному количеству отбираемого потребителями пара, подается питательным насосом во входной коллектор экономайзера. Из него вода поступает параллельно включенные трубы 13, где подогревается, но не доводится до кипения. Из выходного коллектора экономайзера вода через питательный клапан 16 направляется в пароводяной барабан.

Последним по ходу газов является воздухоподогреватель, который состоит из труб 14, закрепленных в нижней и верхней трубных досках 1. Газы проходят внутри труб. Снаружи трубы омываются воздухом (*B*), подаваемым вентилятором. Нагретый воздух поступает к топочному устройству.

Все стенки котла представляют собой прочный металлический каркас, к которому крепятся коллекторы, листы обшивки, покрытые теплоизоляционными материалами (на схеме заштрихованы). Обычно делают двойные стенки. Пространство между ними заполнено воздухом, подаваемым в воздухонаправляющий аппарат и далее в топку. Передняя и задняя стенки топки и газоходов в районе парообразующего пучка и пароперегревателя с внутренней стороны выкладываются огнеупорным кирпичом. Такая кладка называется футеровкой. Уровень воды и давление пара в пароводяном барабане контролируют с помощью водоуказательного прибора 6 и манометра 3. Для защиты парового котла от повышения давления выше допустимого служит предохранительный клапан 4.

На котле устанавливают различную запорную арматуру: клапаны 5 для отключения пароперегревателя и разобщения парового котла с потребителями, клапаны для продувки и др.

Развитие хвостовых поверхностей нагрева связано с усложнением конструкции, увеличением габаритов, массы и стоимости котла, а также с увеличением аэродинамического сопротивления движению воздуха и газов и расхода энергии на его преодоление. Поэтому вспомогательные котлы, предназначенные для теплоснабжения судна, обогрева жидкого груза и работы паровых насосов, выполняют без хвостовых поверхностей и пароперегревателя; они имеют только парообразующую поверхность. Главное преимущество их заключается в простоте конструкции, компактности и более высокой надежности в работе (повышенный расход топлива, который имеет место при более низких значениях к.п.д., не имеет существенного значения в тепловом балансе всей энергетической установки).

5.3. Вспомогательный водотрубный котел марки ESH

Наиболее распространенные на судах транспортного флота являются котлы типа «Вагнер» и современные их модификации типов SHK, ESHK, EHS германской постройки.

В котле ESH (Рис. 5.3.) дымовые газы движутся вдоль топки к задней стенке, в конце которой через разведенные трубы экранной стенки в топке проходят в конвективный пучок, поворачивают на 180° и движутся к фронту, где поворачивают на 90° и входят в газоход воздухоподогревателя 20, рядом с которым установлен котельный вентилятор 19

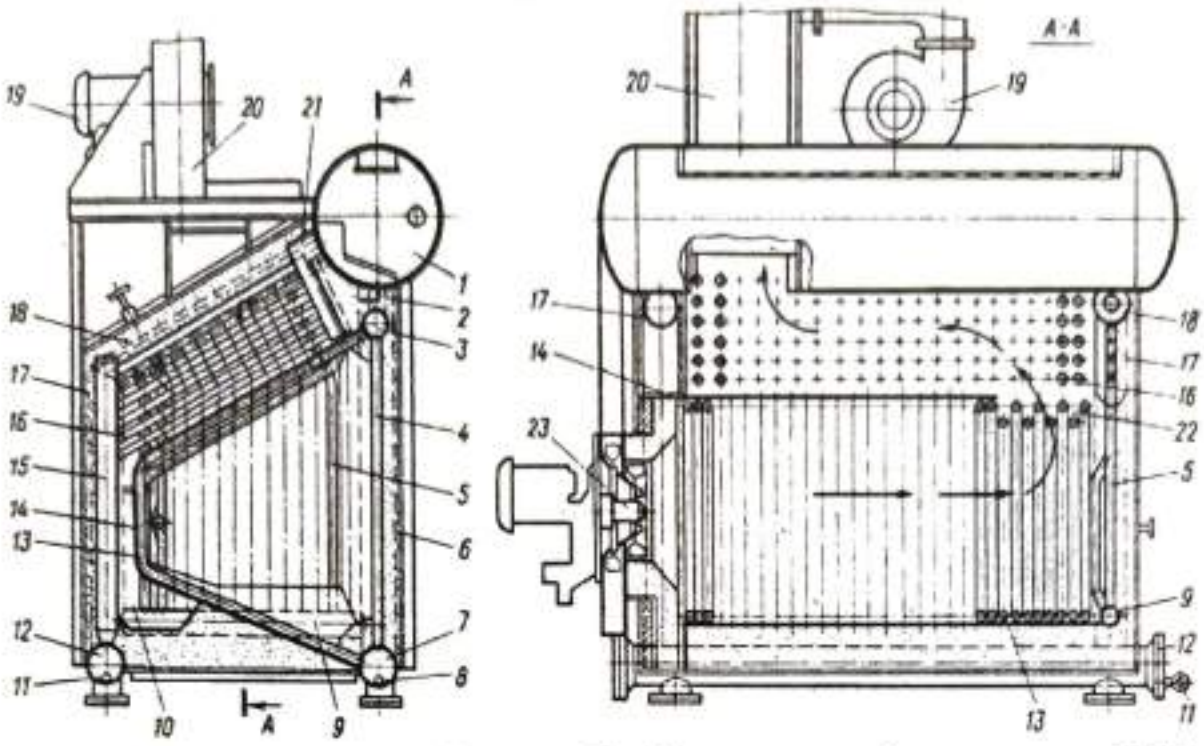


Рис. 5.3. Вспомогательный водотрубный котел типа «Вагнер» марки ESH

Главной конструктивной особенностью котлов типа ESH является нестандартная компоновка корпуса, состоящего из контуров циркуляции. Первый (экранный) контур циркуляции образован подъемными трубами бокового экрана 4, экранной стенки 13 и заднего экрана 5 и двумя опускными трубами 6 большого диаметра, расположенными за пределами газохода (по одной с фронта и у задней стенки) и соединяющими водяной экранный коллектор 8 малого диаметра с барабаном 1 котла. Характерной особенностью экранного контура циркуляции является наличие промежуточного пароводяного коллектора 3 малого диаметра, где собирается пароводяная смесь из труб экранов 4, 13 и отводится по трем патрубкам 2 в барабан 1. В экранный контур циркуляции включен задний экран 5, водяным коллектором 9 для которого служит глухой отросток опускной трубы 6, вваренный в нее под углом 90°. Пароводяная смесь из труб заднего экрана 5 собирается в кольцевом пространстве 18 верхней наклонной части задней опускной трубы 17 конвективного контура циркуляции и отводится в барабан. Второй (конвективный) контур циркуляции образован двумя (по одной с фронта и задней стенки котла) опускными трубами 17 большого диаметра и слабообогреваемыми стояками 15 (вваренными в водяной коллектор 12), каждый из которых обеспечивает подвод воды к шести наклонным (под углом 300 к горизонту) парообразующим трубам 16 неодинаковой длины. Пароводяная смесь из этих труб отводится в промежуточные Г-образные коллекторы 21, соединенные с барабаном 1.

Подобная компоновка обеспечивает высокую жесткость котла ESH благодаря установке четырех опускных труб 6 и 17 большого диаметра, соединенными водяными коллекторами 7 и 12 и поперечным коллектором (глухим отростком 9) заднего экрана. Кроме того, увеличился объем топки и возросла степень ее экранирования. В то же время эти котлы стали весьма чувствительными к нарушениям циркуляции, что обусловлено более высокими гидравлическими сопротивлениями подъемных труб обоих контуров из-за наличия промежуточных пароводяных коллекторов 3 и 21, а также вследствие неравномерности тепловосприятия параллельно включенных труб 5 и 16 неодинаковой длины. Каждый контур циркуляции имеет независимые клапаны нижнего продувания 8 и 11, расположенные в задних торцах продольных водяных коллекторов 7 и 12.

Особенностью компоновки этих котлов является наличие стального щита 14 с вырезом в районе разводки 22 труб экранной стенки 13. Это сделано с целью обеспечить большую плотность экранной стенки. Зола и сажа могут скапливаться в зольнике 10, для очистки которого в обшивке фронта предусмотрен лаз. Котлы оборудованы горелками с механическими форсунками 23 ротационного типа.

5.4. Водотрубный горизонтальный вспомогательный паровой котел с естественной циркуляцией

Ранее паровые котлы этого типа широко применялись в качестве главных на паровых судах (Рис. 5.3.).

К пароводяному коллектору 1 трубами 2 присоединяются волнистые передние камеры 3, из которых выходят прямые парообразующие трубы 4, входящие противоположными концами в аналогичные задние камеры 5. Образующийся в трубах пар отводится в коллектор по перепускным трубам 6. Направление циркуляции указывается стрелками. Парообразующие трубы располагаются под углом $150 \div 250°$ к горизонтали.

Котел состоит из нескольких секций, каждая из которых имеет переднюю и заднюю камеры, соединяющие их парообразующие трубы и перепускную трубу. Рассматриваемый тип паровых котлов называют также секционным.

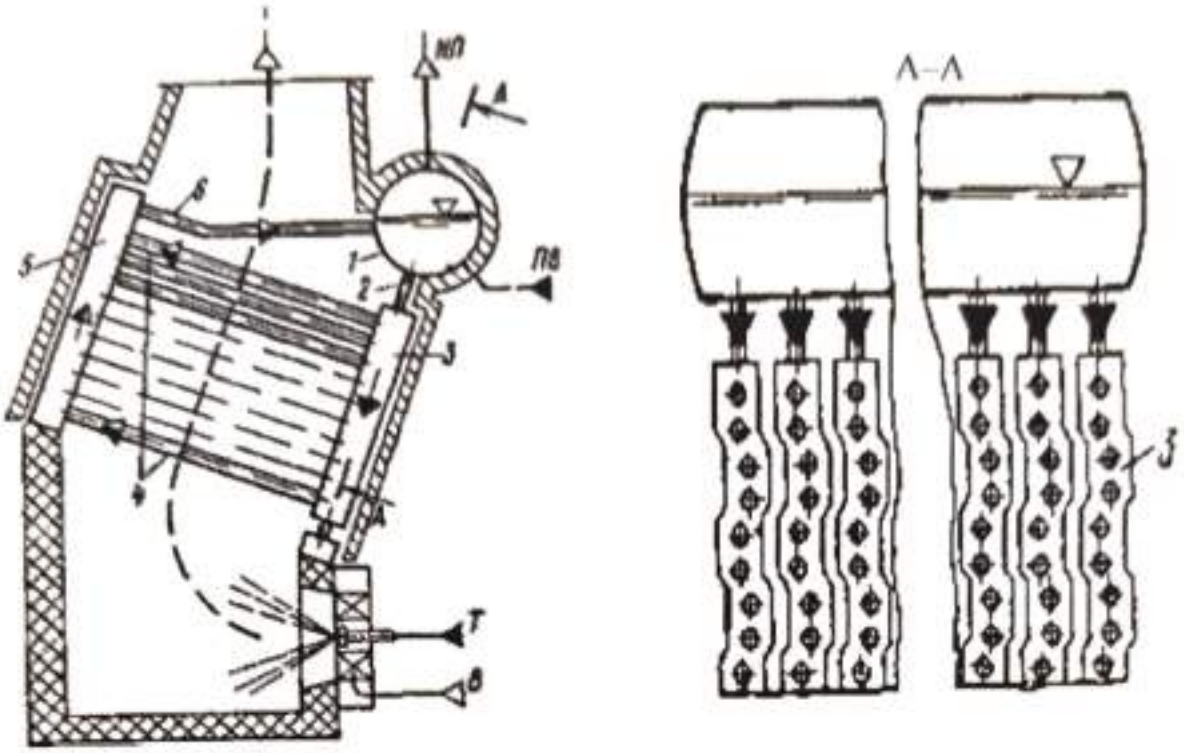


Рис. 5.4. Водотрубный горизонтальный вспомогательный паровой котел с естественной циркуляцией

По тепловой нагрузке парообразующей поверхности нагрева и массогабаритным показателям водотрубные горизонтальные паровые котлы уступают вертикальным, так как из-за малого наклона труб циркуляция воды менее интенсивна, а волнистые камеры с плоскими стенками громоздки и тяжелы. Преимущества горизонтальных котлов заключаются в том, что они собираются из одинаковых по конструкции секций и поэтому выгодны для крупносерийного производства. Применение прямых труб, которые легко чистить от накипи, а при необходимости и заменять, делает этот тип котлов удобным в эксплуатации и неприхотливым к качеству питательной воды.

5.5. Вспомогательные водотрубные паровые котлы с многократной принудительной циркуляцией

С помощью циркуляционного насоса 8 на рис. 5.5. вода из пароводяного барабана 1 подается в коллектор 6 и далее поступает в трубы 7, которые покрывают нижнюю и заднюю стенки топки в виде сплошного экрана, а в выходном сечении топки образуют разреженный пучок для прохода газов. Трубы этого пучка входят в коллектор 5.

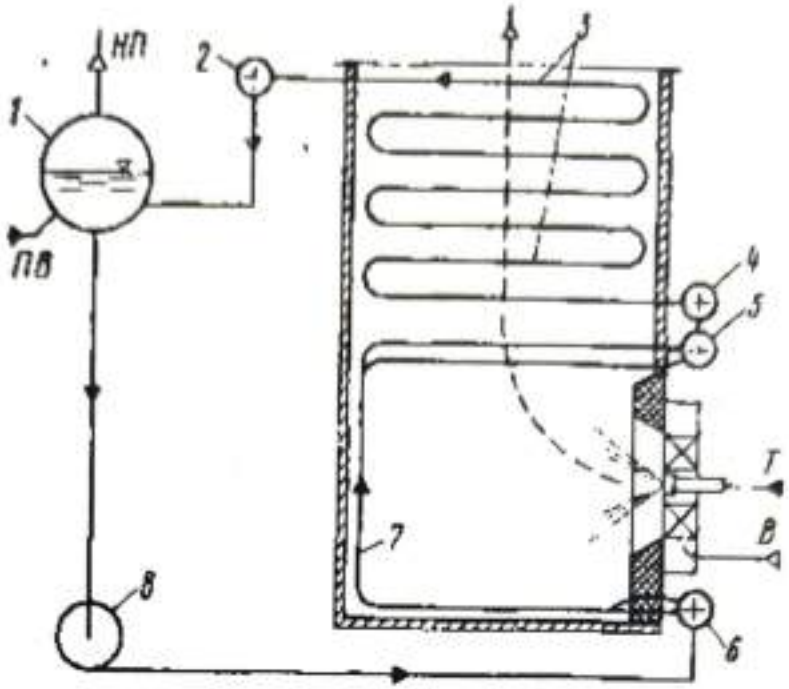


Рис. 5.5. Вспомогательные водотрубные паровые котлы с многократной принудительной циркуляцией

Следующим по ходу газов поверхностями нагрева являются трубы парообразующего пучка 3 (с раздающим 4 и собирающим 2 коллекторами), из которого выходит пароводяная смесь с массовым паросодержанием $x = 0{,}10 \div 0{,}20$. В пароводяном коллекторе происходит отделение пара от воды, которая, смешиваясь с поступающей питательной водой, вновь забирается насосом 8 и совершает движение по описанному выше пароводяному тракту. Для полного испарения единицы массы циркулирующей воды ей потребуется совершить $1/x$ оборотов по циркуляционному контуру, состоящему из последовательно расположенных элементов 1 – 3 – 1. Это число называется кратностью циркуляции K (для котлов такого типа $K = 10 - 5$). Основные преимущества рассматриваемого типа, обусловленные самим принципом принудительной циркуляции, следующие:

- применение труб малого диаметра и с меньшей толщиной стенки; компоновка поверхностей нагрева в любом направлении при учете условий размещения котла на судне;

- полное экранирование стенок топок без конструктивных затруднений; наиболее эффективное использование объема, занимаемого котлом, для размещения поверхностей нагрева;

- высокие скорости движения газов при обеспечении высокой надежности работы труб.

Все это позволяет сделать котлы с многократной принудительной циркуляцией более компактными и легкими, чем с естественной циркуляцией. Надежность эксплуатации котлов с многократной принудительной циркуляцией зависит от циркуляционного насоса, который работает в тяжелых условиях (он

прокачивает воду в состоянии близком к насыщению). Поэтому наличие этого насоса нередко рассматривается как наиболее вероятный источник всякого рода неполадок и аварий. Однако опыт эксплуатации подобных насосов не подтвердил этих опасений: при правильном подходе к выбору конструкции можно создать насосы, обладающие высокой эксплуатационной надежностью.

Применение насоса для работы этих котлов требует дополнительных капитальных и эксплуатационных затрат, что, безусловно, является недостатком для котлов такого типа.

5.6. Газотрубные (огнетрубные) вспомогательные паровые котлы

Вспомогательные газотрубные котлы устанавливаются на теплоходах, где расход пара на вспомогательные нужды не превышает тонны в час. Не смотря на то, что у газотрубных котлов самые низкие показатели безопасности (в частности, самая высокая вероятность тяжелых аварий), они продолжают успешно эксплуатироваться на судах и по отзывам судовых механиков являются самыми простыми и удобными в обслуживании и обладают высокой надежностью при соблюдении правил технической эксплуатации. Обычно применяют вертикальные и горизонтальные огнетрубные котлы. Горизонтальные огнетрубные оборотные котлы эксплуатирующийся на судах, как правило, шотландской, польской и финской постройки.

Газотрубный вспомогательный паровой котел (ВПК) представленный на рис. 5.6. состоит из цилиндрической обечайки 1, переднего 2 и заднего 7 днищ, жаровой трубы 4, дымогарных труб 8, 9, газовых камер 5, 3 и дымника 6. Соединение всех этих узлов (кроме труб) в единую жесткую конструкцию выполняется с помощью сварки. Образующиеся в жаровой трубе газы делают поворот на 180° в газовой камере 5, проходят внутри труб 9, в газовой камере 3 снова поворачивают на 180° и по дымогарным трубам 8 направляются в дымник, откуда через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу. Жаровая труба и дымогарные трубы составляют парообразующую поверхность нагрева. Пузырьки пара образуются на наружной поверхности этих элементов.

Газотрубные ВПК характеризуются неупорядоченной естественной циркуляцией, так как в них не выделены подъемные и опускные элементы циркуляционного контура.

Все элементы газотрубных котлов (обечайка, дымогарные трубы, жаровые трубы и др.) в процессе работы нагреваются до различных температур и, если не обеспечить компенсацию температурных деформаций, то в указанных элементах могут возникнуть термические напряжения. Особенно опасны термические напряжения для жаровых труб, подверженных высоким тепловым нагрузкам. Для снижения термических напряжений длинные жаровые трубы делают либо

волнистыми, либо применяют компенсаторы. При небольшой длине (менее 1500 мм) жаровые трубы делают гладкими.

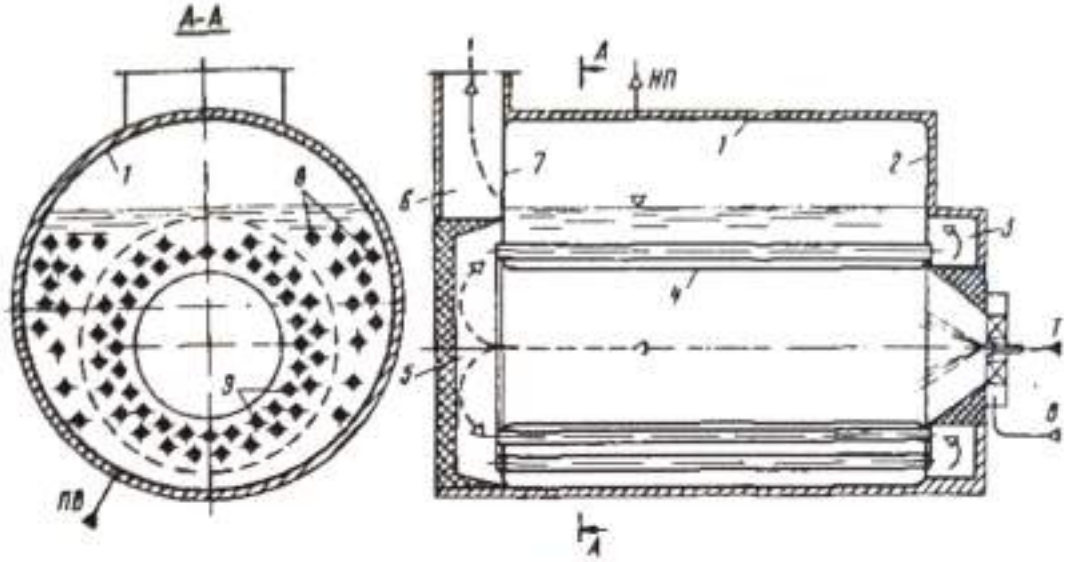


Рис. 5.6. Принципиальная схема вспомогательного горизонтального оборотного огнетрубного парового котла

Элементы ВПК, находящиеся под давлением, имеют значительную толщину стенок. Это обусловлено большими размерами диаметра обечайки и плоской конструкцией днищ. Поэтому все газотрубные котлы при $D > 1$ кг/сек. по массовым показателям уступают водотрубным. Эта разница возрастает с увеличением паропроизводительности. Поэтому газотрубные вспомогательные паровые котлы строятся с расчетом на невысокую паропроизводительность.

Сравнительно простые по конструкции и обслуживанию газотрубные вспомогательные паровые котлы показали высокую эксплуатационную надежность. Распространено мнение, что одним из основных их преимуществ является то, что для них не требуется высокое качество питательной воды. Однако, в результате многолетнего эксплуатационного опыта выявлено, что основные аварийные повреждения (главным образом, жаровых труб) возникали именно из-за низкого качества питательной воды. Учитывая это, а также и то, что очистка от накипи дымогарных и жаровых труб в котлах малой производительности сложна из-за трудного доступа к ним, в настоящее время повышены требования к качеству питательной воды, которые оказались очень близкими к требованиям для водотрубных вспомогательных паровых котлов такого же давления.

5.7. Принципиальные схемы устройства вспомогательных вертикальных газотрубного и газоводотрубного котлов

У котлов этого типа цилиндрическая обечайка корпуса имеет вертикальное расположение. Газотрубный вспомогательный котел типа «Кохран» (Рис. 5.7.)

(по названию шотландской фирмы-разработчика) имеет конструкцию где огневая камера 2 вынесена за прочный корпус и соединяется со сферическим потолком топки 5 патрубком 4. Протяженность дымогарных труб 3 определяется диаметром обечайки 1.

Сферическая форма потолка топки предпочтительнее плоской, так как она более устойчива и в меньшей степени испытывает температурные напряжения из-за возможности свободного расширения при нагревании. Кроме того, на такой поверхности не задерживается выпадающий из воды шлам, что уменьшает вероятность ее перегрева.

Газоводотрубный вертикальный вспомогательный паровой котел типа YX (Рис. 5.8.) устроен так, что водотрубная парообразующая поверхность нагрева представлена вертикальными прямыми трубами 7, закрепленными в трубных досках 5 и 8, которые служат плоскими днищами верхней 3 и нижней 1 частей корпуса. Огневая камера 2 образована свободным от труб пространством между трубными досками, закрытыми сверху подкрепленным листом 4 и соединяется с топкой патрубком 9. Трубы 7 омываются снаружи поперечным газовым потоком. Трубные доски 5 и 8, патрубок 9, потолочная стенка топки 6 составляют огнетрубную парообразующую поверхность.

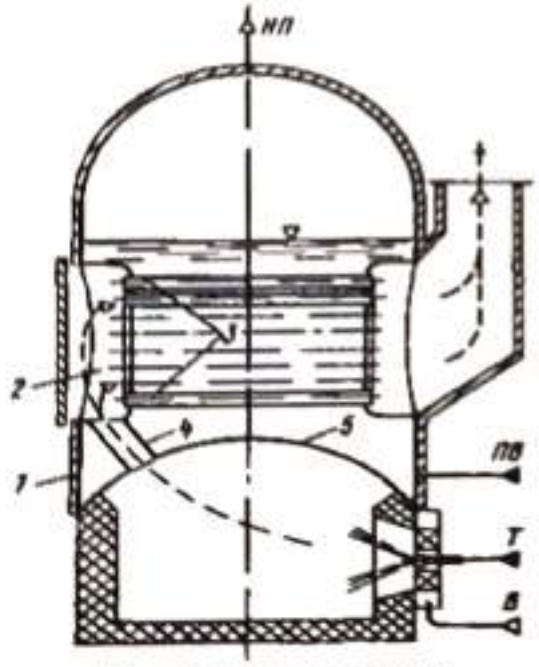


Рис. 5.7. Газотрубный вспомогательный котел типа «Кохран»

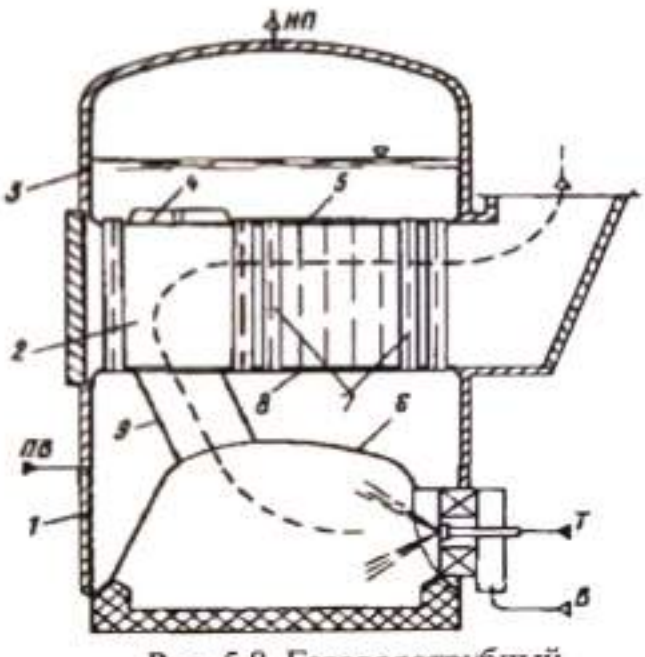


Рис. 5.8. Газоводотрубный вспомогательный котел типа YX

Водогрейные судовые котлы, как правило, газотрубные и имеют невысокую мощность (до 230 кВт).

5.8. Судовые водогрейные котлы

Судовые водогрейные котлы (Рис. 5.9.), работающие по представленной схеме получили довольно широкое распространение. Котел состоит из обечайки

11, переднего 2 и заднего 8 плоских днищ, дымогарных труб 10 и 12, жаровой трубы 4, приемного коллектора 1 и полой крышки 6, соединенной с междутрубным водяным пространством перепускной трубой 5. Образующиеся от сгорания топлива газы движутся по жаровой трубе 4, омывают крышку 6, совершают поворот на 180° в газовой камере 7 и по дымогарным трубам 12 направляются в газовую камеру 3, откуда через трубы 10 поступают в дымник 9 и далее в дымовую трубу.

Охлажденная вода (на рис. ОВ) из системы снабжения забирается специальным насосом и подается в приемный патрубок, откуда попадает в междутрубное пространство и далее по трубе 5 поступает во внутреннюю полость крышки 6. При температуре 75–95°С горячая вода (на рис. ГВ) вновь возвращается к потребителям.

К.П.Д. таких водогрейных котлов находится на уровне 85 %. Чтобы вода не кипела, она находится под давлением не менее 0,10 МПа.

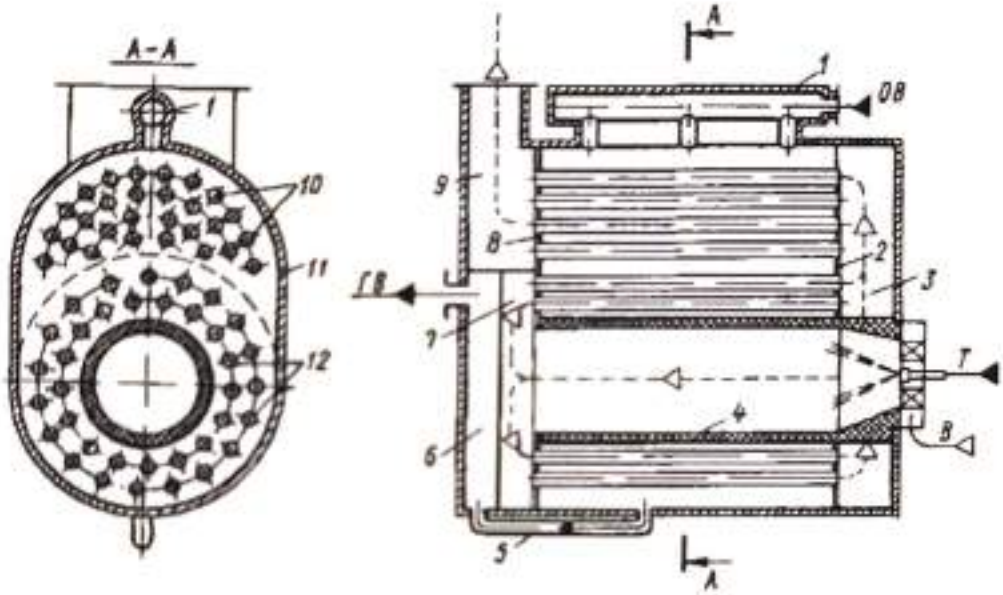


Рис. 5.9. Судовые водогрейные котлы

5.9. Основные характеристики утилизационных паровых и водогрейных котлов. Их устройство и принцип действия

В утилизационных паровых и водогрейных котлов (УПК и УВК) получение пара и подогрев воды осуществляются за счет теплоты газов, поступающих от главных двигателей. Поэтому их главная особенность – отсутствие топки. Рассматриваемые УПК и УВК классифицируют по тем же признакам, что и вспомогательные. Для их оценки используют характеристики, приведенные для вспомогательных парогенераторов и водогрейных котлов, за исключением расхода топлива. Так как в УПК и УВК топливо не сжигается, их к.п.д. следует рассматривать как показатель, характеризующий степень использования теплоты выпускных газов.

Производительность УПК (УВК) определяется количеством выпускных газов в двигателе и их температурой. Следовательно, она зависит от мощности двигателя и его других теплотехнических характеристик. Поэтому при оценке УПК (УВК) дополнительно пользуются удельными характеристиками:
для УПК:

$$d = D/N_{eH}, (\text{кг}/\text{кВт} \cdot \text{сек});$$

для УВК:

$$q = N_К/N_{eH},$$

где N_{eH} – эффективная номинальная мощность главного двигателя, которой соответствует паропроизводительность парового котла D, или мощность водогрейного котла $N_К$.

Параметры пара, паропроизводительность и компоновка поверхностей нагрева УПК определяются их назначением. УПК, предназначенные для теплоснабжения, имеют только парообразующую поверхность нагрева и давление пара $0{,}5 - 0{,}7$ МПа. УПК, используемые в схемах с глубокой утилизацией и предназначенные для электро- и теплоснабжения, имеют пароперегревательную, парообразующую и экономайзерную поверхности нагрева, расположенные в такой же последовательности по ходу газов.

Выбор оптимальных параметров пара в таких УПК – непростая задача, особенно если парогенератор установлен за газовой турбиной. Правильное решение задачи может быть выполнено на основе технико-экономического сопоставления многих вариантов параметров пара с учетом всех элементов установки: главной и утилизационной турбин, парового котла и конденсатора. Паропроизводительность и параметры рассматриваемых утилизационных ПК, устанавливаемых на современных судах, характеризуются следующими значениями:

$$D = 0{,}8\text{–}0{,}9 \text{ кг/сек}; \; p = 0{,}7 - 1{,}2 \text{ МПа}; \; t_{\text{пп}} = 260 - 310°\text{C}.$$

Температура газов, а, следовательно, и средний температурный набор в УПК и УВК намного меньше, чем в ВПК, поэтому утилизационные поверхности нагрева получаются более громоздкими. Так, например, парообразующая поверхность ВПК при $D = 10{,}000$ кг/час составляет 174 м^2, а в УПК такой же паропроизводительности эта поверхность вместе с экономайзерной в 5,8 раза больше.

5.10. Устройство и принципы действия УПК и УВК

Водотрубный вертикальный утилизационный паровой котел с естественной циркуляцией на рис. 5.10.

Примечание: на приведенной схеме и далее газовый поток обозначен пунктирными линиями.

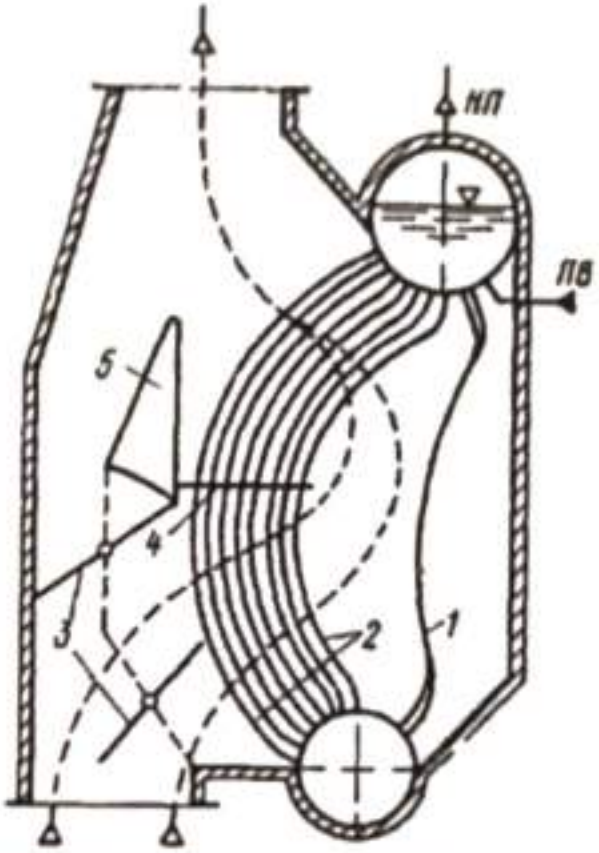


Рис. 5.10. Водотрубный вертикальный утилизационный паровой котел

Парообразующая поверхность УПК состоит из сплошного ряда труб 1 и пучка 2, присоединенных к нижнему водяному и верхнему пароводяному коллекторам. Трубы 1, обогреваемые со значительно меньшей интенсивностью, чем трубы пучка 2, являются опускными. Трубы пучка работают как подъемные. Для улучшения омывания труб пучка 2 газами и, следовательно, повышения эффективности его работы в пучке установлена перегородка 4.

В УПК предусмотрен обвод газов мимо поверхности нагрева, осуществляемый при помощи заслонок (шиберов) 3 и газонаправляющего щита 5. Благодаря этому можно регулировать паропроизводительность УПК. При установке заслонок в положение, показанное штриховыми линиями, весь газовый поток пройдет по обводному каналу.

Водотрубные утилизационные паровые котлы с многократной принудительной циркуляцией получили широкое распространение на судах.

Такие УПК имеют невысокую паропроизводительность (0,05 – 0,6 кг/сек) и предназначены в основном для теплоснабжения.

На рис. 5.11. между цилиндрическим кожухом 1 и центральной трубой 2, служащей для перепуска газов мимо поверхности нагрева, установлены параллельно включенные в коллекторы 5 и 8 змеевики 3. Один змеевик состоит из двух последовательно соединенных спиралей (на плане они показаны одной линией). Каждая спираль образует горизонтальный ряд труб. В одной горизонтальной плоскости спираль закручивается, в другой – раскручивается.

Трубный пакет по отношению к газовому потоку может иметь шахматную или коридорную компоновку.

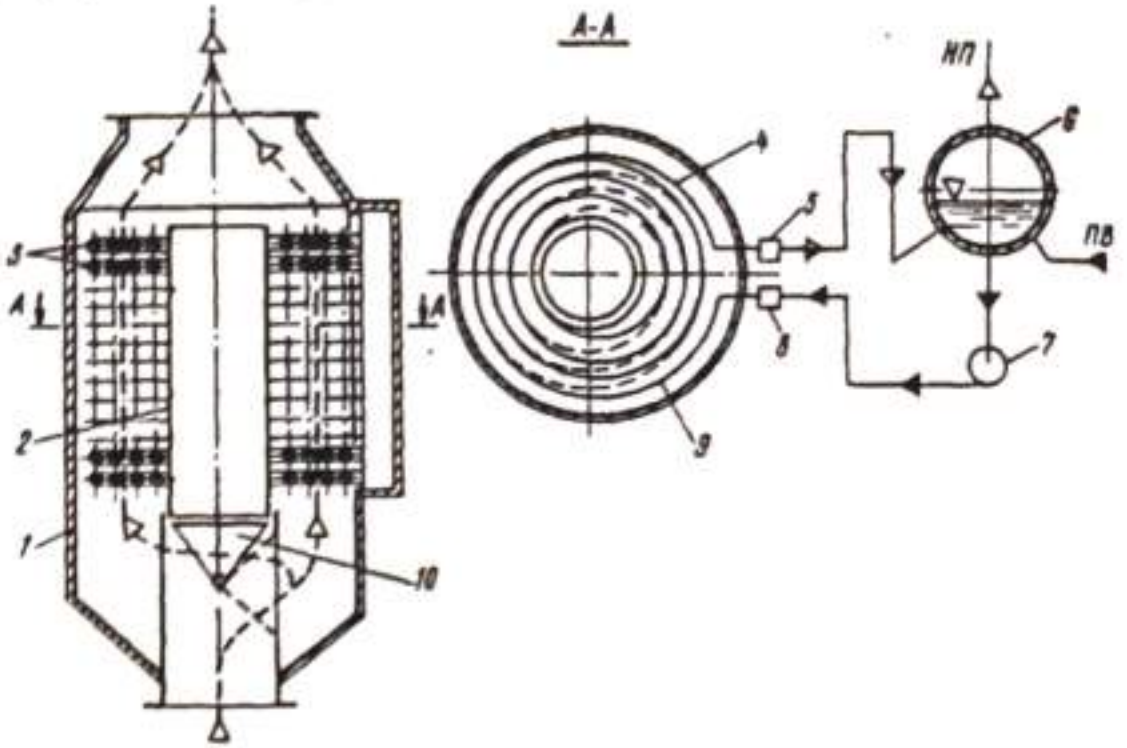


Рис. 5.11. УПК с цилиндрической формой кожуха и спиралевидной расположенных горизонтально формой трубных змеевиков

Пароводяная смесь отводится в сепаратор 6, который может иметь горизонтальное или вертикальное расположение. Из сепаратора 6 неиспарившаяся вода в смеси с питательной водой (на рис. *ПВ*) забирается циркуляционным насосом 7 и вновь возвращается в парообразующие змеевики 3 через коллектор 8. Кратность циркуляции в таких УПГ равна 5 – 8.

Перепуск газов в трубу 2 регулируется заслонкой 10. Обводной канал может располагаться вне кожуха или отсутствовать вообще. Тогда трубный пучок занимает все поперечное сечение кожуха. Изготовить внутренние спирали с малым радиусом изгиба очень трудно. Поэтому внутри пучка остается пространство, не заполненное трубами. Как правило, его закрывают дисками на входе в пучок и на выходе из пучка.

Последовательно омываемые газами змеевики испытывают различающиеся тепловые нагрузки, что является существенным недостатком УПК такого типа. Из-за этого, а также из-за конструкционных и технологических трудностей, возникающих при изготовлении спиралей большого диаметра (св. 1500 мм) для высокопроизводительных УПК, в установках с глубокой утилизацией применяют поверхность нагрева, состоящую из вертикально расположенных змеевиков.

5.11. Водотрубный УПК с принудительной циркуляцией и вертикальным расположением змеевиков

На рис. 5.12. кожух 2 имеет прямоугольную форму, все коллекторы трубных пучков располагаются горизонтально, а параллельно включенные змеевики – вертикально. При обогреве газами параллельные змеевики каждого пучка находятся в одинаковых условиях. В начале по ходу газов располагается пароперегреватель 6, в конце – экономайзер 3, куда насосом 7 подается вода из сепаратора 1. Из нижнего коллектора экономайзера подогретая вода поступает в первую парообразующую секцию 5, далее – во вторую парообразующую секцию 4, а затем – в сепаратор 1, где происходит отделение пара от воды.

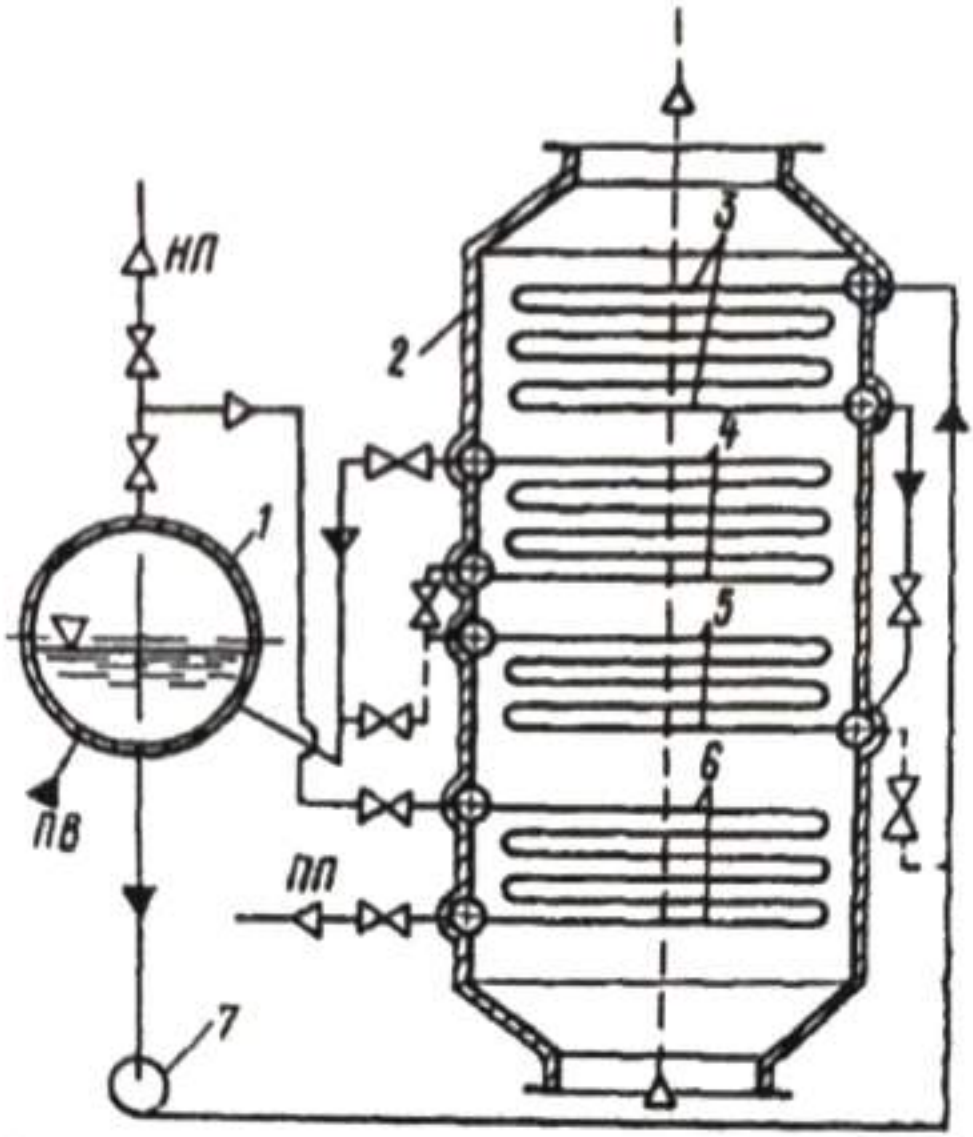


Рис. 5.12. Водотрубный УПК с принудительной циркуляцией и вертикальным расположением змеевиков

Часть насыщенного пара (на рис. *НП*) направляется его потребителям, остальная часть – в пароперегреватель 6, откуда перегретый пар (на рис. *ПП*) подается к турбогенератору. Отделившаяся от пара вода смешивается с

поступающей в сепаратор 1 питательной водой (на рис. *ПВ*), забирается насосом 7 и повторяет описанный выше путь.

В схеме УПК предусмотрены резервные магистрали (показаны на рис. 5.12. пунктиром) и арматура, позволяющие отключить экономайзер, вторую парообразующую секцию и пароперегреватель по отдельности или вместе.

В зависимости от принятой тепловой схемы утилизационной установки питательная вода может поступать сначала в экономайзер, а затем в сепаратор 1. Вода из сепаратора 1 поступает сразу в первую парообразующую секцию.

По сравнению с другими типами УПК с принудительной циркуляцией характеризуются наилучшими массовыми и габаритными показателями.

5.12. Утилизационные газотрубные паровые котлы

Газотрубный УПК марки «Кохран» показанный на рис. 5.13. и другие УПК подобного типа используются для теплоснабжения на небольших судах. Приведенная схема УПК наиболее типична, однако, она не исчерпывает все возможные варианты компоновки газотрубных котлов. Так, УПК марки «Кохран» могут быть одно- и двухходовыми со стороны газов. Регулирование паропроизводительности можно осуществлять либо с помощью газоперепускной заслонки, либо отключением поверхности нагрева посредством снижения уровня воды.

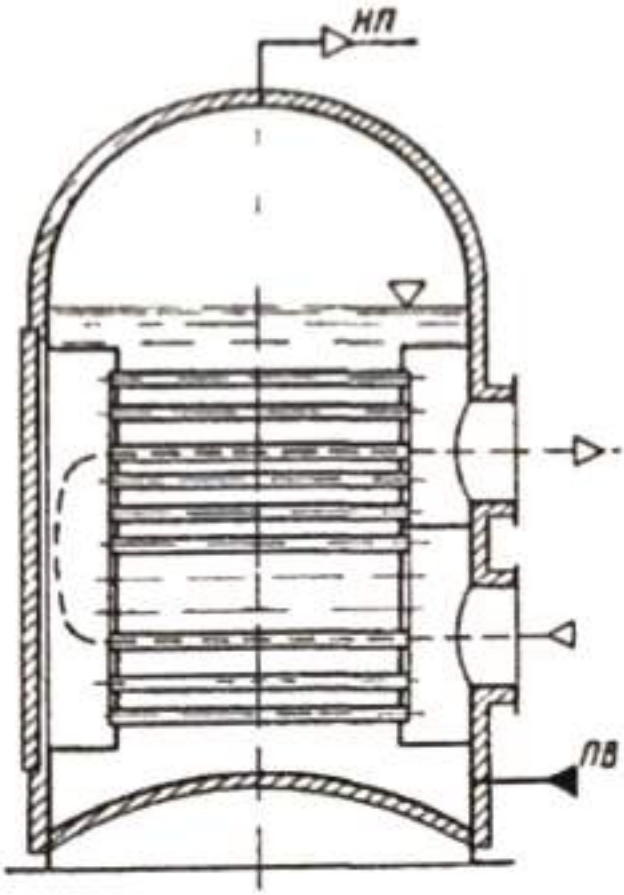


Рис. 5.13. Газотрубный УПК марки «Кохран»

5.13. Утилизационные водогрейные котлы

В основном такие котлы газотрубного типа, так как по сравнению с водотрубными они обладают более высоким водосодержанием, а, следовательно, и более высокой температурой воды на выходе. Это обстоятельство имеет очень важное значение в современных полностью автоматизированных водогрейных котлах.

На рис. 5.14. показан огнетрубный УВК наиболее распространенного на судах, очень простого по своей конструкции. Устройство УВК понятно из рисунка. Заметим лишь, что с помощью регулирующей заслонки 1 выпускные газы могут быть направлены в обход поверхности нагрева по каналу 2.

УВК может быть водотрубным с оребренной наружной поверхностью змеевиков. По условиям работы такой УВК следует рассматривать как обычный экономайзер.

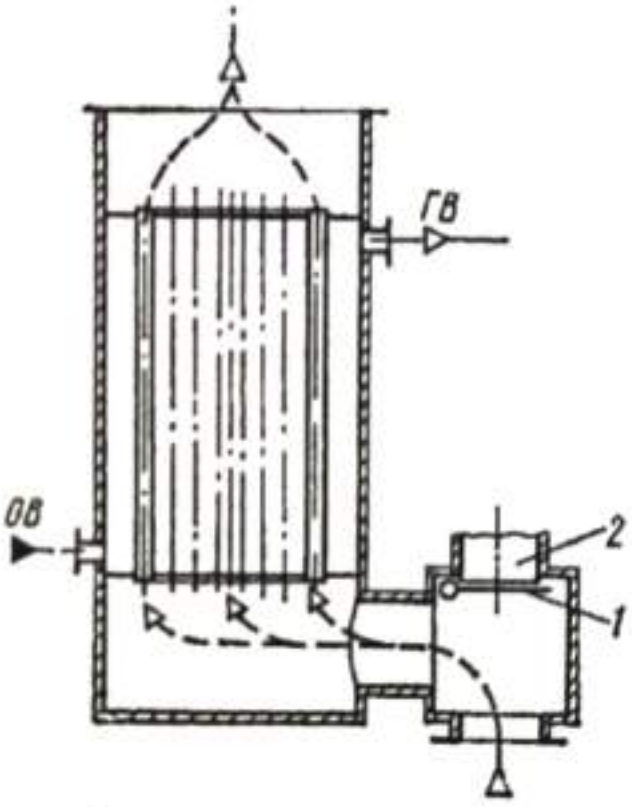


Рис. 5.14. Огнетрубный УВК

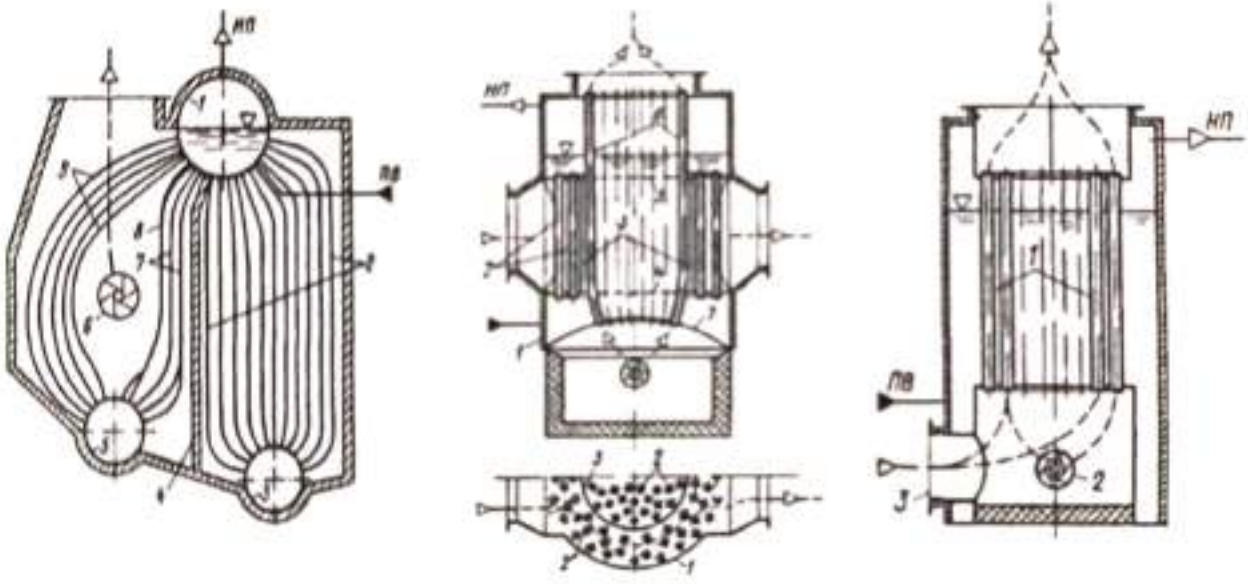
5.14. Устройство и принцип действия вспомогательных комбинированных паровых котлов

ВПК и УПК с естественной циркуляцией могут быть объединены в единую конструкцию.

Конструктивно паровые котлы, изображенные на рис. 5.15. а) и б) отличаются от парового котла, изображенного на рис. в) тем, что выпускные газы двигателей и газы от сгорания топлива движутся по различным газовым

трактам. Такие комбинированные паровые котлы имеют две независимо работающие части и соответствующие им поверхности нагрева. Если, например, на ходу судна паропроизводительность утилизационной части недостаточна (ГД работает с пониженной нагрузкой), включается в действие топочное устройство другой части ПК.

В ПК, схема которого показана на рис. 5.15. а) имеется общий пароводяной коллектор 1, к которому присоединены трубы 7, 8, 9 топливной части ПК и трубы 2 утилизационной поверхности нагрева. Последние омываются выпускными газами главного двигателя в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка. Благодаря наличию перегородки 4 обе части ПК по газовой стороне полностью разделены и могут работать одновременно. По компоновке топливная (коллекторы 1 и 5, трубы 7, 8, 9, топочное устройство 6) и утилизационная (коллекторы 1 и 3, трубы 2) части представляют собой обычные вертикальные водотрубные ПК с естественной циркуляцией.



а) Вспомогательный комбинированный водотрубный ПК с естественной циркуляцией

б) Вспомогательный комбинированный газоводотрубный ПК

в) Вспомогательный комбинированный газотрубный ПК с общим газоходом

Рис. 5.15. Основные схемы комбинированных вспомогательных ПК

В комбинированном ПК на рис. б) утилизационная поверхность состоит из прямых вертикальных труб 2, омываемых газами снаружи (принцип работы водотрубного котла), а поверхность нагрева топливной части состоит из труб 6 и потолочной стенки топки 7, которые омываются газами изнутри (принцип работы газотрубного котла). Трубы 2 расположены в кольцевом пространстве, ограниченном стенками 1 и 3, а также трубными досками 4 и 5. Эти трубы омываются поперечным потоком газа, который на входе симметрично

раздваивается. Вертикальное расположение корпуса и труб обеих частей ПК делают его очень компактным.

Изображенный на рис. 5.15. в) комбинированный ПК имеет общую поверхность нагрева из труб 1, которые омываются либо выпускными газами двигателя, поступающими через патрубок 3, либо продуктами сгорания топлива при введенном в действие топочном устройстве 2. Комбинированные ПК такого типа применяются редко из-за отсутствия резерва при работе, например, на выпускных газах, и невозможности создания общей поверхности нагрева, эффективно работающей на выпускных газах двигателя и газах от сгорания топлива, так как эти теплоносители сильно различаются по расходу и температуре.

Комбинированные ПК можно встретить на теплоходах различной мощности. По массовым и габаритным показателям они предпочтительнее, чем вспомогательный и утилизационный паровые котлы, выполненные отдельно. Однако, на крупных судах они применяются сравнительно редко, так как комбинирование высокопроизводительных частей ПК связано с определенными конструктивными и эксплуатационными сложностями.

Серьезным недостатком всех комбинированных ПК является то, что они менее надежны, чем раздельно выполненные вспомогательные и утилизационные паровые котлы. Так, например, разрыв какой-либо одной парообразующей трубы утилизационной части выводит из строя весь рабочий контур комбинированного парового котла.

5.15. Схема комбиннрованного водотрубного котла с естественной циркуляцией и пароперегревателем газотурбинного судна

Основная особенность комбинированного водотрубного котла (Рис. 5.16.) состоит в том, что для работы турбоэлектрогенератора он обеспечивает пар с небольшим перегревом. С этой целью в утилизационной, так и в топливной частях установлены отдельные пароперегреватели. Поверхности нагрева топливной и утилизационной частей разделена стенкой каркаса.

Отработавшие газы газотурбинной установки подводятся к утилизационной части и омывают вначале трубы пароперегревателя, а затем трубы парообразующего пучка. Топливная часть состоит из подъемных труб экрана и конвективного пучка, а также опускных опускных труб. Пароперегреватель топливной части имеет змеевиковую конструкцию.

На каждом фронте топливной части расположены по две горелки. Для всех элементов котла применены трубы одинаково диаметра, за исключением опускных труб, которые несколько большего диаметра.

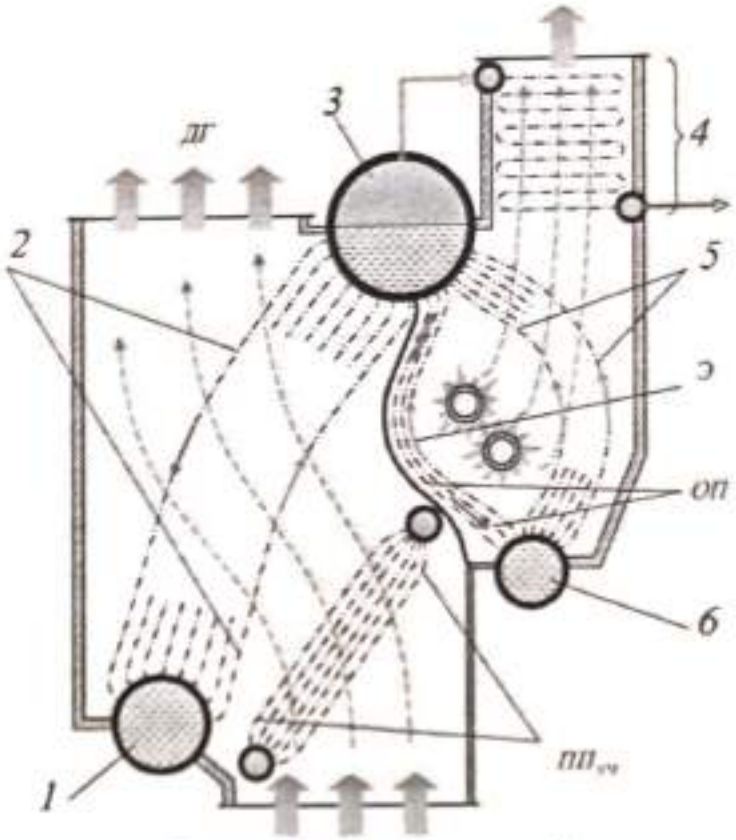


Рис. 5.16. Комбинированный котел (утилизационный и вспомогательный котлы)
1 - водяной барабан утилизационного контура; 2 – конвективный парообразующий пучок трубок утилизационной части; 3 – совместный пароводяной барабан; 4 – пароперегреватель топливной части; 5 – парообразующий пучок трубок топливной части; 6 – водяной барабан топливной части; ДГ – уходящие дымовые газы от ГД; Э – экран топки топливной части; ОП – опускные трубки топливной части; ПП$_{уч}$ – пароперегреватель утилизационной части

Пароводяной барабан общий для всех частей. Топливная и утилизационная части имеют отдельные водяные барабаны. Котел оборудован сажеобдувочным устройством. В пароводяном барабане размещен потолочный дырчатый (парозаборный) щит и другие устройства, обеспечивающие питание котла и необходимые параметры пара. Температура перегретого пара 180 – 195°С; к.п.д. топливной части 81 %; температура газов ГТУ 240°С.

5.15. Принципиальная тепловая схема вспомогательной паросиловой установки с использованием утилизационного контура

Вспомогательные и утилизационные котлы устанавливают на всех теплоходах, а так же на турбоходах. Они обеспечивают потребности в паре на стоянках. Размеры и их число, а также параметры пара определяют, прежде всего, назначением судна и типом потребителей пара. Условия эксплуатации судов с дизельными установками таковы, что вспомогательные котлы,

расходующие также дизельное топливо, работают, как правило, на стоянке. На ходовом режиме паропроизводительности утилизационных котлов, использующих тепло выпускных газов главных двигателей, обычно достаточно для всех работающих паропотребителей. Дополнительное включение вспомогательных агрегатов снижает экономичность установки, поэтому на ходовом режиме они обычно не работают.

Возможны комбинированные схемы, предусматривающие совместную работу вспомогательных и утилизационных котлов на одну магистраль. У таковых скомпонованы и топливная и утилизационная части (рис. 5.17.).

В состав установки входят следующие системы:

1. Питательная система служит для подготовки и подачи воды в котел. В состав питательной системы входят теплый ящик 21, питательные насосы (один резервный) 17, трубопроводы, путевая и регулирующая арматура средств контрольно-измерительные приборы (КИП). В теплый ящик конденсат поступает через конденсатор 18 охладитель чистого конденсата от потребителей пара, в которых отсутствует возможность контакта воды с топливом и маслом, через конденсатор 19 - охладитель загрязненных конденсатов и контрольно-смотровую цистерну 20. Предусмотрены заполнение теплого ящика и подпитка его насосом 22 из цистерны 23 добавочной воды. Так как в теплом ящике питательная вода имеет непосредственный контакт с атмосферным воздухом (открытая система питания), то создаются благоприятные условия для насыщения воды кислородом, обусловливающим интенсивную коррозию металла трубопроводов, арматуры и элементов котла. В главных и вспомогательных котельных установках также применяют закрытые системы питания, в которых вместо теплого ящика устанавливают деаэратор.

2. Топливная система служит для подготовки и подачи топлива к форсункам котла. Из отстойно - расходной цистерны 8 топливо забирается топливным насосом 10 и подается им через подогреватель 11 к форсункам 16. На топливном трубопроводе установлены фильтры холодного 9 и горячего 12 топлива, гидроарматура и средства КИП. В цистерну 8 топливо подается из бункера (танка) 4 топливоперекачивающим насосом 7. Для снижения вязкости топлива перед его перекачиванием топливный трубопровод 6 на участке между танком и отстойнорасходной цистерной смонтирован вместе с спутниковым паропроводом 5 системы подогрева топлива в емкостях и трубах. Воздушно-газовая система служит для подачи воздуха в топку котла и отвода из него дымовых газов. В ее состав входят котельный вентилятор 13, воздухопровод 15 с заслонками 14 и газоход котла.

3. В систему автоматического регулирования, сигнализации и защиты входят подсистемы регулирования питания котла, горения и температуры

перегретого пара, элементы сигнализации и защиты котла (принцип их действия рассмотрен далее).

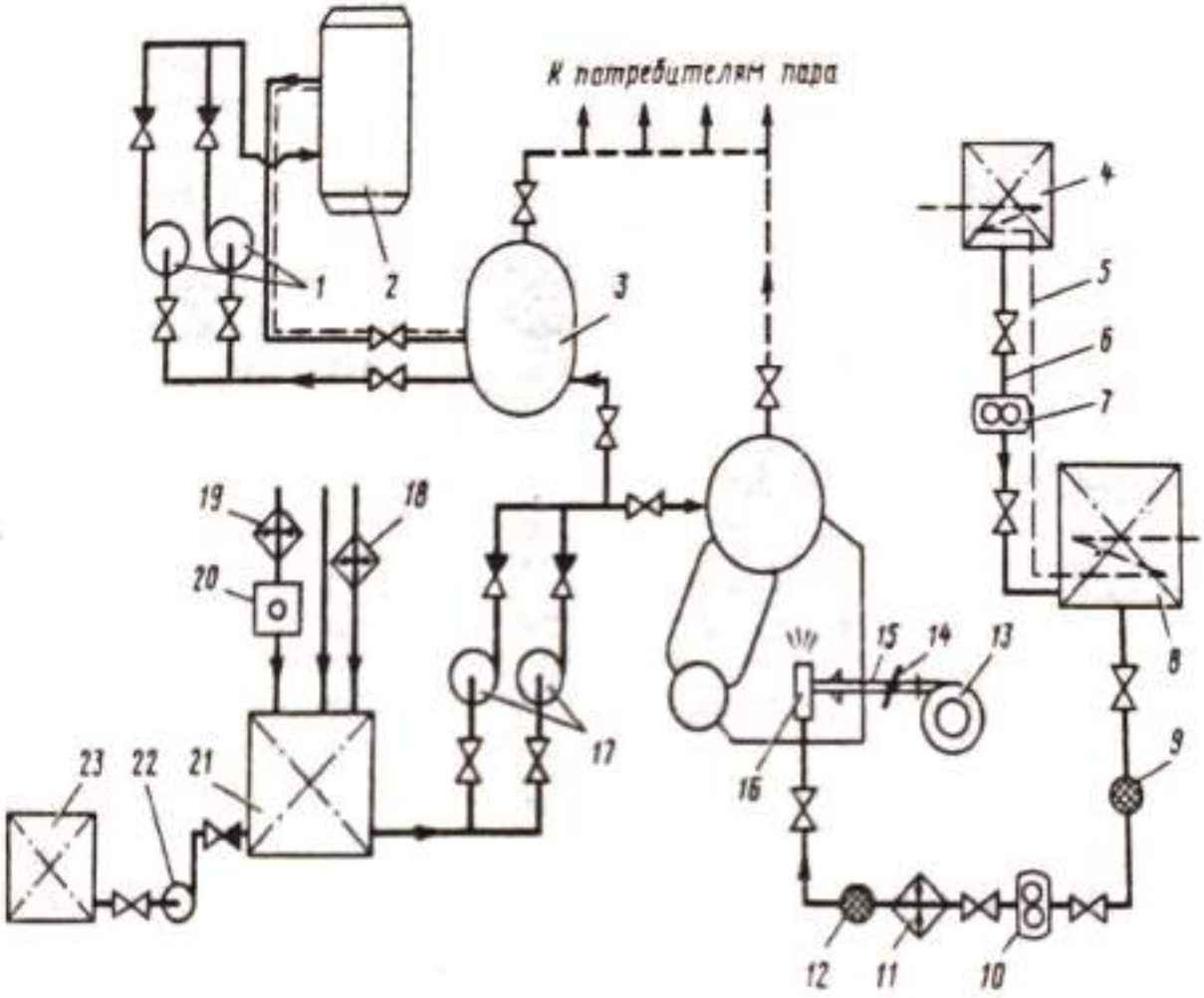


Рис. 5.17. Принципиальная тепловая схема комбинированной топливной и утилизационной установки

4. Система продувки котла предназначена для периодического удаления из котла накапливающихся в котловой воде солей и шлама.

5. Система ввода в котел химических реагентов, состоящая из дозирующего бачка, насоса и трубопроводов с арматурой, предназначена для ввода химических реагентов с целью предотвращения процесса накипеобразования и коррозии.

В утилизационном котле отсутствуют топливная и воздушная системы, а конструктивные особенности остальных систем, обслуживающих УК, определяются типом и назначением котла. Так, в утилизационном контуре (см. рис. 5.17.) использован утилизационный котел 2 с принудительной циркуляцией. Питательная система котла состоит из собственно питательной и циркуляционной систем, объединенных сепаратором пара 3. Питательная вода из теплого ящика 21 подается питательным насосом 17 в сепаратор пара 3, откуда циркуляционный насос 1 забирает воду и подает ее в парообразующую

часть УК. Пароводяная смесь из УК поступает в сепаратор, где пар отделяется от воды и направляется к потребителям пара.

5.16. Схемы и описание работы котельных установок теплоходов и газотурбоходов

Для работы ПК или ВК, снабжения потребителей паром (горячей водой) необходимо иметь комплекс систем, устройств и приборов, который вместе с ПК (ВК) образует котельную установку. В нее входят системы подачи и подготовки топлива, питательной воды, подачи воздуха и удаления продуктов сгорания, трубопроводы пара и горячей воды, теплообменные аппараты для подогрева питательной воды и конденсации пара, а также другое оборудование и приборы для управления, регулирования, защиты и сигнализации.

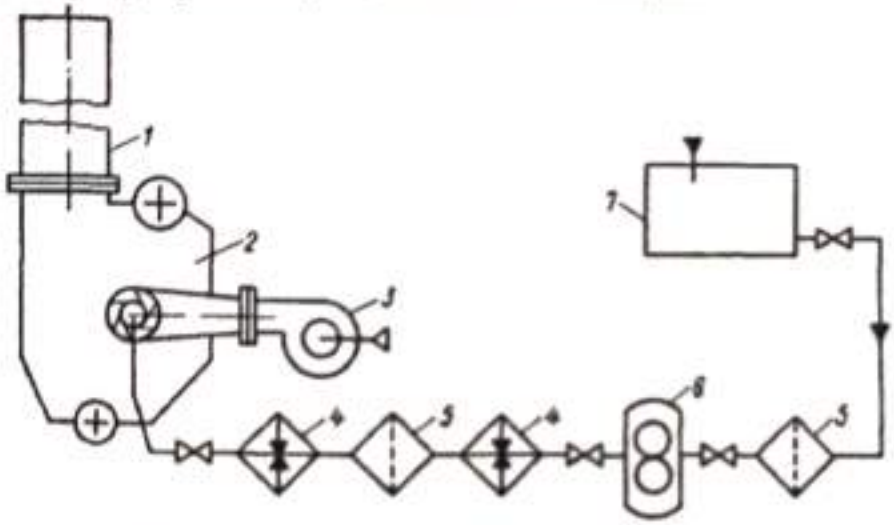


Рис. 5.18. Топливная и воздухоподводящая системы ВПК

Топливная и воздухоподводящая системы ВПК изображенные на рис. 5.18. включают цистерну основного запаса топлива, откуда топливо насосом подается в расходную цистерну 7, фильтры 5, подогреватели 4 (в случае использования вязких топлив) и шестеренный насос 6, направляющий топливо к форсунке. Забор топлива для ВПК 2 и главного двигателя, работающих на одинаковом топливе, производится из одних и тех же расходных цистерн. Необходимый для сгорания топлива воздух подается вентилятором 3; образующиеся при сгорании топлива газы удаляются через дымовую трубу 1. Газовыпускной тракт парового котла, удаленного от основания дымовой трубы, имеет сложную конфигурацию.

Питательная система ВПК состоит из цистерны котельной воды, теплого ящика, питательного насоса и другого оборудования. Цистерна котельной воды наполняется дистиллятом или пресной водой и служит для первоначального заполнения всей питательной системы и ВПК, а также для подпитки теплого ящика, откуда питательная вода питательным насосом направляется в ВПК.

Питательная вода состоит в основном (95% и более) из конденсата пара, возвращаемого от потребителей, и из добавочной воды, восполняющей все потери пара и конденсата (расход котловой воды на продувку, утечка воды и пара через неплотности, безвозвратные потери пара на распыление топлива при применении паромеханических форсунок).

Очистка или обработка питательной воды заключается в удалении из нее механических взвешенных частиц, растворенных газов и солей. Подогрев питательной воды осуществляется в специальных теплообменных аппаратах, при наличии на судне отработанного пара от вспомогательных механизмов.

В зависимости от типа судна устанавливают один или два ВПК (на крупных танкерах обычно два). Количество УПК определяется числом расположенных на судне главных двигателей. Для УПК с принудительной циркуляцией применяют один сепаратор, либо в качестве сепаратора используют пароводяной коллектор ВПК.

Основные преимущества котельной установки при использовании пароводяного коллектора ВПК в качестве сепаратора УПК заключается в следующем: уменьшаются масса и габариты установки за счет отсутствия сепаратора; ВКП в ходовом режиме при работающем УПК находится в горячем состоянии и, в случае внезапного уменьшения паропроизводительности УПК может быть введен в действие немедленно. Если УПК снабжен собственным сепаратором, то в период его работы для поддержания ВПК в постоянной готовности к действию (в состоянии «горячего резерва»), в нем необходимо поддерживать горение топлива.

При использовании пароводяного коллектора ВПК в качестве сепаратора снижается степень резервирования. Действительно, например, разрыв парообразующей трубы ВПК приведет к выходу из строя всей парогенераторной установки судна. Этот недостаток отсутствует при наличии двух ВПК, пароводяной коллектор одного из которых используется в качестве сепаратора.

ВПК и УПК, даже выполненные в раздельных конструкциях и не имеющие общего пароводяного коллектора, соединены паровыми и питательными трубопроводами.

В настоящее время распространение получили вспомогательные котельные установки в агрегатном исполнении, известные как котлоагрегаты. При этом сам котел со значительной частью обслуживающих его механизмов, приборов и устройств составляет единую конструкцию (сборочно-монтажную единицу). Остальная часть механизмов и устройств компонуется в отдельные агрегаты, так, например, агрегат теплого ящика и питательных насосов. При агрегировании основной объем монтажных работ выполняется в цеховых условиях, что способствует ускорению и удешевлению строительства судна.

Установка на рис. 5.19. состоит из водотрубного ВПК 13 с естественной циркуляцией (без пароперегревателя), УПК 6 с принудительной циркуляцией и с

собственным сепаратором 9. УПК 6 предназначен для снабжения перегретым паром турбогенератора и насыщенным паром всех остальных судовых потребителей на ходу. Перегретый и насыщенный пар подается, соответственно, по трубам 7 и 2. По трубе 4 отбирается насыщенный пар на паротушение. Питание обоих парогенераторов (ПГ) осуществляется питательными насосами 10 (один из которых резервный) из теплого ящика 11.

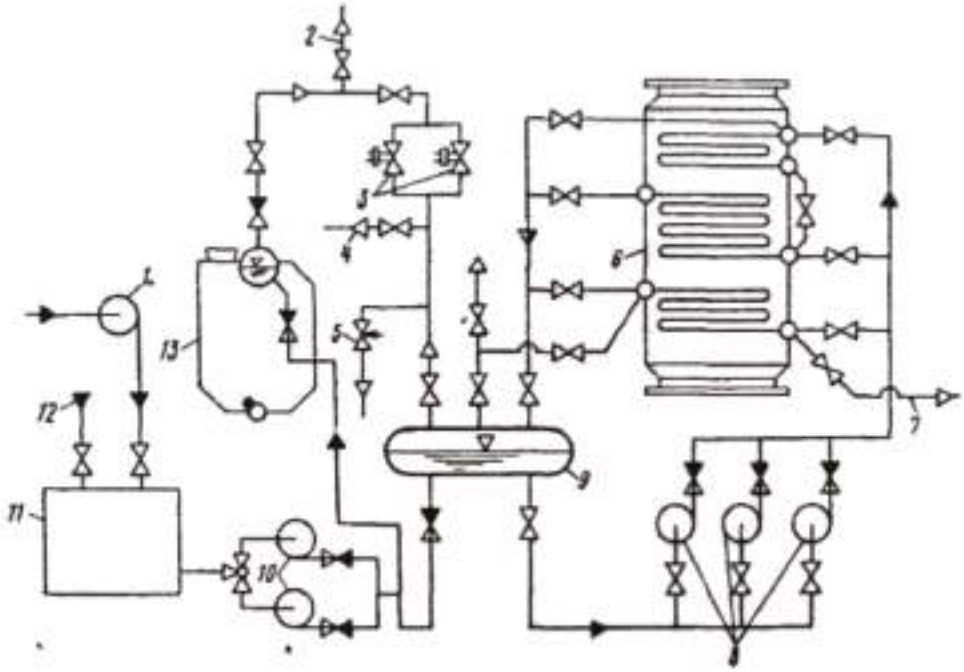


Рис. 5.19. Принципиальная схема основных паровых и водяных трубопроводов котельной установки для тепло- и электроснабжения (с сепаратором пара)

Принудительная циркуляция в УПК 6 обеспечивается насосами 8 (один из которых резервный). Излишки пара из УПК сбрасываются в конденсатор турбогенератора или в специальный конденсатор с помощью регулирующего клапана 5. УПК снабжен арматурой и перепускными трубами, которые позволяют отключать отдельные поверхности нагрева. В случае аварийного останова главного двигателя предусмотрено мгновенное отключение потребителей насыщенного пара с помощью клапанов 3, имеющих электромагнитный привод.

Пар от всех потребителей сбрасывается в один либо в разные конденсаторы (один конденсатор обслуживает турбогенератор, другой – всех остальных потребителей (на схеме они не показаны)), откуда конденсат специальным насосом по трубе 12 подается в теплый ящик. В теплый ящик поступает и добавочная (подпиточная) вода, забираемая из цистерны котельной воды насосом (1). Обычно в теплом ящике устанавливают фильтры для очистки питательной воды от загрязняющих ее примесей (масла, ила и т.п.).

На рис. 5.20. изображена схема паропроизводящей установки с глубокой утилизацией теплоты выпускных газов. В отличие от установки, показанной на

рис. А в ней в качестве специального сепаратора используют пароводяные коллекторы ВПК. Кроме того, в этой схеме экономайзер включен в состав питательной системы. Для защиты стенок труб экономайзера от коррозии со стороны газов питательную воду подогревают до температуры, при которой стенки труб будут иметь температуру выше точки росы. Для этого в схеме установки предусмотрен паровой подогреватель питательной воды 5.

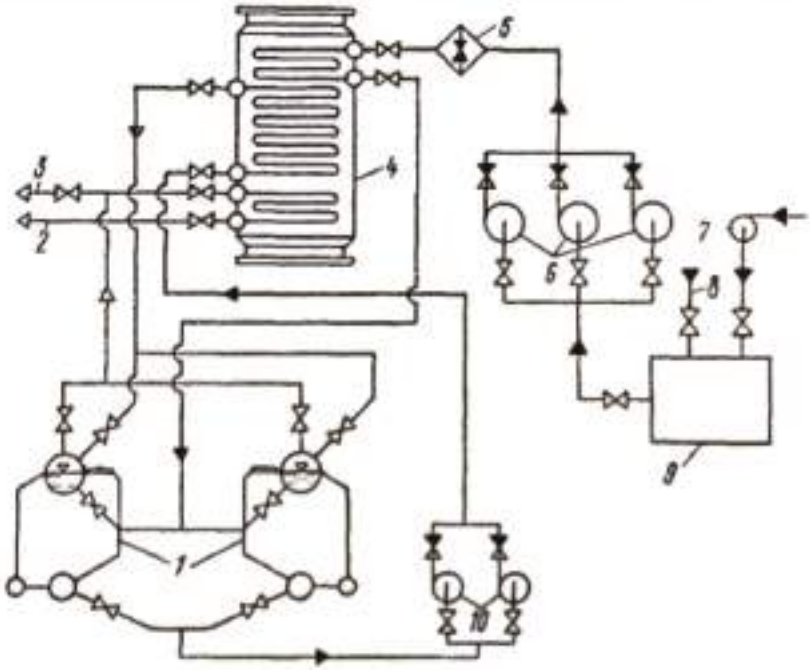


Рис. 5.20. Принципиальная схема основных паровых и водяных трубопроводов котельной установки для тепло- и электроснабжения (без сепаратора пара)

1 – ВПК; 2 – перегретый пар к турбогенератору; 3 – насыщенный пар к потребителям; 4 – УПК; 5 – паровой подогреватель питательной воды; 6 – питательные насосы; 7 – насос добавочной (подпитывающей) воды; 8 – конденсат пара от потребителей; 9 – теплый ящик; 10 – циркуляционные насосы.

На рис. 5.21. показана схема основных паровых и водяных трубопроводов котельной установки для теплоснабжения теплохода. Два УПК 8 с принудительной циркуляцией работают на сепаратор 10, из которого пар направляется в трубопровод 11 и далее к потребителям. Из конденсатора 7, куда сбрасывается отработанный пар от всех потребителей, в теплый ящик 5 поступает вместе с конденсатом добавочная вода, подаваемая подпитывающим насосом 6 из цистерны котельной воды. На нагнетательном участке питательного трубопровода ВПК установлены обескислороживающий 3 и обессоливающий или умягчающий 2 фильтры. Подачу питательной воды и циркуляцию обеспечивают насосы 4 и 9. Трубопровод (12) соединен с системой паротушения. На теплоходах зарубежной постройки в качестве сепаратора обычно используется пароводяной коллектор ВПК 1.

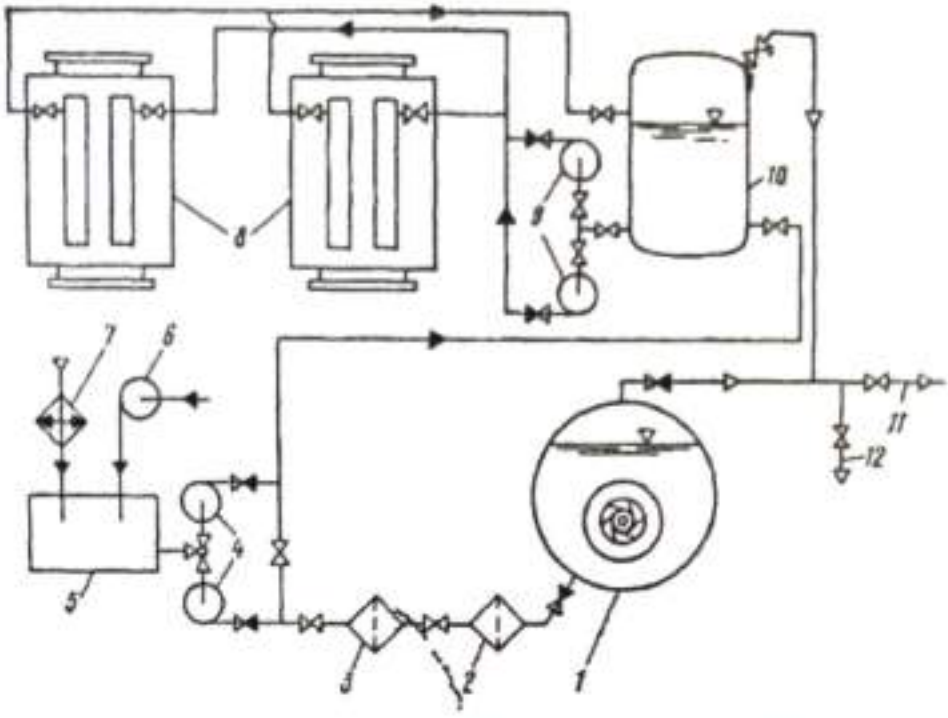


Рис. 5.21. Принципиальная схема основных паровых и водяных трубопроводов котельной установки для теплоснабжения (с сепаратором пара)

5.17. Котлы систем с органическим теплоносителем

Водяной пар как теплоноситель в системах теплоснабжения имеет существенные недостатки: высокую коррозионную агрессивность; низкую температуру насыщения при малых давлениях; возможность замерзания конденсата пара в системах обогрева судовых помещений и балластных танков; необходимость жесткого контроля качества питательной воды; большие трудности и высокую стоимость технического обслуживания систем обогрева грузовых, топливных и балластных танков.

На судах, где отсутствуют турбоприводные механизмы, целесообразно использовать в системах теплоснабжения другие виды теплоносителей, лишенные перечисленных недостатков. В качестве таких теплоносителей используют органические жидкости на основе минеральных масел (получивших название «термомасел»). При использовании термомасел в судовых системах теплоснабжения снижаются трудоемкость и стоимость их технического обслуживания, упрощается техническая эксплуатация и полностью устраняется опасность замерзания теплоносителя. Кроме того, в системах с органическими теплоносителями имеется возможность обеспечить высокую точность и равномерность регулирования температуры нагреваемой среды, что в отдельных случаях имеет первостепенное значение. Поэтому термомасла можно применять на судах, предназначенных для плавания в холодных районах, на танкерах и некоторых специализированных судах.

В то же время термомаслам как теплоносителям присущи существенные недостатки:

- низкая термическая стойкость, что приводит к образованию на поверхностях нагрева термомасляных котлов плотных отложений нефтепродуктов, ухудшающих теплопередачу;

- высокая пожароопасность, высокая стоимость;

- отсутствие опыта и традиций эксплуатации оборудования систем с органическими теплоносителями; большие трудности при ремонте с использованием сварки;

- затруднение эксплуатации энергетической установки без традиционного наличия пара на судне.

Все это сдерживает распространение термомасел на судах морского флота.

Основными характеристиками термомасел являются: температуры вспышки (в аспекте пожароопасности), кипения (с точки зрения допустимого нагрева теплоносителя) и застывания (с позиций надежности работы системы обогрева в холодных условиях). Важным свойством термомасел является их термостойкость, определяющая максимально допустимую температуру применения, т.е. температуру, при которогй начинается процесс разложения органического теплоносителя

В качестве примеров органических теплоносителей можно привести термомасла АМТ-300 и АМТ300Т, «Жилотерм», «Эссотерм-500».

Термомасляные котлы впервые появились на транспортном флоте на серии танкеров-газовозов, предназначенных для перевозки сжиженных газов, в частности, аммиака.

Котельная установка состоит из двух агрегатов: вспомогательного и утилизационного – имеющих искусственную циркуляцию, создаваемую специальным насосом термомасла.

Поверхность нагрева вспомогательного котла с термомасляным теплоносителем представленного на рис. 5.22. скомпонована в виде наружного 7 и внутреннего 6 змеевиков. Котел имеет форму цилиндра, в верхней части которого расположена горелка 3 для сжигания мазута; воздух подводится к горелке по каналу 1. Термомасло поступает сверху по трубам 4 и по наружному змеевику 7 движется вниз к внутреннему змеевику 6, в котором оно приобретает восходящее направление движения к верхним элементам 5 змеевика, а затем поступает в выходную трубу 2. Наружные змеевики 7 по всей высоте цилиндра образуют сплошную стенку, а внутренние змеевики (6) имеют в нижней части разреженный участок 9, образующий поход для дымовых газов. Продукты сгорания, образующиеся в топке 10, поступают в кольцевое пространство, образованное сплошными стенками змеевиков 6 и 7, а в верхней части котла потоки газов поворачивают вниз и перемещаются в кольцевом пространстве

между наружными змеевиками 7 и корпусом котла. На рис. 5.22. направление движения газов указывается стрелками. Отводятся газы через дымоход 8.

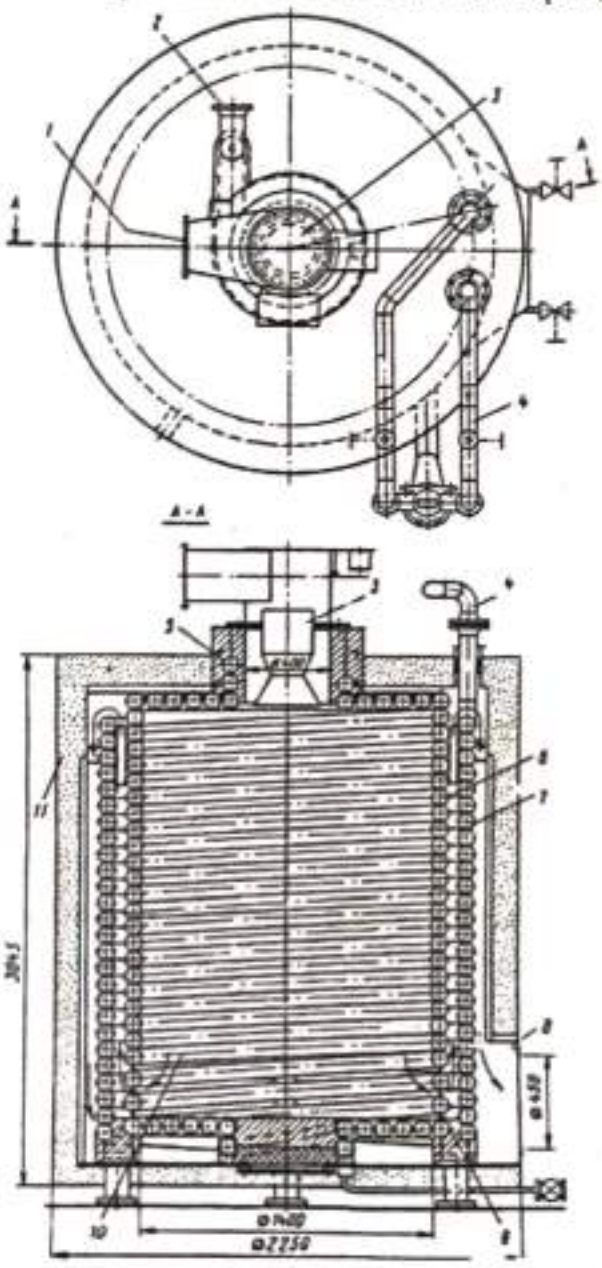


Рис. 5.22. Термомасляный котел с принудительной циркуляцией рабочей среды

Трубы змеевиков 7 омываются газовыми потоками с двух сторон и имеют только конвективный теплообмен, а змеевики 6 воспринимают лучистую теплоту из топки 10 и частично получают конвективную теплоту со стороны кольцевого пространства между змеевиками 6 и 7. По высоте змеевики имеют, соответственно по 26 и 28 витков, выполненных из труб полностью сварной конструкции без фланцевых соединений.

Основные характеристики вспомогательного судового котла: теплопроизводительность 1,98 МВт; давление термомасла в змеевиках около 1 МПа; температура термомасла на входе в котел +140°С, а на выходе +180°С; количество масла в котле 1,27 м^3 (1280 кг); масса котла без масла 5400 кг.

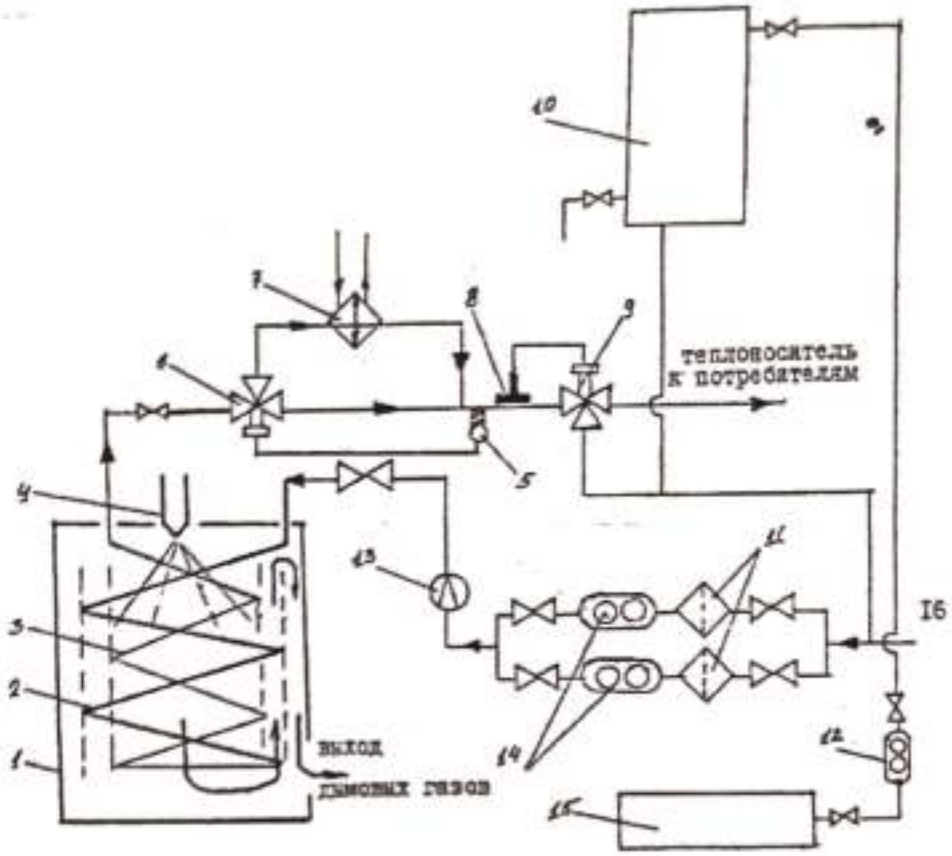


Рис. 5.23. Принципиальная схема термомасляной установки
1 – корпус термомасляного котла; 2 – наружный змеевик; 3 – внутренний змеевик; 4 – форсунка; 5 – датчик температуры; 6, 9 – трехходовой электромагнитный клапан; 7 – холодильник масла; 8 – датчик давления масла в системе; 10 – цистерна пополнения утечек; 11 – фильтр; 12 – насос пополнения цистерны утечек; 13 – датчик потока масла; 14 – циркуляционные масляные насосы; 15 – танк запасного масла; 16 – охлажденный теплоноситель от потребителя

На ряде судов применяются схемы теплоснабжения, с более эффективной системой регулирования, позволяющей автоматически поддерживать заданные значения температуры во всех потребителях теплоты с помощью бортового компьютера. Максимальная температура термомасла +240°С, минимальная +140°С.

5.18. Котлы в системах термического обезвреживания судовых отходов

Методы обезвреживания (Рис. 5.24.). Важность проблемы предотвращения загрязнения моря с судов очевидна. На всех судах мирового флота предусматриваются те или иные технологии обезвреживания судовых отходов. Однако, комплексного решения проблемы пока не существует из-за трудности соединения различных устройств в единую систему обезвреживания разных по физико-химическим свойствам судовых отходов – нефтесодержащих и сточных

вод, мусора. Поэтому практикуются различные методы обезвреживания отходов: обработка и сброс в море, накопление и сдача на береговые сооружения, обработка и термическое обезвреживание судовыми средствами.

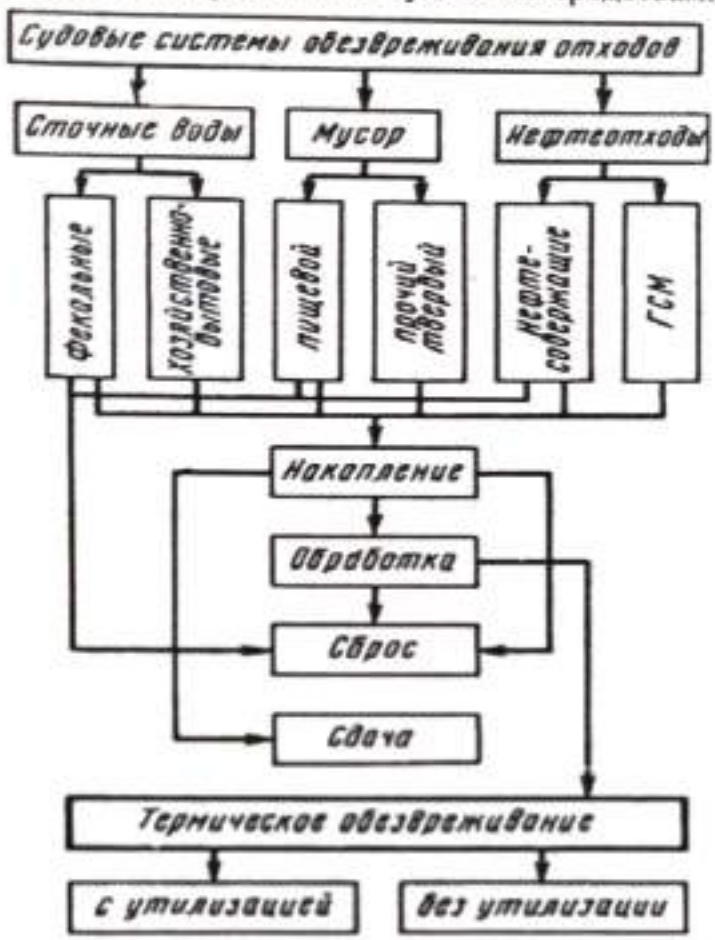


Рис. 5.24. Принципиальная схема технологии обезвреживания судовых отходов

Наиболее полно данная проблема решается комплексной технологией обезвреживания судовых отходов, центральным элементом которой является установка для термического обезвреживания (сжигания). В качестве такового центрального элемента могут использоваться инсинераторы различных типов и паровые котлы, оборудованные специальными устройствами для подготовки отходов к сжиганию.

Сжигание отходов в паровых котлах позволяет утилизировать теплоту, образующуюся при сгорании. Кроме того, при этом нет необходимости устанавливать еще и инсинератор, в котором на сжигание твердых отходов затрачивается топливо. Однако, сжигание отходов в котлах требует оборудования их дополнительными устройствами, может явиться причиной интенсификации процессов наружного загрязнения и коррозии, усложняет обслуживание котлов. К тому же, экономический выигрыш от утилизации отходов не всегда окупает расходы на переоборудование котлов. Именно поэтому в настоящее время для сжигания твердых отходов на судах используются, главным образом, инсинераторы. Что касается отходов

нефтепродуктов (нефтесодержащих вод), то после их соответствующей обработки в гомогенизаторах они могут сжигаться в топках судовых котлов.

Инсинераторы. В судовой практике используются инсинераторы различной компоновки.

Инсинератор типа GS-500 (Рис. 5.25.) является довольно сложным агрегатом. Основным его элементом является топка, состоящая из первичной 6 и вторичной 1 камер сгорания, разделенных перегородкой 5 из огнеупорного кирпича. Первичная камера 6 через питатель 4 наполняется твердыми отходами, которые в ней подвергаются пиролизу. Образовавшиеся продукты поступают во вторичную камеру сгорания 1. Остатки в виде золы удаляются обычно вручную.

Заданный температурный режим поддерживается с помощью полностью автоматизированной горелки 3, сжигающей дизельное топливо. Дополнительный расход топлива сравнительно невелик и зависит от состава сжигаемых отходов.

Нефтеостатки и шлам сточных вод подаются через грязевую горелку специальным шламовым дозирующим насосом. Смесь нефтепродуктов и воды распыляется сжатым воздухом давлением 0,5 – 1,0 МПа. Продукты сгорания удаляются из инсинератора через патрубок 2 дымососом, создающим разрежение во избежание выброса дыма в помещение инсинератора.

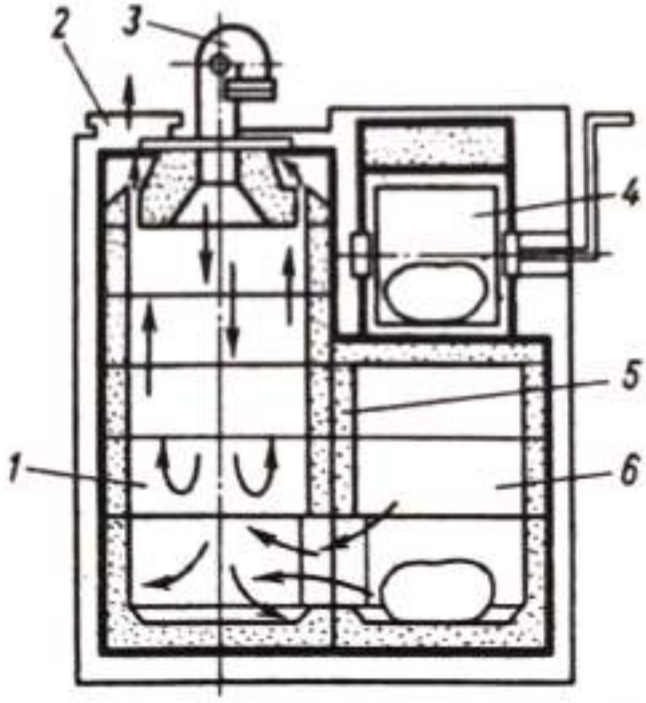


Рис. 5.25. Схема инсинератора GS-500

Котлы для обезвреживания отходов. Особенности компоновки таких котлов рассмотрены на примере устройства вспомогательного огнетрубно – водотрубного котла типа AQ-10, выпускаемого фирмой «Aalborg», Швеция. Котел AQ-10 (Рис.5.26.) оборудован комбинированной топочной камерой, состоящей из двух отсеков, разделенных перегородкой 3 с отверстиями. Основной отсек 2 предназначен для сжигания топлива, жидких нефтеотходов и

горючих газов, поступающих из утилизационного отсека 6, где твердые отходы подвергаются пиролизу.

Жидкие отходы перед подачей на ротационную форсунку 1 обрабатываются (гомогенизируются) в циркуляционном контуре, состоящем из рабочей цистерны, комбинированной мельницы, центробежного насоса, подогревателя и дозирующего насоса с регулятором.

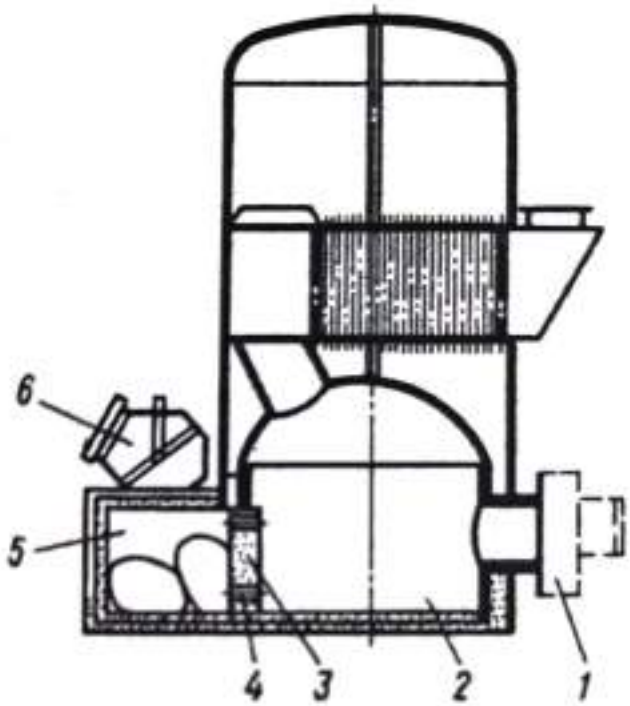


Рис. 5.26. Котел-инсинератор AQ-10

Твердые отходы (мусор) количеством 4 ÷ 6 мешков каждый около 0,05 м^3 массой до 20 кг загружаются в утилизационную камеру 5 через специальный питатель 6 барабанного типа, снабженный жаропрочными отражателями-рефлекторами. Отходы при загрузке перекрывают часть отверстий (4) в разделительной стенке 3 и ограничивают доступ воздуха в утилизационную камеру, в результате чего в ней происходит процесс пиролиза отходов, а образующиеся горючие газы поступают за счет создаваемого в ней разрежения в основную топочную камеру. Остатки отходов в виде углей и смолистой жидкости догорают в утилизационном отсеке с образованием золы. Она составляет 10% ÷ 15% от массы отходов.

Опыт эксплуатации котлов марки AQ-10 (по данным фирмы) свидетельствует о том, что благодаря утилизации теплоты сжигания отходов экономится до 30% котельного топлива. Затраты на установку котла и системы подготовки отходов окупаются в течение 3-х лет.

В этом разделе приведены лишь элементарные сведения о назначении и устройстве инсинераторов и котлов для сжигания судовых отходов. Подробные сведения о характеристиках рабочих процессов этих агрегатов можно найти в специализированной литературе.

ГЛАВА 6
Эксплуатация судовых котельных установок

Эксплуатация парового котла производится в соответствии с Правилами обслуживания и ухода за ним завода изготовителя, а также инструкции по эксплуатации.

6.1. Требования к технической эксплуатации судовых паровых котлов

Осмотр котельной установки и подготовка к действию котельных вентиляторов.

При подготовке котельной установки к действию необходимо:

- осмотреть котёл, его топки, пароперегреватель, водяной экономайзер и воздухоподогреватель; проверить чистоту поверхностей нагрева и отсутствие топлива в топке;
- убедиться в отсутствии видимых дефектов и посторонних предметов. В случае появления сомнений в исправности внутренних частей или устройств котла должен производиться внутренний осмотр;
- убедиться в исправности топочных устройств и отсутствии их повреждений, проверить правильность размещения диффузоров и форсунок относительно фурм (жаровых труб), проверить легкость хода диффузоров, шиберов, заслонок;
- осмотреть паропроводы, убедиться в том, что они полностью собраны и покрыты изоляцией;
- осмотреть и, при необходимости, расходить приводы клапанов арматуры котла и его трубопроводов, опробовать аварийные приводы с палубы;
- произвести наружный осмотр водоуказательных приборов и убедиться в отсутствии их повреждений; проверить свободный ход клапанов и их приводов;
- убедиться в отсутствии повреждений манометров и остальных контрольно-измерительных приборов (КИП), наличии на них пломб и отметок о сроках проверок;
- проверить освещение (нормальное и аварийное) всех КИП и, прежде всего, водоуказательных приборов;
- осмотреть изоляцию котла; убедиться в правильной установке всех съемных щитов.

При подготовке к действию котельных вентиляторов необходимо:

- проверить действие заслонок газоходов и воздуховодов, оставив их открытыми;
- заслонки перед форсунками на топочном фронте закрыть;
- если производился ремонт котла со вскрытием обшивки, пустить котельный вентилятор, проверить воздушную плотность котла, обратив

внимание на уплотнения съемных щитов каркаса. Проверить показания напоромеров воздуха перед топочным фронтом и в топке.

6.2. Подготовка питательной системы и заполнение котла водой

Перед заполнением котла водой необходимо:

- осмотреть трубопроводы питания, убедиться в исправности арматуры поочередным закрытием и открытием клапанов;
- проверить действие питательных средств;
- подготовить к работе насос для заполнения котла водой и дозировочные устройства для ввода химических реагентов;
- проверить, открыты ли клапаны к водоуказательным приборам и манометрам;
- проверить количество и качество воды в цистерне питательной воды;
- убедиться, что клапаны питательные на экономайзер, между экономайзером и котлом, разобщительный между котлом и пароперегревателем и другие, предусмотренные Инструкцией по Эксплуатации при заполнении котла водой, открыты;

Если перед заполнением котла водой вскрывались крышки лазов и лючков, то их уплотнительные прокладки следует тщательно осмотреть и, при необходимости, заменить.

Котёл должен заполняться дистиллятом, пресной водой или конденсатом, по возможности, тёплыми, характеристики которых соответствуют установленному для котла водному режиму, с одновременным внесением химических реагентов в соответствии с Инструкцией по Эксплуатации котла. Разность температур воды и стенок котла не должна превышать 30^0С.

При заполнении водой должен быть открыт воздушный клапан (при отсутствии – клапан продувания манометра или клапан к свистку), а также клапан продувания выходного коллектора (секции) пароперегревателя.

Пароперегреватели и экономайзеры должны заполняться водой, если Инструкция по Эксплуатации не содержит специальных требований.

Допускается при заполнении котла водой пропуски лючковых и лазовых затворов, а также арматуры, устранять обжатием крышек и сальников без осушения котла.

Уровень воды в котле перед разводкой, если отсутствуют специальные указания в Инструкции по Эксплуатации, должен устанавливаться:

- для водотрубных котлов с естественной циркуляцией при наличии не зависящего от котла питательного средства – несколько ниже рабочего, но не ниже наинизшего допустимого уровня по водоуказательному прибору;

- для водотрубных котлов с естественной циркуляцией при отсутствии не зависящего от котла питательного средства – несколько выше рабочего, но не выше наивысшего допустимого уровня по водоуказательному прибору;

- для газотрубных котлов, не оборудованных устройствами для принудительной циркуляции воды – на отметке наивысшего допустимого уровня по водоуказательному прибору;

- для всех других котлов – на отметке «рабочий уровень». Рекомендованный уровень устанавливается с учётом дифферента судна.

Если котёл находился на «мокром» хранении и был заполнен водой с характеристиками, соответствующими требованиям водного режима, то достаточно отключить его от расширительного бака, спустить часть воды за нижнюю кромку водоуказательного стекла, осушить трубопроводы пара, а затем довести уровень до рекомендованного, опробовав системы питания котла.

6.3. Подготовка топливной системы

При подготовке топливной системы к действию необходимо:

- произвести внешний осмотр расходных и отстойных топливных цистерн, убедиться в отсутствии подтёков топлива и исправности арматуры;

- спустить отстой, проверить уровень топлива в цистернах и, при необходимости, пополнить их;

- осмотреть топливопроводы, фильтры, клапаны, датчики и форсунки. В форсунках со сменными шайбами установить стояночные распылительные шайбы с соплами равного проходного сечения;

- проверить форсунки на плотность, вести в топку и при закрытых паровых и топливных форсуночных клапанах подсоединить их к трубопроводам; по возможности, прогреть форсунки паром, одновременно вентилируя топку;

- проверить срабатывание быстрозапорных клапанов топливных цистерн, в том числе с помощью дистанционных клапанов; проверить работу дистанционного ручного привода к быстрозапорному топливному клапану топливного блока системы автоматического регулирования давления котла;

- убедиться в наличии исправного электровоспламенителя. При ручном зажигании форсунки подготовить факел (на металлическом прутке длиной не менее 1 м с отбойным диском) и футляр для его гашения;

- подать пар к системе подогрева топлива и подготовить её к работе;

- открыть перепускной клапан на трубопроводе топлива у котлов, ввести в действие топливный насос и топливоподогреватель; заполнить систему подогретым топливом, открыть клапан рециркуляции топлива и прокачать систему до полного вытеснения воздуха и холодного топлива.

В зависимости от сорта топливо следует подогревать:

- в цистернах основного запаса (перед перекачкой из них топлива) – до температуры, обеспечивающей работу топливоперекачивающего насоса;

- в расходных цистернах – до температуры, обеспечивающей паспортное давление, развиваемое топливным (форсуночным) насосом, но ниже температуры вспышки паров топлива в закрытом тигле не менее, чем на 10^0С;

- поступающее к форсункам – до температуры, обеспечивающей вязкость топлива, указанную в Инструкции по Эксплуатации, а при отсутствии указаний – 16 – 26 сСт ($3^0 – 4^0$ ВУ).

По достижении необходимой температуры топлива отрегулировать подачу греющего пара, не допуская резких изменений температуры.

6.4. Подготовка средств автоматизации

В процессе подготовки котла к действию необходимо готовить средства автоматизации, руководствуясь Инструкциями по Эксплуатации, а также следующими общими положениями:

- убедиться в отсутствии повреждений средств автоматизации и их КИП;

- убедиться в том, что регуляторы и их управляющие устройства находятся в положении «ручное управление», а маховики и рукоятки регуляторов давления пара, питания котла, соотношения топливо-воздух в положении полного закрытия (для полностью автоматизированных котлоагрегатов указанная проверка не производится);

- включить питание на ЦПУ, САР и ДАУ, убедиться в возможности их действия, основываясь на указаниях Инструкции по Эксплуатации;

- убедиться в исправности средств защиты, световой и звуковой сигнализации путём включения их в действие (кнопкой, рукояткой);

- проверить открытие запорных клапанов на импульсных трубопроводах от магистралей котла; открыть клапаны на сливных и напорных линиях всех регуляторов; проверить исправность механизмов и устройств, обеспечивающих подачу рабочей среды;

- подать рабочую среду и проверить давление в системе; при подготовке котла после длительного бездействия удалить воздух из трубопроводов и полостей сервомоторов гидравлических систем; проверить плавность хода и отсутствие заеданий поршней сервомоторов и регулирующих клапанов, по шкале указателей хода убедиться в том, что клапаны полностью открываются и закрываются.

Если средства автоматизации готовятся к включению после длительного бездействия, следует предварительно удалить антикоррозионную смазку с наружных частей регуляторов, смазать маслом трущиеся поверхности в рычажных системах и приводах ручного управления.

6.5. Разводка огня и подъём пара

Пуск котла – одна из ответственных операций. ей предшествуют детальный осмотр котла, проверка работоспособности всех элементов и узлов и подготовка его к пуску. Осматривают не только котел, но и все обслуживающие его системы, их арматуру, контрольно-измерительные приборы, средства автоматизации, защиты и управления.

Непосредственно перед зажиганием огня в топке необходимо осмотреть котёл и котельное помещение, в том числе:

- убедиться, что манометры сообщены с котлом, а водоуказательные приборы функционируют нормально;
- осмотреть крепление котла к фундаменту, убедиться в отсутствии препятствий для свободного расширения котла и движения всех его подвижных опор;
- убедиться в том, что в котельном помещении отсутствуют легковоспламеняющиеся материалы, а под котлами – вода, топливо и маслянистые вещества;
- проверить готовность к действию противопожарных средств;
- убедиться, что с дымовых труб сняты крышки или чехлы;
- провентилировать котельное помещение.

Розжиг котлов должен начинаться:

- при наличии пусковой топливной системы – топливом, не требующим подогрева;
- при наличии пара и электроэнергии на судне – основным видом топлива.

В пароводяном коллекторе или сепараторе утилизационного котла уровни воды должны соответствовать инструкциям по эксплуатации. В помещениях котельной убирают посторонние предметы, проверяют исправность противопожарного оборудования, инструментов и приспособлений, необходимых для обслуживания котла. Вентилируют топку и газоходы котла в течение не менее 10 мин, чтобы исключить возможность взрыва смеси горючих газов и воздуха.

Растопку котла производят в такой последовательности. Открывают продувку пароперегревателя для охлаждения его паром, заполняют водой экономайзер, запускают топливный насос, с помощью системы рециркуляции подогревают мазут до 65–70°С и зажигают растопочную форсунку электровоспламенителем. Затем запускают электровентилятор на малую производительность и регулируют размер и форму факела для обеспечения бездымной работы котла. С начала растопки контролируют уровень воды в пароводяном коллекторе, периодически продувая водоуказательные приборы. Продувку ВУП производят до тех пор, пока давление в пароводяном коллекторе не достигнет 0,05–0,1 МПа. После этого продувка ВУП необходима лишь для

прогрева стекол по мере повышения давления и перед включением котла в паропровод.

Если из воздушных клапанов появился пар, то их закрывают и усиливают горение, затем продувают манометры и следят за подъемом давления. Перед включением котла прогревают паропровод до соединения с главной магистралью, которую также заранее прогревают в течение 15–20 мин приоткрытых кранах продувания. Особое внимание при пуске уделяют поддержанию уровня воды в пароводяном коллекторе. Время подъема пара определяется конструктивными характеристиками котла и должно соответствовать инструкции по эксплуатации. По достижении требуемого давления необходимо еще раз проверить уровень воды, удостовериться в нормальном действии ВУП, манометров и предохранительных клапанов; только после этого котел можно соединить с главным паропроводом.

Разводка огня и подъём пара в полностью автоматизированных агрегатах должны осуществляться автоматически по программе после проверки обслуживающих систем при установке органов управления и регуляторов в положение «автоматическая работа» в соответствии с Инструкцией по Эксплуатации.

Перед разводкой огня в котле, автоматический пуск которого не предусмотрен, все управляющие органы должны быть установлены в положение «ручное управление», а маховики и рукоятки регуляторов давления пара, питания котла, соотношения топливо-воздух – в положение полного закрытия. Все защитные и блокировочные устройства. Не препятствующие пуску котла, должны быть включены.

Перед зажиганием форсунок топки должны быть осмотрены и, в случае наличия скопившихся газов, таковые должны быть удалены. Топку необходимо обязательно провентилировать в течение не менее 3 минут, открыв заслонки воздухонаправляющих устройств топочного фронта и включив котельные вентиляторы.

Зажигание первой форсунки производится электровоспламенителем или факелом. Последующие форсунки могут зажигаться от первой.

При зажигании форсунок факелом сначала к форсунке следует подвести факел, а затем открыть топливный клапан. Во время зажигания первой форсунки давление воздуха рекомендуется уменьшить. Котельный машинист во избежание ожога при выбросе пламени из топки должен находиться рядом с клапаном подачи топлива в стороне от окна, в которое вставляется факел.

Если зажигания форсунки не произошло, необходимо немедленно закрыть топливный клапан, обеспечить циркуляцию топлива, контролируя поддержание требуемой температуры; провентилировать топку в течение не менее 3 минут, после чего снова зажечь форсунку от факела. Категорически запрещается разжигать форсунку от раскалённой кирпичной кладки.

При разводке огня и подъёме пара температура и давление топлива, число, порядок включения и периодичность горения форсунок должны устанавливаться в строгом соответствии с Инструкцией по Эксплуатации. При отсутствии инструкций зажигание форсунок должно производиться в водотрубных котлах – последовательно в соответствии с нумерацией горелок; в газотрубных или газоводотрубных котлах с тремя или четырьмя топками – одновременно в двух крайних или в нижних топках; в двухтопочных котлах – в обеих топках одновременно.

При разводке огня необходимо тщательно следить за работой форсунок, не допуская подтекания топлива.

Подъём пара в котле следует производить, по возможности, медленно. Минимальная продолжительность подъёма пара с момента зажигания огня в топке и до получения рабочего давления пара в котле не должна быть меньше указанной в Инструкции по Эксплуатации.

Обо всех случаях ускоренного подъёма пара надлежит делать записи в машинном журнале.

Во время подъёма пара необходимо производить осмотр котла с целью обнаружения пропуска воды и пара. Обжатие крышек лазов, лючков, фланцев разрешается производить специальным инструментом и в присутствии механика, в заведовании которого находится котёл, при давлении пара не свыше 0,5 МПа (5 кгс/см^2) без ударов и применения дополнительных рычагов. В случае неустойчивой работы форсунок необходимо прекратить розжиг и устранить неполадки.

При подъёме пара в котле необходимо последовательно производить следующие операции:

- при появлении непрерывной струи пара из воздушного клапана закрыть его; полностью закрыть все паровые клапаны на котле, за исключением клапанов, обеспечивающих проток пара через пароперегреватель;
- в течение всего периода подъёма пара следить за показаниями манометров, за уровнем воды в котле, а также продувать пароперегреватели в соответствии с Инструкцией по Эксплуатации;
- при достижении давления, указанного в Инструкции по Эксплуатации (а при отсутствии указаний – при достижении давлением половинной величины рабочего давления пара), подрывом вручную проверить действие предохранительных клапанов и надёжную их посадку при закрытии. Если предохранительные клапаны не действуют, огонь в топках должен быть потушен, давление в котле снижено до атмосферного, после чего клапаны должны быть вскрыты для устранения дефектов;
- котёл сообщить с паропроводом на вспомогательные механизмы при открытом продувании пароперегревателя;

- при необходимости опробовать в действии вспомогательные механизмы по достижении давления пара, достаточного для их пуска. При наличии расхода пара из котла пустить питательный насос или инжектор, подавая воду в котёл через водоподогреватель и регулируя питание вручную.

Подъём пара считается завершённым по достижении в котле рабочего давления. При этом регулятор питания следует включить в работу в автоматическом режиме.

При включении средств автоматизации в случае неустойчивой работы необходимо удалить воздух из импульсных трубопроводов и полостей или устройств, заполняемых конденсатом; пополнить убыль конденсата. У регуляторов уровня после продувания импульсных трубопроводов до включения их в работу необходима выдержка для самозаполнения их конденсатом.

После достижения рабочего давления пара в котле необходимо произвести верхнюю продувку и проверку действия предохранительных клапанов, водоуказательных приборов, средств питания, пробных клапанов, клапанов нижнего продувания, защит котла.

6.6. Включение котла в работу

Котёл считается действующим с момента подъёма давления пара в нём выше атмосферного

Включение котла в работу на внешние потребители должно производиться только после опробования резервных питательных средств и топливных насосов. Перед включением котла уровень воды в нём не должен превышать рабочего.

При сообщении котла с холодной магистралью необходимо прогревать её не менее 15 минут (в зависимости от длины паропровода), открыв продувание паропровода и приоткрыв разобщительный клапан. Затем следует осмотреть магистраль и убедиться в отсутствии признаков пропусков пара. При отсутствии расхода пара охлаждение пароперегревателя следует производить продуванием коллектора перегретого пара.

Перед увеличением нагрузки котла необходимо в форсунка со сменными шайбами сменить стояночные распылительные шайбы на основные.

При включении котла на параллельную работу с действующим необходимо стронуть разобщительный клапан, по истечении 5 минут слегка приоткрыть его, затем в течение 5 – 10 минут медленно и осторожно открыть на нужную величину. Давление в подключаемом котле должно быть таким же или на 0,05 – 0,1 МПа (0,5 – 1,0 кгс/см^2) выше, чем в паропроводе. Если Инструкцией предусматриваются разводка огня и подъём пара при заполненном водой пароперегревателе, то котёл должен включаться в работу при давлении в нём на 0,05 МПа (0,5 кгс/см^2) ниже, чем в паропроводе.

Включение главного котла в параллельную работу на ходовом режиме должно производиться при открытых клапанах продувания главного паропровода и сниженной нагрузке главного двигателя вплоть до самого малого хода.

После включения котла в работу должны быть включены все системы автоматического и дистанционного управления котлом, а также все устройства сигнализации и защиты, для чего необходимо:

- при установившемся режиме котельной установки перевести регулирующие устройства с ручного на автоматическое управление в соответствии с указаниями Инструкции по Эксплуатации, соблюдая последовательность включения регуляторов и требования пп. 2.2.16:

- установить заданные значения регулируемых параметров при помощи ручного или дистанционного управления регулирующими устройствами;

- проверить поддержание регуляторами заданных значений параметров. Недопустимые отклонения устранить воздействием на задающие устройства соответствующих регуляторов;

- проверить работу вспомогательных механизмов, обслуживающих средства автоматизации.

6.7. Обслуживание паровых котлов

Во время действия котла для его обслуживания должны быть созданы условия для его безопасной и экономичной работы. С этой целью необходимо: поддерживать заданные температуру и уровень воды по ВУП, температуру и давление пара, температуру уходящих газов; обеспечивать бездымное горение при малых коэффициентах избытка воздуха, требуемое качество котловой воды, нормальную работу деаэрационной установки и водоподогревателей; содержать в исправном состоянии форсунки, арматуру, изоляцию котла и паропроводов; своевременно очищать поверхности нагрева с помощью сажеобдувочных устройств, используя результаты замера температур уходящих газов и перегретого пара.

В котле во время работы происходят сложные физико-химические процессы, которые могут вызывать отклонения основных параметров рабочих тел от заданных значений. Например, загрязнение наружной поверхности нагрева влияет на температуру перегретого пар $t_{\text{п.п.}}$. Если отложения сажи находятся на трубных пучках перед пароперегревателем, то $t_{\text{п.п.}}$ будет повышаться, а при загрязнении поверхности ПП – наоборот, понижаться. О загрязнении поверхностей нагрева можно судить и по увеличению температуры уходящих газов. Основное средство борьбы с загрязнением – своевременное применение сажеобдувочных устройств. В нормальных условиях эксплуатации котла сажеобдувку производят один раз в сутки. Снижению $t_{\text{п.п.}}$ способствует и

повышенная влажность пара, поступающего в ПП. Увеличение влажности пара может быть связано с ростом солесодержания котловой воды, ее вспениванием в пароводяном коллекторе и повышением уноса влаги в паросборную трубу. О воздействии этого фактора на $t_{п.п.}$ можно судить по резкому колебанию уровня в ВУП.

Увеличение коэффициента избытка воздуха и приводит к снижению к.п.д. котла. Такое изменение и может быть связано с ухудшением процесса горения, нарушением в системе автоматического регулирования или подсосами воздуха через неплотности внутреннего кожуха.

Наибольшее воздействие на работу котла оказывает изменение расхода топлива и качества его сжигания, а для утилизационных котлов – смена режима работы главного двигателя, что требует соответствующего регулирования элементов и устройств котла, обеспечивающих необходимые количества рабочих сред и их параметры.

За действующим котлом и обслуживающими его механизмами необходимо вести наблюдение по показаниям КИП, сигналам аварийно-предупредительной сигнализации, а также путём осмотров установки. Необходимо периодически контролировать:

- уровень воды в котле;
- давление перегретого, насыщенного и охлаждённого пара;
- температуру перегретого и охлаждённого пара;
- паропроизводительность (при наличии паромеров);
- давление и температуру питательной воды на входе в котёл, температуру воды после экономайзера;
- давление и температуру топлива, давление пара (воздуха) перед форсунками;
- расход топлива и его уровень в расходных цистернах;
- давление и температуру воздуха перед топкой;
- температуру и химический состав уходящих газов (последнее – при наличии газоанализатора);
- химический состав котловой и питательной воды;
- расход воды (по вахтам, суточный).

При работе котла на ручном или полуавтоматическом управлении несение постоянной вахты у котла является обязательным.

Длительная эксплуатация котлов с отключенной системой автоматического регулирования (САР) в целом или отдельных её узлов не допускается. Исключения представляют аварийные случаи и плановые выводы её из эксплуатации для технического обслуживания.

Защита по уровню воды в котле, где она имеется, должна быть включена при всех режимах, в том числе и при разводке огня и подъёме пара.

При ручном и полуавтоматическом управлении главным котлом вахтенный механик по получении сообщения о предстоящем изменении нагрузки должен предупредить об этом вахтенных котельных машинистов (исключения допускаются для случаев аварийной остановки).

При всех режимах работы котлов следует стремиться не допускать подрывов предохранительных клапанов, своевременно принимая меры к снижению давления пара.

6.8. Обслуживание котла при эксплуатации в режимах, отличных от нормальных

При плавании судна в штормовых условиях необходимо поддерживать особо тщательное наблюдение за уровнем воды в котле, который должен колебаться на примерно одинаковую величину относительно отметки «рабочий уровень» в водоуказательных приборах.

В периоды маневров при ручном управлении питанием котла уровень воды должен находиться не выше отметки «рабочий уровень» водоуказательных приборов ввиду опасности уноса воды в пароперегреватель и главный трубопровод.

При внезапном прекращении горения в одном из параллельно работающих котлов следует снизить нагрузку работающих котлов, закрыть стопорный клапан отключившегося котла и принять меры к восстановлению горения.

При внезапной остановке основного потребителя пара и в случае отказа системы автоматического регулирования котлов необходимо принять меры по предотвращению травления пара через предохранительные клапаны, а именно:

- перейти на полуавтоматическое, дистанционное или ручное управление горением; снизить расход топлива, потушив равное количество форсунок в котлах, уменьшить подачу воздуха в топку;
- подпитать котёл до верхней отметки уровня воды в водоуказательных приборах;
- при отсутствии расхода перегретого пара пропускать его через пароохладитель или через систему продувания пароперегревателя;
- восстановить работу системы автоматического регулирования.

При назначении постоянной готовности паровых главных двигателей после ходового режима необходимо:

- сменить распылители форсунок на стояночные и подготовить основные;
- при необходимости, пополнить расходные цистерны;
- при отсутствии расхода перегретого пара пропускать его через пароохладитель или через систему продувания пароперегревателя.

При работе котлов в режиме поддержания пара, если таковой режим не обеспечивается автоматически, необходимо:

- уменьшить количество работающих форсунок, снизив подачу воздуха, топлива и пара на его подогрев;

- в зависимости от конструкции, поддерживать в топке постоянное или периодическое горение;

- периодически во время горения форсунок открывать продувание пароперегревателя, после прекращения горения – закрывать продувание.

В аварийных случаях допускается временная эксплуатация котла с выключенным пароперегревателем. При этом необходимо:

- при отсутствии на главном паропроводе обводного клапана в обход пароперегревателя – заглушить его повреждённые трубы и извлечь разделительную перегородку;

- настроить регулятор питания на поддержание воды в котле на отметке «минимальный уровень»;

- держать открытыми клапаны продувания пароперегревателя и главного паропровода;

- снизить нагрузку парового главного двигателя до пределов, обеспечивающих его безопасную работу на насыщенном паре.

При выходе из строя экономайзера допускается временная эксплуатация котла с выключенным экономайзером. При этом необходимо поддерживать возможно более высокую температуру питательной воды на входе в котёл и держать открытым воздушный клапан экономайзера. При повышении температуры перегретого пара нагрузку котла следует снизить.

6.8. Прекращение работы котла

При полном выводе котла из действия необходимо:

- произвести обдувку всех поверхностей нагрева, если позволяет обстановка;

- перевести котёл на дистанционное или ручное управление и снять нагрузку по пару, затем полностью вывести из действия средства автоматического регулирования и системы сигнализации и защиты;

- произвести верхнее продувание и последующее подпитывание котла, после чего продуть пароперегреватель;

- если котёл не будет осушен, довести щелочное, фосфатное и нитратное число до нормы, указанной в Инструкции по Эксплуатации;

- перевести форсунки на растопочное топливо (при наличии соответствующей системы);

- закрыть пар на подогревателях топлива;

- уменьшить давление топлива и воздуха и последовательно выключить форсунки, одновременно прикрывая заслонки воздухонаправляющих устройств.

В форсунках с продуванием паром сначала прекратить подачу топлива, а затем – после продувания форсунок от остатков топлива – подачу пара и воздуха;

- после выключения последней форсунки остановить топливный насос и выключить подогреватель топлива;

- вывести форсунки из топок для очистки, закрыть отверстия шиберными заслонками, принять меры по предотвращению попадания холодного воздуха в топку;

- разобщить котёл от главной магистрали и магистралей охлаждённого и насыщенного пара;

- открыть клапаны (пробки) для слива гудрона из топки.

Охлаждение котла следует производить, по возможности, медленно. Продолжительность и порядок охлаждения следует выдерживать в соответствии с указаниями Инструкции по Эксплуатации. О продолжительности спуска пара и охлаждения котла должна быть сделана запись в машинном журнале.

До остывания кладки необходимо подпитывать котёл при открытых клапанах продувания пароперегревателя и выполнять все рекомендации заводской инструкции в части поддержания уровня воды и режима продувки.

Если предполагается осушение водяного экономайзера, следует перевести питание в обход его, спустить воду, открыть воздушный клапан и держать его открытым до прекращения выхода пара.

До полного остывания котла необходимо проверить закрытие всех клапанов на нём.

Запрещается открывать лаз в топку до полного остывания котла.

Удаление воды из котла разрешается только после того, как её температура снизится до $+50^0$С.

При кратковременном бездействии длительностью не свыше 24 часов допускается хранить котёл заполненным водой до рабочего уровня, а пароперегреватель и пароохладитель – без воды.

При бездействии свыше 24 часов котёл должен быть поставлен на хранение в соответствии с указаниями Инструкции по Эксплуатации.

В зависимости от цели остановки воду из котла либо удаляют, либо, наоборот, его полностью заполняют деаэрированной водой («мокрое» хранение). При кратковременном бездействии (24 ч – главный котел, до трех суток – вспомогательный или утилизационный) допускается хранить котел в том состоянии, в котором он находился до остановки. При бездействии котла до 30 сут может быть использовано «мокрое» хранение, когда котел заполнен раствором тринатрийфосфата в деаэрированной воде с концентрацией 5 мг на литр. При бездействии котла более 30 суток применяют «сухое» хранение. В этом случае из котла удаляют всю воду, а в коллекторах и камерах устанавливают влагопоглотители из расчета на 1 м^3 их объема 4 кг силикагеля. Крышки лазов и горловин смазывают техническим вазелином и плотно

закрывают. Наружные поверхности котла покрывают антикоррозийной обмазкой (суриком, техническим вазелином и т.п.). Перед постановкой на длительное хранение котел необходимо очистить от накипи и сажи.

6.9. Основные неисправности и средства защиты паровых котлов

При эксплуатации котлов возможны следующие неисправности: упуск воды из котла; попадание забортной воды в котел; вскипание воды в пароводяном коллекторе и заброс ее в главный паропровод; повышение или понижение давления пара и температуры на выходе из ПП; повышение уровня воды в котле выше допустимого; недостаток или значительный избыток воздуха, подаваемого в топку; попадание воды в мазут или его перегрев; разрыв водогрейной трубки; перегрев топочных фронтов; значительная вибрация котла; взрыв газов в топке; пропуски пара и воды через сальники арматуры и фланцевые соединения; возгорание сажи в хвостовых поверхностях нагрева; выход из строя ВУП; отказ в работе системы автоматического управления работой котла и др.

Причинами повреждений и аварий котлов при упуске воды являются: отсутствие должного контроля за показаниями ВУП или их неудовлетворительная рабста, срывы в работе питательных насосов и приборов автоматического поддержания уровня, наличие трещин на поверхностях нагрева, нарушение циркуляции. В случае обнаружения повреждения необходимо немедленно прекратить подачу топлива в топку и вывести котел из действия; подача питательной воды в котел категорически запрещается.

Одной из причин вскипания и забросов воды в паропровод является ее засоление. Увеличение солесодержания котловой воды происходит из-за недостаточного контроля за соблюдением водного режима; повреждения трубок конденсатора, подогревателей забортной воды, испарителей. Следует снизить нагрузку котла, провести его верхнее продувание, довести солесодержание воды до нормы, ввести в воду химические реагенты, а затем увеличить производительность котла. Низкое качество котловой воды, неравномерное распределение тепловой нагрузки по поверхности нагрева на внутренних стенках труб вызывает интенсивное образование накипи, которая способствует перегреву труб. Этот же эффект может вызвать увеличение нагрузки котла выше номинальной (форсирование котла).

Забросы воды возможны и при резком увеличении расхода пара, неисправности сепарирующих устройств, повышенной щелочности воды и загрязнении ее нефтепродуктами. В этом случае снижают расход топлива, паропроизводительность котла и подачу пара в главный паропровод (прикрывают стопорный клапан), устраняют причину неисправности.

Увеличение давления пара связано с резким уменьшением его расхода, повреждением главного стопорного клапана, неисправностью предохранительных клапанов. После остановки котла и закрытия главного стопорного клапана следует подать в котел питательную воду. Падение давления в котле происходит при резком увеличении отбора пара, образовании свищей в трубках, швах коллекторов и камер. При разрыве трубки следует немедленно вывести котел из действия, осуществить расхолаживание и заглушить дефектную трубку; свищи устраняют при первой возможности.

Изменение температуры перегретого пара наблюдается вследствие неисправности регулятора температуры, сепарирующих устройств, пароохладителя, загрязнения поверхностей нагрева, снижения качества распыла топлива форсунками, изменения коэффициента избытка воздуха.

При попадании воды в мазут необходимо спустить воду из расходной цистерны или переключить котел к другой цистерне, так как сгорание обводненного мазута сопровождается вибрацией фронта котла, взрывным горением. Перегрев мазута можно снизить уменьшением подачи пара на топливоподогреватель.

Перегрев топочных фронтов возможен при разрушении обмуровки и прогорании изоляции котла. Требуется вывести котел из действия и устранить дефекты.

Взрывы газов в топке при разводке котла могут сопровождаться выбросом топочных газов, разрывом обшивки и газоходов котла, повреждением кирпичной кладки. Поэтому розжигу котла всегда предшествуют тщательный осмотр и вентиляция топки.

Пропуски пара и воды через сальники арматуры и фланцевые соединения устраняют поджатием или заменой сальниковой набивки и прокладок. Перед обжатием обязательно понижают давление пара до 0,5 МПа.

Загорание сажи в хвостовых поверхностях нагрева (газовые воздухоподогреватели, водяные экономайзеры) возможно вследствие ее интенсивного отложения при малых нагрузках и последующем переходе на номинальный режим работы. В этом случае необходимо прекратить подачу воздуха и топлива в топку и включить сажеобдувочные устройства для непрерывной обдувки труб, усилить подачу воды в ВЭ, а при наличии установок углекислотного тушения пустить в газоход углекислый газ.

Правилами запрещена работа котла хотя бы с одним неисправным предохранительным клапаном или ВУП, а также с неисправными манометрами, фильтрами питательной воды и маслоотделителями, системами верхнего и нижнего продувания, при отсутствии резервного питательного насоса, наличии местных разъеданий металла высоконапряженных элементов котла. Все это может служить причинами взрыва котлов и пожаров в котельных.

6.10. Теплотехнические испытания и обслуживание паровых котлов. Цель и виды теплотехнических испытаний

Теплотехнические испытания котла проводят с тем, чтобы установить соответствие его характеристик техническим условиям на поставку (требованиям заказчика), то есть определить пригодность испытуемого котла для энергетической установки судна. Испытания производят на полной, максимальной, минимальной и частичных нагрузках при ручном и автоматическом управлении.

При испытаниях определяют:

– спецификационные характеристики котла – расход топлива, паропроизводительность, параметры выдаваемого котлом пара, влажность насыщенного пара, коэффициент полезного действия, величину газовоздушных сопротивлений, коэффициент избытка воздуха, а также теплохимические характеристики котла (солесодержание котловой воды, перегретого пара, режим продувки и т.д.);

– надежность работы котла в целом и всех его элементов, о которой судят по температурному режиму элементов, прочности конструкции котла, плотности арматуры и обшивки, качества кирпичной кладки и изоляции, устойчивости процесса горения и поддержания уровня воды в пароводяном коллекторе и т.д.;

– маневренные характеристики котла – продолжительность разводки, подъема и сброса нагрузки, устойчивость параметров пара;

– эксплуатационные особенности котла – удобство, доступность и продолжительность разборки и сборки отдельных частей котла (горловин, лазовых затворов, внутренних частей пароводяного коллектора, коллектора ПП и др.) доступность чистки и осмотров, ремонтопригодность (удобство глушения вышедших из строя трубок, ремонта частей котла, ПП, ВЭ, ВП), эффективность сажеобдувочных устройств, удобство контроля за работой котла.

Теплотехнические испытания осуществляют в два этапа:

1) наладочные – на стенде завода-изготовителя, во время которых отрабатывают все системы управления и защиты, производят отладку процесса горения и водного режима, проверяют соответствие полученных характеристик проектным, готовят котел к сдаточным испытаниям;

2) гарантийно-сдаточные – в условиях, когда всесторонне учитывают особенности работы судовой энергетической установки (СЭУ), для которой предназначен испытуемый котел; эти испытания выполняют при номинальной и максимальной нагрузках, а также на долевых режимах, соответствующих 25-, 50-, 75-и 100%-ной нагрузкам по расходу топлива. Теплотехнические испытания утилизационных котлов проводят во время испытаний СЭУ.

Наладочным испытаниям предшествуют детальные осмотры котла и обслуживающих его систем, а также паровая проба. Ее цель – проверка

плотности и прочности котла и отдельных его частей, а также деформации элементов котла при постепенном прогревании. По результатам паровой пробы настраивают предохранительные клапаны.

До начала сдаточных испытаний котел должен проработать без чистки не менее 50 ч. На основе результатов сдаточных испытаний окончательно устанавливают все характеристики котла и корректируют документацию; технические условия на поставку, технический формуляр, описание и инструкции по эксплуатации.

Схема стендовой установки для проведения теплотехнических и теплохимических испытаний показана на рис. 6.1.

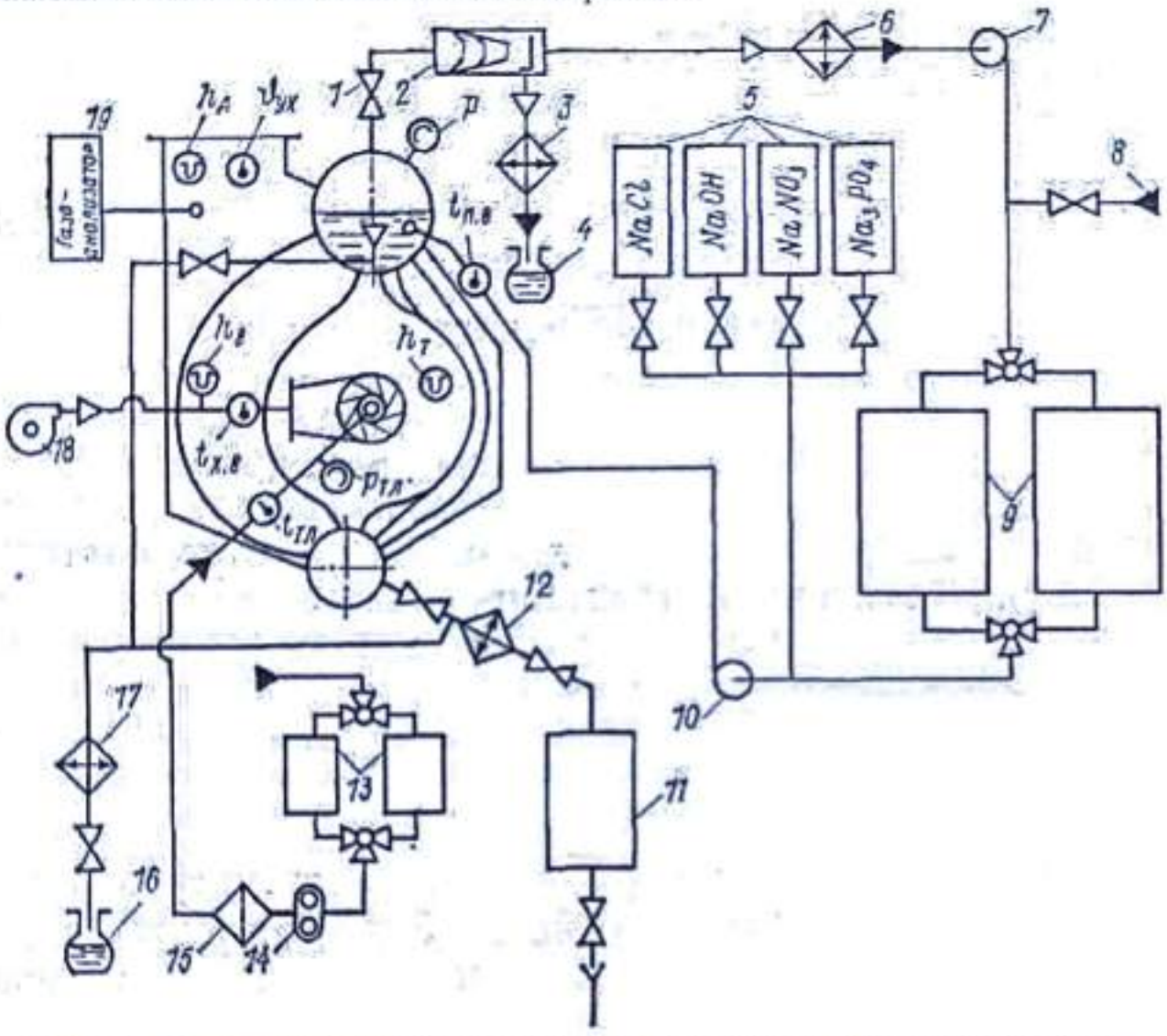


Рис. 6.1. Принципиальная схема стенда для проведения теплотехнических и теплохимических испытаний котлов

Условные обозначения приборов:

p, $p_{тл}$ - пружинный манометр для замера давлений пара, топлива.

U- образный нанометр для замера статических давлений в воздушном коробе h_B, топке h_T, в дымоходе h_A.

Термометры (термопары) для измерения температур воздуха $t_{х.в.}$, уходящих газов $t_{ух.г.}$.

Пар из пароводяного коллектора котла *1* поступает через дроссельно-увлажнительное устройство *2* в конденсатор *6*, откуда конденсатный насос *7* направляет конденсат в мерные баки *9*. Обычно один бак наполняют, а из другого насосом *10* осуществляется питание котла. Стрелкой *5* отмечена подпитка котла добавочной водой. Для возможности изменения химического состава котловой воды имеются мерные баки *5*, которые заполнены растворами различных химических реагентов. Подача реагентов может осуществляться и непосредственно в котел специальными дозаторами-вытеснителями.

Для обеспечения котла топливом и замера его расхода имеются мерные топливные баки *13*, один из которых заполнен топливом, а из другого топливо подается через фильтры *15* насосом *14* к форсунке. При работе котла на мазутах и моторных топливах используется топливоподогреватель и система рециркуляции для предварительного подогрева топлива до температуры 65–75°С. Воздух в котел поступает от вентилятора *18*.

На главном паропроводе установлено пароотборное устройство, из которого проба пара направляется в конденсатор *3*. Полученный конденсат поступает непосредственно в солемер, либо в колбу *4* и далее – в лабораторию для химического анализа. Результаты анализа позволяет определить влажность пара. Отбор проб котловой воды осуществляется через холодильник *17*, из которого охлажденная вода сливается в сосуд *16* для дальнейшего химического анализа. Состав продуктов сгорания определяют с помощью газоанализатора. Эти данные используют для расчета коэффициента избытка воздуха. Вода, удаленная из котла при верхнем и нижнем продувании, через холодильник *12*поступает в мерную емкость *11*. Параметры пара, питательной воды, воздуха, продуктов

сгорания измеряют с помощью приборов, часть которых имеют устройства для автоматической записи показаний. Для того чтобы определить теплотехнические и эксплуатационные характеристики котла в широком диапазоне нагрузок, проводят его балансовые испытания при стационарном режиме работы.

Паропроизводительность котла определяют по расходу питательной воды при неизменном уровне воды в пароводяном коллекторе и плотно закрытых клапанах верхнего и нижнего продувания, в этих условиях $D = D_{\text{п.в.}}$.

Расходы питательной воды и топлива измеряют с помощью заранее тарированных мерных баков. Для этого необходимо замерить изменение уровня L_h воды (топлива) в баке за время τ.

Тогда расход питательной воды (топлива) можно рассчитать по формуле:

$$D(D) = k\Delta h\rho/\tau$$

где k – тарировочный коэффициент, численно равный объему, соответствующему единице шкалы указателя уровня;

ρ – плотность воды (топлива).

Расход пара определяют также с помощью расходомерных диафрагм, установленных на главном паропроводе. Температуру воды, топлива, воздуха измеряют техническими ртутными термометрами, а температуру уходящих газов – термопарами; давление пара, питательной воды и топлива – пружинными манометрами, а давление в газовоздушном тракте – U-образными водяными манометрами. Показания всех приборов стенда фиксируют по общему сигналу через 10–15 мин. Продолжительность выхода на стационарный режим – 2 ч. Режим считают стационарным (установившимся), если показания приборов, измеряющих основные параметры, не выходят за пределы допускаемых отклонений от среднего значения. При измерениях допускаются отклонения: давление пара ±0,02 МПа, давления газов и воздуха ±20 Па; температура питательной воды и уходящих газов ±5°С. Средние значения показаний приборов во времени находят как среднеарифметические за время испытаний. В расчет не принимают значения, отличающиеся от среднего, более допустимого. Если число таких показаний превышает 17% общего числа произведенных замеров, то опыт повторяют.

К.П.Д. котла определяют по формуле $\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_5)$ и $q_2 = 100 - (\eta + q_3 + q_5)$ – тепловые потери с уходящими газами, от химического недожога q_3 формулам $q_3 = Q_3 / Q_p^p 100$, а потери в окружающую среду q_5, рассчитывают по уравнению теплового баланса

Для расчета коэффициента избытка воздуха α используют данные газового анализа и расчетные зависимости $\alpha = L_A / L_0$ - отношение действительного количества воздуха, подводимого в топку для сгорания 1 кг топлива, к теоретически необходимому количеству. По результатам испытаний строят графики (Рис. 6.2.), представляющие собой зависимости $\eta, q_2, q_3, \alpha, D, t_{\text{п.п.}}, Q_{\text{ух}}$ от расхода топлива B. Такой полный объем испытаний предназначен для вновь разработанных котлов. Для серийных образцов объем испытаний может быть сокращен, что предусматривается специальными программами.

Высокоэкономичная и безопасная эксплуатация котла на судне может быть обеспечена при условии выполнения всех требований Классификационного общества, который осуществляет надзор за их реализацией. Этот надзор начинается с рассмотрения технической документации, чертежей, расчетов, технологических карт и т. д. Надзору подлежат все главные, вспомогательные и утилизационные котлы, их перегреватели, экономайзеры с рабочим давлением 0,07 МПа и более.

Первоначальное освидетельствование проводят для того, чтобы установить возможность присвоения класса судну (при этом учитывают техническое состояние и год постройки судна, механизмов, в том числе и котлов);

- очередное – чтобы возобновить класс судну и проверить соответствие технического состояния механического оборудования и котлов требованиям Классификационного общества;

- ежегодное – освидетельствование необходимо для контроля работы механизмов и котлов. После ремонта или аварии судно проходит внеочередное освидетельствование. Во время освидетельствований представитель Классификационного общества может производить внутренние и наружные осмотры, гидравлические испытания котлов, регулировку и проверку на срабатывание предохранительных клапанов; осмотр средств подготовки и подачи питательной воды, топлива и воздуха, арматуры, контрольно-измерительных приборов, систем автоматики; проверку срабатывания защиты и т.д.

Пробные давления гидравлических испытаний составляют обычно $p_{пр} = 1{,}5p_р$, но не меньше, чем $p_р = +0{,}1$ МПа ($p_р$ – рабочее давление). Для пароперегревателей и их элементов $p_{пр} = 1{,}5p_р\sigma_т^{350}/\sigma_T^t$ если они работают при температуре t, равной 350°С и выше.

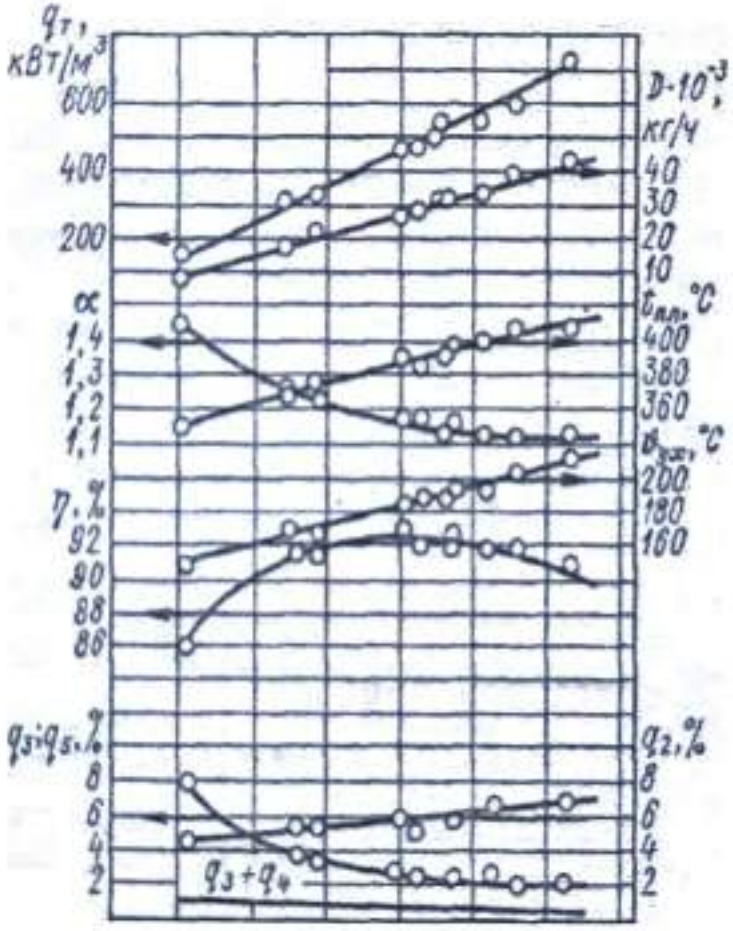


Рис. 6.2. Характеристики котла

Паровой котел и его элементы (ПП, ВЭ и ПО) выдерживают при пробном давлении в течение 10 мин, затем давление снижают до рабочего и продолжают осмотр котла и его арматуры. Гидравлические испытания считаются успешными, если пробное давление в течение 10 мин не снижалось, а при осмот-

ре не обнаружены течи, видимые изменения формы и остаточные деформации деталей котла.

Регулировка предохранительных клапанов должна быть выполнена на следующие давления открытия: для p_p<1 МПа; $p_{откр} \leq 1{,}03p_p$ для $p_p > 1$МПа. Максимальное давление при действии предохранительного клапана $p_{max} \leq 1{,}1\ p_p$.

При освидетельствовании производят наружные осмотры котлов вместе с трубопроводами, арматурой, механизмами и системами при рабочем давлении пара.

6.11. Водный режим паровых котлов. Водоподготовка

Эффективность работы энергетической установки и ее эксплуатационная надежность зависят от качества используемой котлом воды.

Различают котловую, питательную и добавочную воды. Вода, циркулирующая в котле, называется *котловой*, а подаваемая в котел в процессе его работы – *питательной*. В качестве питательной воды обычно используют конденсат пара, который отработал в турбине и паровых вспомогательных механизмах. С этой целью конденсат собирается и возвращается в паровой Котел, таким образом, цикл использования воды поддерживается замкнутым. Для восполнения утечек пара и воды в замкнутый цикл вводят *добавочную* воду (дистиллят), приготовляемую в испарительных установках из морской воды.

В котловой воде при ее испарении накапливаются соли, которые поступают в котел с питательной водой и не покидают его вместе с уходящим из котла паром. Повышение концентрации раствора солей в котловой воде приводит к появлению на внутренних поверхностях нагрева плотной или рыхлой накипи. Из-за образовавшейся в трубах накипи, имеющей сравнительно низкую теплопроводность, ухудшается охлаждение труб изнутри, они могут перегреться («перегореть») и потерять прочность, что, как правило, приводит к их разрыву.

Водный режим котлов необходимо организовать так, чтобы все соли, попавшие в котел с питательной водой и склонные к накипеобразованию, выделялись в воде только в виде легкоподвижного неприкипающего шлама, то есть взвесей, удаляемых из котла с продуваемой периодически или непрерывно водой. Процесс периодического или непрерывного продувания котловой воды должен сопровождать работу любого парового котла, чтобы не допустить появления накипи. Образование в котле твердой накипи следует рассматривать как предаварийное состояние.

Под воздействием воды, пара и пароводяной смеси металлическая поверхность нагрева внутри трубы подвергается коррозии. Окислителями в этом процессе являются растворенные в воде кислород и углекислый газ. Коррозия внутренних поверхностей нагрева обусловлена в основном электрохимическими

процессами. При электрохимической коррозии окисление вызвано переходом ионов металла в раствор (котловую воду) и накоплением в металле эквивалентного количества электронов. В результате появляется разность потенциалов и так называемый «коррозионный» ток. Чем больше в воде растворенных примесей, тем больше коррозионный ток и выше скорость коррозии металла.

Если температура стенки выше 250°С, то на ее поверхности образуется плотная оксидная пленка, которая препятствует развитию коррозии. Образованию такой пленки способствует щелочность воды. Кислород и углекислый газ снижают прочность защитной пленки, вызывают появление локальных язвин, особенно в местах соединений отдельных деталей. При значениях температуры более 500°С наблюдается химическая коррозия поверхности нагрева, при которой окислителем является водяной пар.

Наличие примесей в котловой воде способствует набуханию уровня и вспениванию воды в пароводяном коллекторе. В этом случае пар, выходя из коллектора, может захватить и увлечь за собой капельки воды, а вместе с ними и содержащиеся в них соли. Уносимые паром соли в итоге откладываются в пароперегревателе, трубопроводах, арматуре и даже на лопатках турбины, ухудшая их работу.

Для предотвращения уноса влаги и растворенных в ней солей необходимо: 1) погасить в пароводяном коллекторе котла кинетическую энергию струй пароводяной смеси, выходящих из подъемных труб; 2) создать равномерный выход пара через зеркало испарения; 3) обеспечить строго вертикальное движение пара в паровом пространстве с минимально возможной скоростью; 4) осуществить сепарацию пара и промывку его чистой питательной водой.

Первые две задачи решаются путем установки ниже уровня воды в коллекторе дырчатого щита с отверстиями диаметром 10–20 мм. Щит создает дополнительное сопротивление движению пара, способствует образованию паровой подушки, в которой гасится кинетическая энергия пароводяных струй. Третье условие обеспечивается установкой потолочного паросборного дырчатого щита с диаметром отверстий 10 мм, выравнивающего сбор пара по длине коллектора. Четвертая задача выполняется путем размещения в паровом пространстве коллектора сепарационного устройства и специального щита, образующего каскад воды. На щит подают около половины вводимой в коллектор питательной воды, которая растекается по его поверхности ровным слоем. Пар подается под щит и проходит через слой стекающей питательной воды. При этом капли котловой воды, содержавшиеся в паре, уносятся питательной водой. Вместо них пар захватывает капли питательной воды, в которой солей значительно меньше, и направляется в сепаратор, где отделяется от влаги. В итоге пар, выходящий из коллектора котла, очищается. Специальная химическая служба контролирует чистоту пара отбором проб.

Для обеспечения надежной работы котла производят вне- и внутрикотловую обработку воды, продувку котла и сепарацию пара.

Требования к качеству котловой воды зависят от назначения котла и рабочего давления пара. Основными показателями качества воды являются: общее солесодержание, содержание хлоридов, общая жесткость, щелочность, щелочное, фосфатное и нитратное числа, концентрация водородных ионов, содержание газов.

Общим солесодержанием называется сумма всех содержащихся в воде солей в миллиграммах на 1 кг воды (мг/кг). Содержание хлоридов (хлористых солей NaCl, MgCl, CaCl и др.) выражают в миллиграммах хлориона в 1 кг воды.

Общая жесткость определяется количеством растворенных в воде солей кальция и магния, которые являются основными накипеобразующими веществами. Количественно жесткость характеризуется суммарной концентрацией ионов кальция и магния, выраженной в миллиграмм-эквивалентах на 1 кг воды (мг-экв/кг). Миллиграмм-эквивалент – это количество вещества, соответствующее его атомной массе. Принятый за единицу жесткости 1 мг-экв/кг соответствует содержанию 0,02 мг кальция и 0,012 мг магния в 1 кг воды.

Щелочность воды обусловлена введением в нее химических соединений (реагентов) с целью уменьшения жесткости, а следовательно, накипеобразования. Показателем щелочности служит щелочное число, под которым понимают количество кислоты, необходимой для нейтрализации раствора, пересчитанное на концентрацию щелочи NaOH в мг/кг воды. О щелочности воды можно судить также по фосфатному и нитратному числам и концентрации водородных ионов. Фосфатное число характеризует количество фосфорного ангидрида PO_4 , а нитратное – содержание в воде $NaNO_3$ в мг/кг. Концентрацию водородных ионов определяет водородный показатель pH. Чистая нейтральная вода при температуре 22°С имеет pH = 7. Если pH < 7, то вода имеет щелочную реакцию; если pH > 7, то кислотную.

Содержание газов показывает концентрацию в воде кислорода и углекислого газа в мг/кг. Кислород – основной коррозионный агент, вызывающий коррозию поверхностей нагрева котла. Углекислый газ способствует активизации коррозионных процессов, влияет на процессы водоподготовки. Растворимость газов в воде зависит от давления газа над водой и температуры воды. С ростом давления растворимость газов в воде повышается, а с увеличением температуры – уменьшается. При кипении воды растворимость кислорода стремится к нулю.

Нормы качества воды для котлов морских судов приведены в табл.6.1. Таким образом, основные задачи водоподготовки и водного режима котлов заключаются в устранении накипеобразования, снижении коррозионного воздействия, уменьшении солевого уноса.

Таблица 6.1. Показатели качества воды для судовых паровых котлов

Вода	Показатели качества	Рабочее давление пара, МПа				
		Огнетрубные	Вспомогательные, утилизационные, водотрубные	Главные водотрубные		
		≤ 2		2 – 4	4 – 6	6 – 9
Питательная	Общая жесткость, мг-экв/кг	0,5	0,3	0,02	0,002	0,001
	Содержание O_2, кг/кг	Не нормируется	–	0,05	0,03	0,02
	Содержание масла, нефтепродуктов, мг/кг	3	3	–	–	–
Конденсат	Содержание хлорионов, мг/кг	10	10	2	0,2	0,1
Добавочная (дистиллят)	Общая жесткость, кг-экв/кг	–	0,05	0,02	0,001	0,001
Котловая	Общее солесодержание, мг/кг	13 000	3000	2000	300	250
	Содержание хлорионов, мг/кг	8000	1200	500	30	30
	Щелочное число по NaOH, мг/кг	150–200	150–200	100 – 150	10–30	10–15
	Фосфатное число, мг/кг	10–30	10–30	20–40	30–50	10–20
	Нитратное число, мг/кг	75–100	75–100	50–75	5–15	–

Методы предотвращения накипеобразования и коррозии

Чтобы исключить накипеобразование на поверхностях нагрева котла и коррозию элементов пароводяного тракта при их эксплуатации, осуществляется обработка воды, называемая в зависимости от места ее проведения внекотловой или внутрикотловой.

Внекотловая обработка производится перед подачей воды в котел и сводится к очистке и фильтрации конденсата, умягчению питательной воды, удалению из нее газов, приготовлению высококачественной добавочной воды.

Очистка и фильтрация воды предназначены для удаления из нее механических примесей и нефтепродуктов. Последние могут попасть в питательную воду через неплотности змеевиков систем обогрева топливных и масляных цистерн, грузовых танков, подогревателей, а также с конденсатом отработавшего пара поршневых насосов. Для котлов с давлением пара более 2 МПа наличие масла в питательной воде не допускается. Поэтому для обогрева нефтепродуктов и работы поршневых паровых механизмов используют пар автономного цикла, который производится в испарителе грязных конденсатов (ИГК). Если по какой-либо причине нефтепродукты все же попадут в котел с рабочим давлением пара более 2 МПа, то котел необходимо немедленно вывести из действия.

Очистку питательной воды от механических примесей и масла осуществляют в сборнике грязных конденсатов, называемом «теплым ящиком», снабженным отстойными камерами и фильтрами. В качестве фильтрующих материалов используют кокс, пеньку, древесную стружку, поролон, ткань, а для удаления масла, находящегося в воде в виде эмульсии, – активированный уголь. Кроме того, на напорной магистрали питательного насоса иногда устанавливают сетчатый фильтр, обтянутый фланелью.

Для удаления из воды кислорода и углекислого газа широко используют термическую деаэрацию, производимую в теплообменном аппарате смесительного типа – деаэраторе. Термическая деаэрация основана на принципе снижения растворимости газов в воде при ее нагревании и снижении давления. В деаэраторе питательная вода за счет смешения с греющим паром нагревается до кипения, что способствует интенсивному выделению из нее газов, которые затем отводятся в атмосферу. В дополнение к термической деаэрации иногда предусматривают химические способы дегазации: удаление газов, например, путем связывания кислорода при введении в воду химических реагентов – сульфита натрия или гидразина. Термическая деаэрация позволяет снизить содержание кислорода в воде примерно до 0,03–0,05 мг/кг, а химическая – даже до 0,01 мг/кг.

Умягчение питательной воды, то есть освобождение ее от солей жесткости, может быть выполнено с помощью ионитных или катионитовых фильтров, в которых реализуется метод ионного обмена, основанный на способности ионитов обменивать свои ионы на ионы кальция и магния, содержащиеся в воде. Этот метод не нашел широкого распространения на морских судах, так как при

его использовании необходимо значительно усложнить конструкцию установки, а также требуются запас ионитов и расход пресной воды при регенерации фильтров.

В настоящее время получают распространение безреагентные методы умягчения воды и в первую очередь магнитный (электромагнитный) способ. Сущность его заключается в следующем. После воздействия на воду магнитного поля определенных значений напряженности и полярности соли жесткости теряют способность к образованию накипи и выпадают в виде шлама. Магнитная обработка воды способствует и разрушению ранее образованной старой накипи, но не обеспечивает полного к устранения накипеобразования.

Внутрикотловая обработка воды осуществляется введением в котел присадок, вызывающих выпадение накипеобразующих солей в виде рыхлого неприкипающего шлама, который легко удаляется при продувках воды из котла.

Процессы накипе- и шламообразования очень сложны. Соли, кристаллизующиеся на поверхности нагрева и образующие накипь, с течением времени могут превращаться в шлам. Не удаленный при продувках котла шлам, в свою очередь, может прикипеть к поверхности нагрева, образовав так называемую вторичную накипь.

Внутрикотловая обработка воды заключается в постоянной корректировке состава котловой воды путем ввода противонакипных и противокоррозионных реагентов с последующими периодическими продувками.

В котлах с давлением пара менее 2 МПа применяют щелочно-фосфатный режим внутрикотловой обработки воды. Присадкой служит противонакипин, в состав которого входят едкий натр, кальцинированная сода и тринатрийфосфат. Щелочи, содержащиеся в реагенте, вступают в реакцию с солями жесткости, образуя соединение, которое выпадает из котловой воды в неприкипающий осадок. Щелочность воды при использовании противонакипина увеличивается. Вода может стать коррозионно-активной средой, приводящей к коррозионному разрушению металла. Это явление называется щелочной хрупкостью.

Для предотвращения щелочной хрупкости в котлах с рабочим давлением до 6 МПа применяют фосфатно-нитратный режим водообработки. В этом случае кроме противонакипина вводят нитрат натрия (селитру). Селитра способствует образованию защитной пленки (пассивации металла) на внутренних стенках котла.

При давлениях пара в котле более 6 МПа нитрат натрия разлагается, поэтому в таких котлах применяют фосфатный режим водообработки. В этом случае присадкой служит тринатрийфосфат, для снижения расхода которого предъявляют высокие требования к качеству питательной воды, к содержанию в

ней кислорода, хлоридов, солей жесткости и других примесей. Фосфатный режим не предотвращает образования железистых и меднистых накипей, характерных для котлов с высоким давлением пара. Поэтому содержание железа и меди в питательной воде не должно превышать соответственно 0,1 и 0,05 мг/кг. Эффективным средством борьбы с железно-кислыми накипями является гидразин.

Присадки вводят в котловую воду с помощью дозерной установки, в которую входят бак для раствора присадки и насос, подающий подготовленный раствор по отдельному трубопроводу в питательную магистраль котла.

Количество солей в котловой воде при эксплуатации котла благодаря непрерывной продувке не изменяется. С продувкой удаляют то количество солей, которое вносится в котел с питательной водой, то есть поддерживается равенство (без учета уноса солей с паром)

$$D_{\text{пр}} S_{\text{пр}} = D_{\text{п.в}} S_{\text{п.в}}$$

где $D_{\text{пр}} D_{\text{п.в}} = D + D_{\text{пр}}$ - расходы продуваемой и питательной воды;

D - паропроизводительность котла;

$S_{\text{пр}}$ и $S_{\text{п.в}}$ - солесодержание котловой (продуваемой) и питательной воды.

Из уравнения солевого баланса следует, что относительный расход $D_{\text{пр}} = D_{\text{пр}}/D$ продуваемой котловой воды равен, %,

$$D_{\text{пр}} = 100/(\frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{п.в.}}} - 1)$$

Обычно $D_{\text{пр}} = 0{,}5 \div 5\%$.

Таким образом, продувка котла увеличивает расход питательной воды и тепловые потери.

Химический состав котловой воды определяют на основе химического анализа проб воды, взятых во время работы котла. Анализ производят с помощью переносных химических экспресс-лабораторий. По полученным данным рассчитывают количество химических реагентов для ввода в котел и корректируют режим продувок. Дозировку присадок регулируют по результатам расчетов в соответствии с инструкциями службы судового хозяйства.

6.12. Предотвращение пожаров и несчастных случаев при эксплуатации котельной установки

Пожар в машинно-котельном отделении представляет особую опасность вследствие чрезвычайно высокой скорости распространения огня из-за наличия отходов горюче-смазочных материалов в льялах, топлива в поддонах котла и районе расположения аппаратуры топливных систем.

Во избежание пожара необходимо в точности соблюдать требования Правил пожарной безопасности. Так, в машинно-котельном отделении (МКО) запрещается размещение горючих и огнеопасных материалов (дерева, емкостей с бензином и другими горючими жидкостями и т.п.). Промасленную ветошь следует хранить в специальных металлических ящиках и удалять в конце каждой вахты. Необходимо поддерживать чистоту в МКО, содержать в исправности дистанционные приводы клапанов топливных систем, другой арматуры, изоляцию горячих поверхностей. Запрещено загромождать проходы, сушить одежду на горячих поверхностях котлов и трубопроводов, а также сжигать в топках котлов ветошь, бумагу и другие горючие отходы, если котел не имеет специальных устройств для этого. Стены для разборки и испытаний форсунок должны размещаться, по возможности, дальше от котлов. Особенно тщательно необходимо следить за чистотой стендов, своевременно чистить поддоны котлов (не реже 1 раза за вахту).

Пожар может возникнуть по причине возгорания топлива, скапливающегося на поде топки или в воздушном коробе вследствие подтекания форсунок. Поэтому прежде, чем разжигать котел, необходимо внимательно осмотреть топку и воздушный короб и, при обнаружении протечек топлива, принять меры для их устранения. При ручном розжиге котла факелом необходимо иметь наготове специальный стакан для его тушения, причем стакан должен быть всегда чистым.

Возникновению пожара в МКО способствуют также любые неисправности котла, когда возможны протечки топлива или выброс горячих газов из топки или газохода. Особенно опасны в этом отношении случаи возгорания сажи в газоходе котла, взрывы в топке или газоходе, разливы топлива из цистерн, упуски воды в котле. Практически во всех перечисленных случаях возникают аварийные ситуации, чреватые возникновением пожаров.

При возникновении пожара личный состав вахты должен действовать в соответствии с расписанием по тревоге. Однако, в любом случае, человек, обнаруживший очаг пожара, должен попытаться потушить его переносными средствами тушения, а если это не удается, то принять меры по ограничению распространения огня; по распоряжению капитана или старшего механика немедленно вывести котел из действия, эвакуировать людей из МО и загерметизировать его, после чего включить стационарные системы тушения пожара, выполняя указания инструкций.

В каждом котельном отделении должен быть отдельный выход на палубу с шириной трапа не менее 540 мм и отклонением от вертикали не менее чем 30°.

Правила техники безопасности предъявляют высокие требования к устройству и оборудованию машинно-котельного отделения, а также к обслуживающему котел персоналу, небрежность или неосторожность которого может подвергнуть опасности не только их самих, но и все судно.

К работе в котельном отделении допускаются лица, достигшие 18-летнего возраста, прошедшие медицинский осмотр и имеющие свидетельство на право обслуживать паровые котлы. Во время вахты они должны носить спецодежду и обувь на кожаной подошве.

Правила безопасности труда при эксплуатации котельной установки должны выполняться столь же неукоснительно, как и правила пожарной безопасности. Это обусловлено тем, что котел является объектом повышенной опасности с точки зрения безопасности обслуживания (взрывы в топке, выбросы пламени и горячих газов, утечки горячей воды, пара и топлива, токсичность наружных отложений и т.п.).

Главными направлениями в борьбе с несчастными случаями при обслуживании котельной установки являются поддержание в исправности оборудования и строгое соблюдение инструкций по техническому использованию и обслуживанию. Общие требования безопасности труда сводятся к следующим:

- температура наружной поверхности изоляции дымоходов, паропроводов, обшивки котла не должна превышать +60°С;

- общая освещенность машинного отделения должна быть не ниже 60 люкс.

Ношение обуви на резиновой подошве в МКО запрещено. Поддержание постоянной чистоты в МКО – непременное условие комфорта и безопасности работ.

При производстве работ в МКО необходимо выполнять следующие правила. Вскрытие люков и горловин допускается только с разрешения старшего механика после того, как котел осушен и охлажден, надежно отключен от действующих котлов разобщительными клапанами, на которых вывешиваются таблички с надписями «Не открывать! В котле люди!». Доступ в коллектор и барабан котла разрешается только после тщательной их вентиляции и снижения температуры металлических поверхностей до +50°С. При выполнении работ в котле рядом с горловинами и лазами должен находиться человек, наблюдающий за работающими. Перед закрытием горловин тщательно проверяют нет ли в котле людей.

Перед производством работ в топке ее тщательно вентилируют, затем закрывают шиберы топочных устройств для уменьшения сквозняка, ломиками обваливают кирпичную кладку в тех местах, где она может обвалиться сама и травмировать людей. Одежда должна быть наглухо застегнута с целью предотвращения попадания токсичной пыли на кожу. При очистке поверхностей нагрева обязательно использование очков, а при необходимости и респираторов. При работах с токсичными химическими реагентами следует строго соблюдать инструкции. Выполнять работы по ремонту арматуры на трубопроводах, находящихся под давлением, строго запрещается.

К работе в котельном отделении допускаются лица, достигшие 18-летнего возраста, прошедшие медицинский осмотр и имеющие свидетельство на право обслуживать паровые котлы. Во время вахты они должны носить спецодежду и обувь на кожаной подошве.

Правила безопасности труда при эксплуатации котельной установки должны выполняться столь же неукоснительно, как и правила пожарной безопасности. Это обусловлено тем, что котел является объектом повышенной опасности с точки зрения безопасности обслуживания (взрывы в топке, выбросы пламени и горячих газов, утечки горячей воды, пара и топлива, токсичность наружных отложений и т.п.).

Главными направлениями в борьбе с несчастными случаями при обслуживании котельной установки являются поддержание в исправности оборудования и строгое соблюдение инструкций по техническому использованию и обслуживанию. Общие требования безопасности труда сводятся к следующим:

- температура наружной поверхности изоляции дымоходов, паропроводов, обшивки котла не должна превышать +60°С;

- общая освещенность машинного отделения должна быть не ниже 60 люкс.

Ношение обуви на резиновой подошве в МКО запрещено. Поддержание постоянной чистоты в МКО – непременное условие комфорта и безопасности работ.

При производстве работ в МКО необходимо выполнять следующие правила. Вскрытие люков и горловин допускается только с разрешения старшего механика после того, как котел осушен и охлажден, надежно отключен от действующих котлов разобщительными клапанами, на которых вывешиваются таблички с надписями «Не открывать! В котле люди!». Доступ в коллектор и барабан котла разрешается только после тщательной их вентиляции и снижения температуры металлических поверхностей до +50°С. При выполнении работ в котле рядом с горловинами и лазами должен находиться человек, наблюдающий за работающими. Перед закрытием горловин тщательно проверяют нет ли в котле людей.

Перед производством работ в топке ее тщательно вентилируют, затем закрывают шиберы топочных устройств для уменьшения сквозняка, ломиками обваливают кирпичную кладку в тех местах, где она может обвалиться сама и травмировать людей. Одежда должна быть наглухо застегнута с целью предотвращения попадания токсичной пыли на кожу. При очистке поверхностей нагрева обязательно использование очков, а при необходимости и респираторов. При работах с токсичными химическими реагентами следует строго соблюдать инструкции. Выполнять работы по ремонту арматуры на трубопроводах, находящихся под давлением, строго запрещается.

Особое внимание безопасности следует уделять при розжиге котла, так как на этой стадии возможен выброс пламени через смотровые окна, отверстия для факела и щели в обшивке. Опыт эксплуатации котлов с агрегированными топочными устройствами свидетельствует о частых случаях ожогов лица и повреждения глаз в момент зажигания огня в топке.

Правила техники безопасности запрещают:

- затягивать гайки на элементах котлов и паропроводах под давлением (исключение – гайки, ослабленные при разводке паров);

- выполнять ремонтные работы с ударами и сверлением, открывать крышки люков и лазов на котле, не отключенном от действующих котлов;

- проникать в котел, если на всех трубах, соединяющих его с другими котлами, нет заглушек, замков на разобщительных клапанах и плакатов «В котле люди»;

- использовать в пароводяном коллекторе или топке котла электрические лампы напряжением выше 24 В;

- работать во внутреннем пространстве котла при температуре выше 50°С без предварительной вентиляции и вахтенного у люка котла, наблюдающего за теми, кто работает внутри;

Все ремонтные работы следует производить под руководством и при участии вахтенного или старшего механика.

Котел не разрешается вводить в действие, если обнаружены: течь в коллекторах, камерах или трубах; неисправность питательных средств, отсутствие или неисправность хотя бы одного предохранительного клапана, водоуказательного прибора или манометра; неисправность клапана нижнего продувания, а также, если число неисправных или заглушённых труб превышает 10% их общего числа.

Для предохранения от ожогов и уменьшения тепловых потерь котла дымоходы, паропроводы обязательно изолируют. Температура на поверхности изоляции должна быть не более 60°С.

В заключение следует отметить, что не надо пренебрегать соблюдением рутинных (иногда формальных) действий: проведением инструктажей перед началом работ, ведением журналов по безопасности труда и других нормативных и административных документов. Основные обязанности по обеспечению безопасного обслуживания судовой котельной установки возлагаются на механика по заведованию, а контроль за их выполнение – на старшего механика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусаров А.Б. Особенности устройства и эксплуатации паровых котлов корабельных КТЭУ: учеб. Пособие/ А.Б. Гусаров. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006. – 120с.

2. Енин В.И., Денисенко Н.И., Костылев И.И. Судовые котельные установки: Учеб. для вузов. М.: Транспорт, 1993. – 216с.

3. Газрилов В.С., Гальперин М.М. Управление технической эксплуатацией морского флота. М.: Транспорт, 1987. – 280с.

4. Дементьев К.С., Романов В.А., Турлаков А.С., Д.И. Волков. Проектирование судовых парогенераторов. Л.: Судостроение, 1986. – 336с.

5. Милтон Д.Х., Лич Р.М. Судовые паровые котлы: Пер. с англ. М.: Транспорт, 1985. – 295с.

6. Енин В.И. Судовые паровые котлы. М.: Транспорт, 1984. – 248с.

7. Орехов И.Г. Предотвращение аварий судовых котельных установок. М.: Транспорт, 1982. – 160с.

8. Эйтвид Л.В. Парогенераторы промысловых судов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 232с.

9. Хряпченков А.С. Судовые вспомогательные и утилизационные парогенератеры. Л.: Судостроение, 1979. – 279с.

10. Сыромятников В. Ф. Автоматика как средство диагностики на морских судах. Л.: Судостроение, 1979. – 312с.

11. Денисенко Н.И., Харченко В.Г. Безопасность и надежность судовых котлов. М.: Транспорт, 1978. – 192с.

12. Аэродинамический расчет кегельных установок (нормативный метод). Л.: Энергия, 1977. – 255с.

13. Плаксионов Н.П., Верет е А. Г. Судовые турбинные установки. Изд-во «Транспорт», 1973. – 272с.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «ОДЕССКАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ»
ДУНАЙСКИЙ ИНСТИТУТ

кафедра СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И СИСТЕМ

ПРИЛОЖЕНИЕ

Методические рекомендации по выполнению курсовой работы

по дисциплине "Судовые котельные установки"

Тема: **Тепловой расчет вспомогательного парового котла**

Измаил - 2017

160
УДК 621.18-182.3
ББК 39.455.11

Рекомендовано к печати Ученым советом Дунайского института Национального университета «Одесская морская академия» протокол № 3 от 24.10.2017 г.

Рецензенты:

заведующий кафедры «Судовых энергетических установок и систем» Дунайского института Национального университета «Одесская морская академия» к.т.н., доц. И.З. Маслов

старший преподаватель, кафедры «Судовых энергетических установок и систем» Дунайского института Национального университета «Одесская морская академия», механик первого разряда В.Н. Потапов

Тепловой расчет вспомогательного парового котла [Текст]: методические рекомендации / Лихогляд К.А., Найденов А.И., Разинкин Р.А. – Измаил: ДИ НУ «ОМА», 2017 – 43с.

Основной задачей методических рекомендаций по выполнению курсовой работы по профилирующей дисциплине «Судовые котельные установки», является предоставление преподавателям, курсантам и студентам методической помощи в подготовке и выполнению курсовой работы.

© Дунайський институт Национального университета «Одесская морская академия»

СОДЕРЖАНИЕ

ВЕДЕНИЕ 162
ПРИМЕР ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА КОТЛА 163
1. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО ПАРОВОДЯНОМУ ТРАКТУ 164
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ВОЗДУХА И ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ... 164
3. ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ 165
4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА 166
5. ДАННЫЕ К РАСЧЕТУ ТЕПЛООБМЕНА В ТОПКЕ И ПОСТРОЕНИЮ ЕЕ КОМПОНОВОЧНОГО ЭСКИЗА 167
6. РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА В ТОПКЕ 168
7. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ПАРООБРАЗУЮЩЕГО ПРИТОПОЧНОГО ПУЧКА 169
8. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ 171
9. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ 173
10. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ЭКОНОМАЙЗЕРА 175
11. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ЭКОНОМАЙЗЕРА 177
12. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ 178
13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕВЯЗКИ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА КОТЛА 181
РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА 182
ПРИЛОЖЕНИЕ 187

ВЕДЕНИЕ

Курсовая работа выполняется на последнем этапе изучения курса «Судовые котельные установки» и заключается в выполнении теплового расчета вспомогательного котла. Задание на выполнение работы курсант (студент) получает у преподавателя или на сайте института в соответствии с номером зачетной книжки.

Возможно выполнение курсовой работы по индивидуальному заданию по согласованию между преподавателем и студентом.

Работа включает:

- ✓ Описание котла. К описанию прилагается эскиз поперечного разреза котла с нанесенными необходимыми размерами
- ✓ Задание на проектирование и исходные данные по пароводяному тракту
- ✓ Определение объемов воздуха и продуктов сгорания
- ✓ Построение диаграммы
- ✓ Предварительный тепловой баланс и определение расхода топлива
- ✓ Данные к расчету теплообмена в топке и построению ее компоновочного эскиза
- ✓ Расчет теплообмена в топке
- ✓ Конструктивный расчет парообразующего притопочного пучка
- ✓ Конструктивный расчет пароперегревателя
- ✓ Поверочный расчет пароперегревателя
- ✓ Конструктивный расчет экономайзера
- ✓ Поверочный расчет экономайзера
- ✓ Конструктивный расчет воздухоподогревателя
- ✓ Определение невязки теплового баланса котла

Пример оформления титульного листа приведен в приложении.

ПРИМЕР ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА КОТЛА

Приведен пример теплового расчета вспомогательного вертикального парового котла с естественной циркуляцией, с вертикальными пароперегревателем и воздухоподогревателем, со змеевиковым экономайзером. Схема такого котла изображена на рис 1.1. В этом котле, как и во всех котлах типа КВ, воздух от вентилятора сначала подается в межкожуховое пространство, а затем направляется в межтрубное пространство воздухоподогревателя.

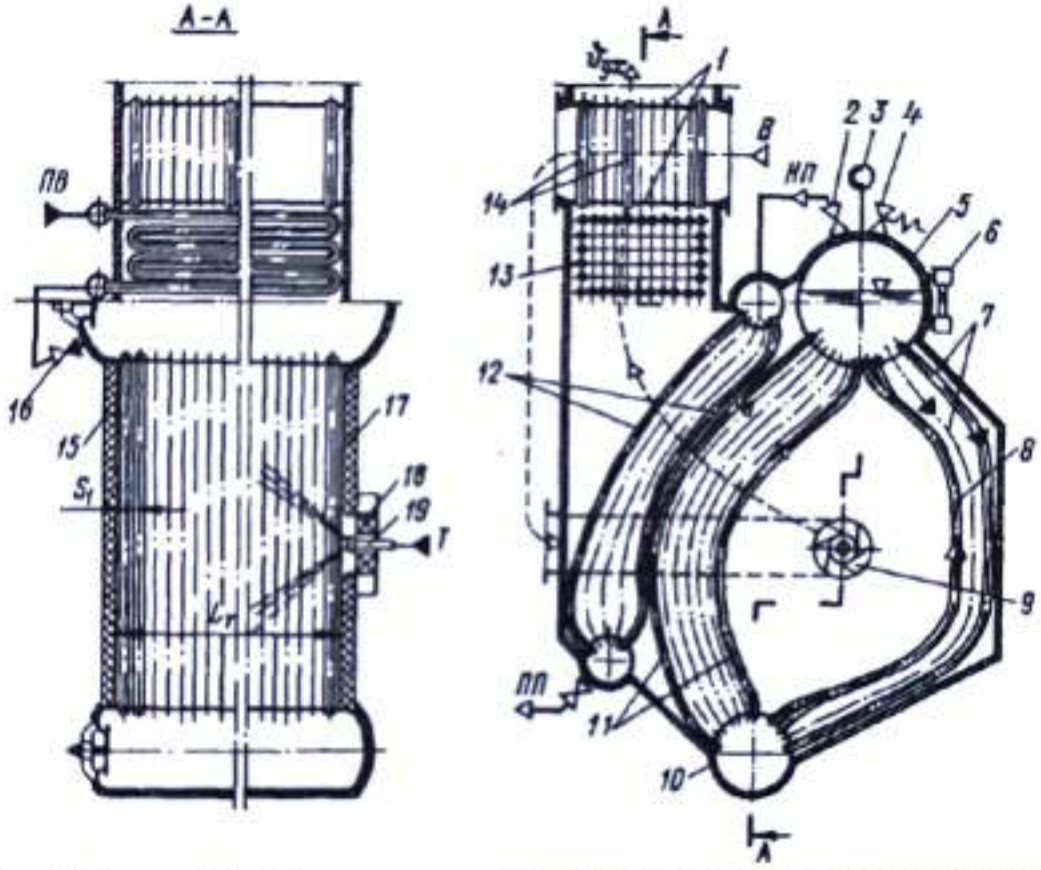


Рис. 1. Водотрубный вертикальный ВПК с естественной циркуляцией
ПВ - питательная вода; НП - насыщенный пар; ПП - перегретый пар; Т - топливо; В – воздух;
1 - нижняя и верхняя трубные доски; 2 - клапан для отключения пароперегревателя; 3 - манометр; 4 - предохранительный клапан;
5 – пароводяной коллектор; 6 - водоуказательний прибор; 7 - необогреваемые опускные трубы; 8 - подъемный сплошной боковой экранный ряд труб (экран); 9 - топочное устройство; 10 - водяной коллектор; 11 - подъемный многорядный притопочный парообразующий пучок труб; 12 - трубы;
13 - параллельно включенные трубы; 14 - трубы воздухоподогревателя;
15 - задняя стенка; 16 - питательный клапан; 17 - передняя стенка;
18 - воздухонаправляющего аппарата; 19 - форсунки.

1. Задание на проектирование и исходные данные по пароводяному тракту

Полная паропроизводительность D, кг/с, в том числе

перегретого пара задано $D_{п.п}$

насыщенного пара задано $D_{н.п}$

Давление (избыточное), МПа

в пароводяном коллекторе задано $p_{н.п}$

при выходе из пароперегревателя принимаем $p_{п.п}$

Температура, °С

питательной воды $t_{п.в}$

насыщения взята из Табл. 2. t_s

воды при выходе из экономайзера принимаем $t_{эк}$

перегретого пара задано $t_{п.п}$

Массовое паросодержание при выходе из пароводяного коллектора принимаем x

Энтальпия, кДж/кг

кипящей воды при $p_{п.п}$ из Табл. 2. i'

сухого пара при $p_{н.п}$ из Табл. 2 i''

насыщенного пара при выходе из пароводяного коллектора:

$$t_{н.п} = i'(1-x) + i''x$$

питательной воды из Табл. 3. $i_{п.в}$

воды при выходе из экономайзера из Табл. 3. $i_{эк}$

перегретого пара из Табл. 3. $i_{п.п}$

Удельный объем, м^3/кг

питательной воды из Табл. 3. $v_{п.в}$

воды при выходе из экономайзера из Табл. 3. $v_{эк}$

кипящей воды из Табл. 2. при $p_{н.п}$ v'

сухого пара из Табл. 2. при $p_{н.п}$ v''

насыщенного пара:

$$v_{н.п} = v'(1-x) + v''x$$

перегретого пара из Табл. 3. $v_{п.п}$

2. Определение объемов воздуха и продуктов сгорания

Марку топлива задано – Мазут 40, сернистый

Состав горючей массы, %

углерод из Табл. 4. C^r

водород из Табл. 4. H^r

из Табл. 4. азот + кислород $N^r + O^r$

летучая сера из Табл. 4. $S^r_л$

Состав рабочей массы, %

зола из Табл. 4. $A^{\text{р}}$

влага из Табл. 4. $W^{\text{р}}$

углерод пересчет по формулам Табл. 5. $C^{\text{р}}$

водород пересчет по формулам Табл. 5. $H^{\text{р}}$

пересчет по формулам Табл. 5. азот + кислород $N^{\text{р}} + O^{\text{р}}$

летучая сера пересчет по формулам Табл. 5. $S_{\text{л}}^{\text{р}}$.

Низшая теплота сгорания из Табл. 4. $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ кДж/кг

Коэффициент избытка воздуха принимаем α.

Расход распиливающего пара принимаем $G_{\text{ф}}$, кг/кг.

Влагосодержание атмосферного воздуха принимаем d, кг/кг.

Объем теоретически необходимого количества воздуха:

$$V^0 = 0{,}0889\left(C^{\text{р}} + 0{,}375S_{\text{л}}^{\text{р}}\right) + 0{,}267H^{\text{р}} - 0{,}0333O^{\text{р}}, \quad \text{м}^3/\text{кг}.$$

Суммарный объем углекислого и сернистого газов:

$$V_{RO_2} = 0{,}0187\left(C^{\text{р}} + 0{,}375S_{\text{л}}^{\text{р}}\right), \qquad \text{м}^3/\text{кг}.$$

Объем, м^3/кг:

водяных паров:

$$V_{H_2O} = 0{,}111H^{\text{р}} + 0{,}0124W^{\text{р}} + 1{,}24G_{\text{ф}} + 1{,}6d\alpha V^0;$$

водяных паров при $\alpha = 1$:

$$V_{H_2O}^0 = 0{,}111H^{\text{р}} + 0{,}0124W^{\text{р}} + 1{,}24G_{\text{ф}} + 1{,}6dV^0;$$

азота при $\alpha = 1$:

$$V_{N_2}^0 = 0{,}79V^0;$$

газов (продуктов сгорания) при $\alpha = 1$:

$$V_{\text{г}}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0.$$

Действительный объем газов:

$$V_{\text{г}} = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 + (1 + 1{,}6d)(\alpha - 1)V^0, \qquad \text{м}^3/\text{кг}.$$

Объем доли продуктов сгорания:

суммы углекислого и сернистого газов:

$$r_{RO_2} = V_{RO_2}/V_{\text{г}};$$

водяных паров:

$$r_{H_2O} = V_{H_2O}/V_{\text{г}};$$

суммы трехатомных газов:

$$r_{\text{п}} = r_{RO_2} + r_{H_2O}.$$

3. Построение диаграммы

Все необходимые расчеты выполняются в виде Табл. 6., на основании которой строится диаграмма $I_{\text{г}} = f(\vartheta)$ (рис. 3.1)

4. Предварительный тепловой баланс и определение расхода топлива

Температура, °С:

уходящих газов задана $\vartheta_{ух}$;

холодного воздуха принимаем $t_{х\,в}$;

горячего воздуха принимаем $t_{г\,в}$;

подогрева топлива принимаем $t_{тл}$.

Теплоемкость при $t_{х\,в}$, кДж/(м^3 · К):

сухого воздуха выбираем из Табл. 7. $C_{с\,в}$;

водяных паров выбираем из Табл. 7. C_{H_2O}.

Энтальпия, кДж/кг:

холодного воздуха:

$$I_{х\,в} = \alpha V^0 \left(C_{с\,в} + 1{,}6dC_{H_2O}\right) t_{х\,в};$$

уходящих газов выбираем по Диаграмме $I_г - \vartheta\ I_{ух}$;

физическая теплота топлива (формула 2.1. стр 37):

$$i_{тл} = C_{тл} = 1{,}74 + 0{,}0025t_{тл}.$$

Энтальпия распыливающего пара из Табл. 3. $i_ф$, кДж/кг

Теплота, вносимая распиливающим паром:

$$Q_ф = G_ф\left(i_ф - 2500\right), \qquad \text{кДж/кг}$$

Располагаемая теплота:

$$Q_р^р = Q_н^р + i_{тл} + Q_ф, \qquad \text{кДж/кг}$$

Тепловая потеря с уходящими газами:

$$Q_2 = I_{ух} - I_{х\,в}, \qquad \text{кДж/кг}$$

Относительная тепловая потеря:

с уходящими газами

$$q_2 = Q_2/Q_р^р;$$

от химической неполноты сгорания принимаем q_3;

от наружного охлаждения принимаем q_5.

К.П.Д. котла:

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5).$$

Коэффициент сохранения теплоты:

$$\varphi = 1 - q_5(q_1 + q_5).$$

Расчетный расход топлива:

$$B = D(i_{п\,п} - i_{п\,в})/\eta Q_р^р, \qquad \text{кг/с}$$

5. Данные к расчету теплообмена в топке и построению ее компоновочного эскиза

Удельную мощность топки принимаем $q_т$, кВт/м^3

Объем топки:

$$V_т = BQ_р^р/q_т, \quad м^3$$

Число форсунок принимаем $N = 2$.

Расчетная производительность одной форсунки:

$$B_ф = B/N, \quad кг/с.$$

Расчетная длина топки:

$$L_т = A\sqrt{B_ф}, \quad м.$$

Расход воздуха через отверстие фурмы:

$$V_ф = \frac{\alpha V^0 B_ф (t_{т\,в} + 273)}{273}, \quad м^3/с.$$

Скорость воздуха в отверстии фурмы принимаем $\omega'_ф$, м/с.

Живое сечение фурмы:

$$f' = V_ф/\omega'_ф, \quad м^2.$$

Расчетный диаметр фурмы:

$$d'_ф = \sqrt{f'/0{,}785}, \quad м.$$

Принятый диаметр фурмы округляем $d_ф$, м

Принятое живое сечение фурмы:

$$f = 0{,}785 \cdot d_ф^2, \quad м^2.$$

Действительная скорость воздуха в отверстии фурмы:

$$\omega_ф = V_ф/f, \quad м/с.$$

Паровая нагрузка зеркала испарения принимаем $R_{з\,и}$, кг/(м$^2 \cdot$ с).

Внутренний диаметр, м:

пароводяного коллектора:

$$d_{п\,к} = D/(R_{з\,и}L_т);$$

водяного коллектора принимаем $d_{в\,к}$.

Площадь поперечного сечения топки:

$$F_т = V_т/L_т, \quad м^2.$$

Построение эскиза топки, уточнение размеров топки ($F_т$, $L_т$)

Освещенная длина участков лучевоспринимающих труб, м:

экрана берем из Рис. 3. $l_э$;

первого ряда притопочного пучка берем из Рис. 3. $l_п$.

Условная лучевоспринимающая поверхность нагрева топки:

$$H_л = (l_э + l_п)L_т, \quad м.$$

Полная площадь поверхности стен топки:

$$F_{ст} = H_л + 2F_т, \qquad м^2.$$

Степень экранирования топки:

$$\psi = H_л/F_{ст}.$$

Эффективная толщина излучающего слоя топки:

$$s = 3{,}6(V_т/F_{ст}), \qquad м.$$

6. Расчет теплообмена в топке

Теплоемкость при $t_{г\,в}$, кДж/(м^3 · K):

сухого воздуха выбираем по Табл. 7. $c_{с\,в}$;

водяных паров выбираем по Табл. 7. c_{H_2O}.

Энтальпия, кДж/кг:

воздуха при $t_{г\,в}$, :

$$I_{г\,в} = \alpha V^0\left(c_{с\,в} + 1{,}6dc_{H_2O}\right)t_{г\,в};$$

газов (продуктов сгорания) при адиабатной температуре:

$$I_а = Q_р^р(1 - q_3) + I_{г\,в};$$

Адиабатная температура газов по Диаграмме $I_г - \vartheta$ $\vartheta_а$, °С.

Адиабатная температура газов:

$$T_а = \vartheta_а + 273, \qquad K.$$

Температура газов на выходе из топки принимаем $\vartheta'_т$, °С.

Температура газов из топки на выходе:

$$T'_т = \vartheta'_т + 273, \qquad К.$$

Энтальпия газов на выходе из топки по Диаграмме $I_г - \vartheta$ $I'_т$, кДж/кг.

Средняя суммарная теплоемкость газов:

$$\sum(V_c)_i = \frac{I_а - I_т}{\vartheta_а - \vartheta_т}, \qquad кДж/(кг · К).$$

Коэффициент ослабления лучей, 1/(м · МПа):

сажистыми частицами:

$$k_с = 0{,}3(2 - \alpha)\left(1{,}6\frac{T_т}{1000} - 0{,}5\right)\frac{C^р}{H^р};$$

трехатомными газами:

$$k = \left(\frac{2{,}47 + 5{,}06r_{H_2O}}{\sqrt{pr_п^s}} - 1\right)\left(1 - 0{,}37\frac{T_т}{1000}\right)r_п.$$

Давление в топки для котлов с вентиляторным дутьем принимаем p, МПа

Степень черноты:

трехатомных газов:

$$a_г = 1 - e^{-(k+k_c)ps};$$

светящегося пламени:

$$a_{св} = 1 - e^{-kps};$$

Коэффициент усреднения принимаем m.

Эффективность степени черноты факела:

$$a_ф = ma_{св} + (1 - m)a_г.$$

Коэффициент загрязнения экранных труб принимаем ζ.

Степень черноты топки:

$$a_т = \frac{a_ф}{a_ф + (1 - a_ф)\psi\zeta}.$$

Критерий Больцмана:

$$Bo = \frac{\varphi B \sum(V_c)_l}{5{,}67 \cdot 10^{-11}\zeta H_л T_а^3}.$$

Температура газов на выходе из топки, °С:

безразмерная:

$$\Theta = \frac{T_т}{T_а} = \frac{Bo^{0.6}}{0{,}69a_т^{0.6} + 1{,}03Bo^{0.6}};$$

искомая:

$$\vartheta_т = \Theta T_а - 273.$$

Энтальпия газов на выходе из топки по Диаграмме $I_г - \vartheta\ I_т$, кДж/кг.

Тепловая мощность лучевоспринимающей поверхности нагрева топки:

$$Q_л = \varphi(I_а - I_г)B, \qquad \text{кВт}.$$

7. Конструктивный расчет парообразующего притопочного пучка

Наружный диаметр труб принимаем d, м.

Шаг, м:

поперечный принимаем s_1;

продольный принимаем s_2;

Число труб в одном ряду (Рис. 7.):

$$z_1 = L_т/s_1 - 0{,}5.$$

Полная длина труб среднего ряда пучка Рис. 8. l, м.

Живое сечение для прохода газов:

$$F_г = l(L_т - z_1 d), \qquad \text{м}^2.$$

Поверхность нагрева одного ряда:

$$H_р = \pi d l z_1, \qquad \text{м}^2.$$

Тепловая мощность парообразующего притопочного пучка:

$$Q_п = D(i_{н\,п} - i_{зк}) - Q_д, \qquad \text{кВт}.$$

Энтальпия газов при выходе из пучка:

$$I_1 = I_т - Q_п/(\varphi B), \qquad \text{кДж/кг}.$$

Температура газов при выходе из пучка по Диаграмме $I_г - \vartheta$, ϑ, °С

Средняя температура газов в пучке:

$$\vartheta_п = 0{,}5(\vartheta_т + \vartheta_1), \quad °С.$$

Средняя температура газов в пучке:

$$T_п = \vartheta_п + 273, \quad К.$$

Средняя скорость газов:

$$\omega_г = BV_г T_п (273F_г), \quad м/с.$$

Коэффициент теплопроводности газов выбираем по Табл. 8. и Рис. 5. λ, Вт/(м · К).

Коэффициент кинематической вязкости газов выбираем по Табл. 8. и Рис. 5. ν, $м^2/с$.

Критерий Прандтля газов выбираем по Табл. 8. и Рис. 5. Pr.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_к = \frac{\lambda}{d}\left(\frac{wd}{\nu}\right)^{0,6} Pr^{0,33} \cdot 0{,}89 \cdot 0{,}32, \quad Вт/(м^2 \cdot К).$$

Плотность теплового потока поверхности нагрева пучка принимаем $q_п$, $Вт/м^2$.

Коэффициент загрязнения труб принимаем (Рис. 6.) ε, $м^2 \cdot К/Вт$.

Температура наружной поверхности загрязняющего слоя:

$$t_з = t_s + \varepsilon q_п, \quad °С.$$

Температура наружной поверхности загрязняющего слоя:

$$T_з = t_з + 273, \quad К.$$

Эффективная толщина излучающего слоя:

$$s = 0{,}9d\left(\frac{4s_1 s_2}{\pi d^2} - 1\right), \quad м.$$

Коэффициент ослабления лучей трехатомными газами:

$$k = \left(\frac{2{,}47 + 5{,}06r_{H_2O}}{\sqrt{pr_п^s}} - 1\right)\left(1 - 0{,}37\frac{T_п}{1000}\right)r_п, \quad 1/(м \cdot МПа).$$

Степень черноты трехатомных газов:

$$a_г = 1 - e^{-k_г r_п p s}.$$

Коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$:

излучением трехатомных газов:

$$\alpha_л = 5{,}1 \cdot 10^{-8} a_г T^3 \frac{1 - (T_з T)^{3,6}}{1 - (T_з T)};$$

от газов к стенке:

$$\alpha_1 = \alpha_к + \alpha_л.$$

Коэффициент тепловой эффективности выбираем из Табл. 9. ψ.

Коэффициент теплопередачи:

$$k = \psi(\alpha_к + \alpha_л), \quad Вт/(м^2 \cdot К).$$

Температурный напор:

$$\Delta t = \frac{\vartheta' - \vartheta''}{\ln(\vartheta' - t_s)/(\vartheta'' - t_s)}, \qquad °C.$$

Расчетная поверхность нагрева парообразующего пригоночного пучка:

$$H_п = Q_п \cdot 10^3/(k\Delta t), \qquad м^2.$$

Расчетное число рядов труб в пучке:

$$z_2 = H_п/H_р.$$

Принятое число рядов в пучке округляем z_2^*.

Принятая площадь поверхности нагрева притопочного пучка:

$$H_п^* = H_р z_2^*, \qquad м^2.$$

8. Конструктивный расчет пароперегревателя

Диаметр труб, м:

наружный принимаем d;

внутренний принимаем $d_в$.

Шаг, м:

поперечный принимаем s_1;

продольный принимаем s_2.

Число труб в одном ряду (Рис. 7.):

$$z_1 = L_т/s_1 - 0{,}5.$$

Полная длина труб среднего ряда пучка (Рис. 8.) l, м.

Поверхность нагрева одного ряда:

$$H_р = \pi d l z_1, \qquad м^2.$$

Живое сечение для прохода газов:

$$F_т = l(L_т - z_1 d), \qquad м^2.$$

Мощность пароперегревателя:

$$Q_{п\,п} = D_{п\,п}(i_{п\,п} - i_{н\,п}), \qquad кВт.$$

Энтальпия газов при выходе из пароперегревателя:

$$I_2 = I_1 - Q_{п\,п}/(\varphi B), \qquad кДж/кг.$$

Температура газов при выходе из пароперегревателя по Диаграмме $I_г - \vartheta$

ϑ_2, 5 °C.

Средняя температура газов в пучке:

$$\vartheta_{п\,п} = 0{,}5(\vartheta_1 + \vartheta_2), \qquad °C.$$

Средняя температура газов в пучке:

$$T_{п\,п} = \vartheta_{п\,п} + 273, \qquad K.$$

Средняя скорость газов в пучке:

$$\omega_г = \frac{BV_г(\vartheta + 273)}{273F}, \qquad м/с.$$

Коэффициент теплопроводности газов Табл. 8., Рис. 5. λ, Вт/(м · К).

Коэффициент кинематической вязкости газов Табл. 8., Рис. 5. v, м^2/с.

Критерий Прандтля газов Табл. 8., Рис. 5. Pr.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к стенке:

$$\alpha_к = \frac{\lambda}{d}\left(\frac{wd}{v}\right)^{0,6} \text{Pr}^{0,33} \cdot 0,89 \cdot 0,32, \qquad Вт/(м^2 \cdot К)$$

Средняя температура перегретого пара:

$$\bar{t}_{п\,п} = 0,5(t_s + t_{п\,п}), \qquad °C.$$

Среднее давление перегретого пара:

$$\bar{p}_{п\,п} = 0,5(p_{н\,п} + p_{п\,п}), \qquad МПа.$$

Средний удельный объем перегретого пара выбираем по Табл. 3. $v_{п\,п}$, м^3/ кг.

Коэффициент теплопроводности перегретого пара выбираем по Табл. 3. $\lambda_{п\,п}$, Вт/(м · К).

Коэффициент кинематической вязкости перегретого пара по Табл. 3. $v_{п\,п}$, м^2/с.

Критерий Прандтля перегретого пара выбираем по Табл. 3. $Pr_{п\,п}$.

Средняя скорость перегретого пара принимаем $\omega'_{п\,п}$, м/с.

Коэффициент теплоотдачи от стенки к пару:

$$\alpha_2 = 0,023\frac{\lambda}{d_э}\left(\frac{\omega d_э}{v}\right)^{0,8} Pr^{0,4}C_tC_l, \qquad Вт/(м^2 \cdot К).$$

Коэффициент загрязнения труб принимаем (Рис. 2.) ε, м^2 · К/Вт.

Плотность теплового потока поверхности нагрева пароперегревателя принимаем $q_{п\,п}$, Вт/м^2.

Температура наружной поверхности загрязняющего слоя стенки:

$$t_з = t + (\varepsilon + 1/\alpha_2)q_{п\,п}, \qquad °C.$$

Температура наружной поверхности загрязняющего слоя стенки:

$$T_з = t_з + 273, \qquad К.$$

Эффективная толщина излучающего слоя:

$$s = 0,9d\left(\frac{4s_1s_2}{\pi d^2} - 1\right), \qquad м.$$

Коэффициент ослабления лучей трехатомными газами:

$$k = \left(\frac{2,47 + 5,06r_{H_2O}}{\sqrt{pr_п^s}} - 1\right)\left(1 - 0,37\frac{T_{п\,п}}{1000}\right)r_п, \qquad 1/(м \cdot МПа).$$

Степень черноты трехатомных газов:

$$a_г = 1 - e^{-k_г r_п ps}.$$

Коэффициент теплоотдачи излучением трехатомных газов:

$$\alpha_л = 5,1 \cdot 10^{-8}a_г T^3\frac{1 - (T_з T)^{3,6}}{1 - (T_з T)}, \qquad Вт/(м^2 \cdot К).$$

Коэффициент тепловой эффективности выбираем из Табл. 9. ψ.

Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{\psi(\alpha_к + \alpha_л)\alpha_2}{\alpha_к + \alpha_л + \alpha_2}, \qquad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Температурный напор:

$$\Delta t = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\ln(\vartheta_1 - \bar{t}_{\text{п п}})/(\vartheta_2 - \bar{t}_{\text{п п}})}, \qquad °\text{C}.$$

Расчетная площадь поверхности нагрева пароперегревателя :

$$H_{\text{п п}} = Q_{\text{п п}} \cdot 10^3/(k\Delta t), \qquad \text{м}^2.$$

Расчетное число рядов труб в пучке:

$$z_2 = H_{\text{п п}}/H_{\text{р}}.$$

Принятое число рядов в пучке округляем z_2^*.

Принятая поверхность нагрева пароперегревателя:

$$H_{\text{п п}}^* = H_{\text{р}} z_2^*, \qquad \text{м}^2$$

9. Поверочный расчет пароперегревателя

Температура газов при выходе из пароперегревателя принимаем:

ϑ_2^1, °C

ϑ_2^2, °C

ϑ_2^3, °C

Энтальпия газов при выходе из пароперегревателя по Диаграмме $I_г - \vartheta$:

I_2^1, кДж/кг

I_2^2, кДж/кг

I_2^3, кДж/кг

Температурный напор:

$$\Delta t^1 = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2^1}{\ln\frac{\vartheta_1 - \bar{t}_{\text{п п}}}{\vartheta_2^1 - \bar{t}_{\text{п п}}}}, \qquad °\text{C};$$

$$\Delta t^2 = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2^2}{\ln\frac{\vartheta_1 - \bar{t}_{\text{п п}}}{\vartheta_2^2 - \bar{t}_{\text{п п}}}}, \qquad °\text{C};$$

$$\Delta t^3 = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2^3}{\ln\frac{\vartheta_1 - \bar{t}_{\text{п п}}}{\vartheta_2^3 - \bar{t}_{\text{п п}}}}, \qquad °\text{C}.$$

Коэффициент теплопередачи принимаем полученное выше значение без пересчета k, Вт/(м^2 · К).

Мощность пароперегревателя по уравнению теплового баланса

$$Q^1_{\text{п п.б}} = \varphi B(I_1 - I^1_2), \quad \text{кВт};$$
$$Q^2_{\text{п п.б}} = \varphi B(I_1 - I^2_2), \quad \text{кВт};$$
$$Q^3_{\text{п п.б}} = \varphi B(I_1 - I^3_2), \quad \text{кВт}.$$

Мощность пароперегревателя по уравнению теплообмена

$$Q^1_{\text{п п.т}} = k\Delta t^1 H^*_{\text{п п}} \cdot 10^{-3}, \quad \text{кВт};$$
$$Q^2_{\text{п п.т}} = k\Delta t^2 H^*_{\text{п п}} \cdot 10^{-3}, \quad \text{кВт};$$
$$Q^3_{\text{п п.т}} = k\Delta t^3 H^*_{\text{п п}} \cdot 10^{-3}, \quad \text{кВт}.$$

Уточненная мощность пароперегревателя из графического решения уравнений теплового баланса и теплообмена (Рис. 9.) $Q^*_{\text{п п}}$, кВт.

Уточненная температура газов при выходе из пароперегревателя из графического решения уравнений теплового баланса и теплообмена (Рис. 9.) ϑ^*_2, °С.

Уточненная энтальпия газов при выходе из пароперегревателя по Диаграмме $I_\text{г} - \vartheta$, I^*_2, кДж/кг.

Уточненная энтальпия перегретого пара:

$$i^*_\text{п} = i_{\text{н п}} + Q_{\text{п п}}/D, \quad \text{кДж/кг}.$$

Уточненная температура перегретого пара по Табл. 3. $t^*_{\text{п п}}$, °С.

Средняя скорость перегретого пара, м/с:

в одноходовом пароперегревателе:

$$\omega^{\text{ох}}_{\text{п п}} = Dv_{\text{п п}}(0{,}785 d^2_\text{в} z_1 z_2).$$

при принятом числе ходов:

$$m = 3\ \omega_{\text{п п}} = \omega^{\text{ох}}_{\text{п п}} m.$$

10. Конструктивный расчет экономайзера

Диаметр труб, м:

наружный принимаем d;

внутренний принимаем $d_в$.

Шаг, м:

поперечный принимаем s_1;

продольный принимаем s_2.

Ширина газохода по Рис. 4. b, м.

Длина труб:

$$l = L_т, \qquad \text{м}.$$

Число труб в одном ряду (Рис. 7.):

$$z_1 = b/s_1.$$

Поверхность нагрева одного ряда:

$$H_р = \pi d L_т z_1, \qquad \text{м}^2.$$

Скорость воды при одноходовом змеевике:

$$\omega_в^{ох} = D(v_{п\,в} + v_{эк})/(1{,}57 d_в^2 z_1), \qquad \text{м/с}.$$

Число заходов змеевика принимаем n_3.

Действительная скорость воды в трубах:

$$\omega_в = \omega_в^{ох} n_3, \qquad \text{м/с}.$$

Живое сечение для прохода газов :

$$F_г = L_т b - l z_1 d, \qquad \text{м}^2.$$

Мощность экономайзера :

$$Q_{эк} = D(i_{эк} - i_{п\,в}), \qquad \text{кВт}.$$

Энтальпия газов при выходе из экономайзера :

$$I_3 = I_2^* - Q_{эк}/(\varphi B), \qquad \text{кДж/кг}.$$

Температура газов при выходе из экономайзера по Диаграмме $I_г - \vartheta$, ϑ_3, °С.

Средняя температура газов в пучке:

$$\vartheta_{эк} = 0{,}5(\vartheta_2^* + \vartheta_3), \qquad °\text{С}.$$

Средняя температура газов в пучке:

$$T_{эк} = \vartheta_{эк} + 273, \qquad K.$$

Средняя скорость газов:

$$\omega_г = \frac{B V_г (\vartheta + 273)}{273 F}, \qquad \text{м/с}.$$

Коэффициент теплопроводности газов Табл. 8., Рис. 5. λ, Вт/(м · К).

Коэффициент кинематической вязкости газов Табл. 8., Рис. 5. v, м^2/с.

Критерий Прандтля газов Табл. 8., Рис. 5. Pr.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией:

теплоотдачи от стенки к воздуху:

$$\alpha_к = \frac{\lambda}{d}\left(\frac{wd}{\nu}\right)^{0,6} \mathrm{Pr}^{0,33} \cdot C_z C_s. \ \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

C_z – поправка на число рядов z

$$C_z = 3.12 z_2^{0.05} - 2.5 \text{ при } z_2 < 10 \text{ и } \sigma_1 < 3;$$

$$C_z = 4 z_2^{0.02} - 3{,}2 \text{ при } z_2 < 10 \text{ и } \sigma_1 \geq 3;$$

$$C_z = 1 \text{ при } z_2 \geq 10$$

C_2 – поправка на компоновку, определяемая в зависимости от относительного поперечного шага σ_1 и параметра $\varphi_\sigma = (\sigma_1' - 1)/(\sigma_2' - 1)$, где

относительный диагональный шаг $\sigma_2' = \frac{s_2'}{d} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{4} + \sigma_2^2}$;

$$C_s = 0{,}34\varphi_\sigma^{0.1} \text{ при } 0{,}1 < \varphi_\sigma \leq 1{,}7;$$

$$C_s = 0{,}275\varphi_\sigma^{0.5} \text{ при } 1{,}7 < \varphi_\sigma \leq 4{,}5 \text{ для } \sigma_1 < 3;$$

$$C_s = 0{,}34\varphi_\sigma^{0.1} \text{ при } 1{,}7 < \varphi_\sigma \leq 4{,}5 \text{ для } \sigma_1 \geq 3;$$

Средняя температура воды в экономайзере:

$$\bar{t}_{эк} = 0{,}5(t_{п\,в} + t_{эк}), \quad °\text{C}.$$

Температура наружной поверхности загрязняющего слоя стенки:

$$t_з = \bar{t}_{эк} + 60, \quad °\text{C}.$$

Температура наружной поверхности загрязняющего слоя стенки:

$$T_з = t_з + 273, \quad \text{К}.$$

Эффективная толщина излучающего слоя:

$$s = 0{,}9d\left(\frac{4s_1 s_2}{\pi d^2} - 1\right), \quad \text{м}.$$

Коэффициент ослабления лучей трехатомными газами:

$$k = \left(\frac{2{,}47 + 5{,}06 r_{H_2O}}{\sqrt{p r_п^s}} - 1\right)\left(1 - 0{,}37\frac{T_{эк}}{1000}\right) r_п, \quad 1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$$

Степень черноты трехатомных газов:

$$a_г = 1 - e^{-k_г r_п p s}.$$

Коэффициент, Вт/(м^2 · К):

теплоотдачи излучением трехатомных газов:

$$\alpha_л = 5{,}1 \cdot 10^{-8} a_г T^3 \frac{1 - (T_з T)^{3,6}}{1 - (T_з T)};$$

тепловой эффективности из Табл. 3. ψ;

теплопередачи:

$$k = \psi(\alpha_к + \alpha_л).$$

Температурный напор (прямоток):

$$\Delta t = \frac{(\vartheta_2'' - t_{п\,в}) - (\vartheta_з - t_{эк})}{\ln[(\vartheta_2'' - t_{п\,в})/(\vartheta_з - t_{эк})]}, \quad °\text{C}.$$

Расчетная поверхность нагрева экономайзера :

$$H_{эк} = Q_{эк} \cdot 10^3/(k\Delta t), \qquad м^2.$$

Расчетное число рядов труб в пучке

$$z_2 = H_{эк}/H_р.$$

Принятое число рядов в пучке округляем z_2^*.

Принятая поверхность нагрева экономайзера:

$$H_{эк}^* = H_р z_2^*. \ м^2$$

11. Поверочный расчет экономайзера

Температура газов при выходе из экономайзера принимаем:

$$\vartheta_3^1, \qquad °C;$$
$$\vartheta_3^2, \qquad °C;$$
$$\vartheta_3^3, \qquad °C.$$

Энтальпия газов при выходе из экономайзера по Диаграмме $I_г - \vartheta$, :

$$I_3^1, \qquad кДж/кг;$$
$$I_3^2, \qquad кДж/кг;$$
$$I_3^3, \qquad кДж/кг.$$

Температурный напор:

$$\Delta t^1 = \frac{(\vartheta_2^* - t_{п\,в}) - (\vartheta_3^1 - t_{эк})}{\ln[(\vartheta_2^* - t_{п\,в})/(\vartheta_3^1 - t_{эк})]}, \qquad °C;$$

$$\Delta t^2 = \frac{(\vartheta_2^* - t_{п\,в}) - (\vartheta_3^2 - t_{эк})}{\ln[(\vartheta_2^* - t_{п\,в})/(\vartheta_3^2 - t_{эк})]}, \qquad °C;$$

$$\Delta t^3 = \frac{(\vartheta_2^* - t_{п\,в}) - (\vartheta_3^3 - t_{эк})}{\ln[(\vartheta_2^* - t_{п\,в})/(\vartheta_3^3 - t_{эк})]}, \qquad °C.$$

Коэффициент теплопередачи принимаем полученное выше значение без пересчета k, Вт/(м^2 · К).

Мощность экономайзера по уравнению теплового баланса:

$$Q_{эк.б}^1 = \varphi B(I_2^* - I_3^1), \qquad кВт;$$
$$Q_{эк.б}^2 = \varphi B(I_2^* - I_3^2), \qquad кВт;$$
$$Q_{эк.б}^3 = \varphi B(I_2^* - I_3^3), \qquad кВт.$$

Мощность экономайзера по уравнению теплообмена:

$$Q_{эк.т}^1 = k\Delta t^1 H_{эк}^* \cdot 10^{-3}, \qquad кВт;$$
$$Q_{эк.т}^2 = k\Delta t^2 H_{эк}^* \cdot 10^{-3}, \qquad кВт;$$
$$Q_{эк.т}^3 = k\Delta t^3 H_{эк}^* \cdot 10^{-3}, \qquad кВт.$$

Уточненная мощность экономайзера из графического решения уравнений теплового баланса и теплообмена (Рис. 9.) $Q_{эк}^*$, кВт.

Уточненная температура газов при выходе из экономайзера из графического решения уравнений теплового баланса и теплообмена (Рис. 9.) ϑ_3^*, °С.

Уточненная энтальпия газов при выходе из экономайзера по Диаграмме $I_г - \vartheta$, $I_э^*$, кДж/кг.

12. Конструктивный расчет воздухоподогревателя

Диаметр труб, м:

наружный d;

внутренний$d_в$;

средний d.

Шаг, м:

по ширине газохода s_1;

по длине газохода s_2.

Количество труб по ширине газохода:

$$z_1 = b/s_1 - 0{,}5.$$

Количество рядов по длине газохода :

$$z_2 = L_y/s_2.$$

Живое сечение для прохода газов:

$$F_т = 0{,}785 d_B^2 z_1 z_2, \qquad м^2.$$

Температура воздуха на входе в воздухоподогреватель:

$$t'_{х\,в} = t_{х\,в} + 15, \qquad °C.$$

Энтальпия воздуха на входе в воздухоподогреватель:

$$I_{х\,в} = \propto V^0 \left(C_{св} + 1{,}6 в d c_{H_2O}\right) t'_{х\,в}, \qquad кДж/кг.$$

Мощность воздухоподогревателя:

$$Q_{в\,п} = B(I_{г\,в} - I'_{х\,в}), \qquad кВт.$$

Энтальпия газов при выходе из воздухоподогревателя:

$$I^*_{ух} = I^*_э - Q_{вп}/(\varphi B), \qquad кДж/кг.$$

Температура газов при выходе из воздухоподогревателя $\vartheta^*_{ух}$, °C

Диаграмма $I_г - \vartheta$.

Средняя температура газов в воздухоподогревателе:

$$\vartheta_{в\,п} = 0{,}5\left(\vartheta^*_э - \vartheta^*_{ух}\right), \qquad °C.$$

Средняя скорость газов:

$$\omega_г = \frac{BV_г(\vartheta + 273)}{273\,F}, \qquad м/с.$$

Коэффициент теплопроводности газов,– Табл. 8., Рис. 5. λ, Вт/(м · К).

Коэффициент кинематической вязкости газов, ν, м^2/с.

Критерий Прандтля газов Pr.

Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке:

$$\alpha_1 = 0{,}023 \frac{\lambda}{d_э} \left(\frac{\omega d_э}{\nu}\right)^{0{,}8} Pr^{0{,}4} C_t C_l, \qquad Вт/(м^2 \cdot К).$$

Средняя температура воздуха :

$$t_{в} = 0{,}5(t_{г.в.} + t'_{х.в.}), \qquad °C.$$

Коэффициент теплопроводности воздуха, Табл. 8., Рис. 5. $\lambda_{в}$, Вт/(м · К).

Коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\upsilon_{в}$, $м^2/с$.

Критерий Прандтля воздуха $Pr_{в}$.

Температурный напор при противотоке:

$$\Delta t_{прт} = \vartheta_{вп} - t_{в}, \qquad °C.$$

Перепад температур, °С:

по воздуху:

$$\tau_{б} = t_{г.в.} - t^{*}_{х.в.};$$

по газам:

$$\tau_{м} = \vartheta^{*}_{з} - \vartheta^{*}_{ух}.$$

Разность температур сред на входе в воздухоподогреватель:

$$\delta t' = \vartheta^{*}_{з} - t'_{х.в.}, \qquad °C.$$

Безразмерный параметр:

$$R = \tau_{б}/\tau_{м}.$$

Безразмерный параметр:

$$P = \tau_{м}/\tau_{б}.$$

Поправочный коэффициент для определения температурного на пора при перекрестном токе принимаем Рис. 10. ψ.

Температурный напор в воздухоподогревателе:

$$\Delta t = \psi \Delta t_{прг}, °C.$$

Число ходов воздуха n.

Общая высота труб:

$$h^{1}_{в\,п}, \qquad м;$$
$$h^{2}_{в\,п}, \qquad м;$$
$$h^{3}_{в\,п}, \qquad м.$$

Поверхность нагрева воздухоподогревателя:

$$H^{1}_{в\,п} = h^{1}_{в\,п}\pi d z_1 z_2, \qquad м;$$
$$H^{2}_{в\,п} = h^{2}_{в\,п}\pi d z_1 z_2, \qquad м;$$
$$H^{3}_{в\,п} = h^{3}_{в\,п}\pi d z_1 z_2, \qquad м.$$

Живое сечение для прохода воздуха:

$$F^{1}_{в} = (h^{1}_{в\,п}/n)(b - z_1 d), \qquad м^2;$$
$$F^{2}_{в} = (h^{2}_{в\,п}/n)(b - z_1 d), \qquad м^2;$$
$$F^{3}_{в} = (h^{3}_{в\,п}/n)(b - z_1 d), \qquad м^2.$$

Скорость воздуха:

$$\omega_{в} = \frac{B\alpha V^{0}(t_{в} + 273)}{273F}, \qquad м/с;$$

$$\omega_{в} = \frac{B\alpha V^{0}(t_{в} + 273)}{273F}, \qquad м/с;$$

$$\omega_{в} = \frac{B\alpha V^{0}(t_{в} + 273)}{273F}, \qquad м/с.$$

Коэффициент, Вт/(м^2 · К):

теплоотдачи от стенки к воздуху :

$$\alpha_2^1 = \frac{\lambda}{d}\left(\frac{wd}{\nu}\right)^{0,6} \text{Pr}^{0,33} \cdot C_z C_s, \qquad \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$\alpha_2^2 = \frac{\lambda}{d}\left(\frac{wd}{\nu}\right)^{0,6} \text{Pr}^{0,33} \cdot C_z C_s, \qquad \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$\alpha_2^3 = \frac{\lambda}{d}\left(\frac{wd}{\nu}\right)^{0,6} \text{Pr}^{0,33} \cdot C_z C_s, \qquad \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

C_z – поправка на число рядов z

$$C_z = 3.12 z_2^{0.05} - 2.5 \text{ при } z_2 < 10 \text{ и } \sigma_1 < 3;$$

$$C_z = 4 z_2^{0.02} - 3,2 \text{ при } z_2 < 10 \text{ и } \sigma_1 \geq 3;$$

$$C_z = 1 \text{ при } z_2 \geq 10$$

C_2 – поправка на компоновку, определяемая в зависимости от относительного поперечного шага σ_1 и параметра $\varphi_\sigma = (\sigma_1' - 1)/(\sigma_2' - 1)$, где

относительный диагональный шаг $\sigma_2' = \frac{s_2'}{d} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{4} + \sigma_2^2}$;

$$C_s = 0.34 \varphi_\sigma^{0.1} \text{ при } 0,1 < \varphi_\sigma \leq 1,7;$$

$$C_s = 0.275 \varphi_\sigma^{0.5} \text{ при } 1,7 < \varphi_\sigma \leq 4,5 \text{ для } \sigma_1 < 3;$$

$$C_s = 0.34 \varphi_\sigma^{0.1} \text{ при } 1,7 < \varphi_\sigma \leq 4,5 \text{ для } \sigma_1 \geq 3;$$

тепловой эффективности табл 6.1:

$$\psi^1;$$
$$\psi^2;$$
$$\psi^3;$$

теплопередачи:

$$k^1 = \frac{\psi^1(\alpha_к + \alpha_л)\alpha_2^1}{\alpha_к + \alpha_л + \alpha_2^1};$$

$$k^2 = \frac{\psi^2(\alpha_к + \alpha_л)\alpha_2^2}{\alpha_к + \alpha_л + \alpha_2^2};$$

$$k^3 = \frac{\psi^3(\alpha_к + \alpha_л)\alpha_2^3}{\alpha_к + \alpha_л + \alpha_2^3}.$$

Мощность воздухоподогревателя по уравнению теплообмена:

$$Q_{\text{вт}}^1 = k^1 \Delta t H_{\text{в п}}^1 \cdot 10^{-3}, \qquad \text{кВт};$$

$$Q_{\text{вт}}^2 = k^2 \Delta t H_{\text{в п}}^2 \cdot 10^{-3}, \qquad \text{кВт};$$

$$Q_{\text{вт}}^3 = k^3 \Delta t H_{\text{в п}}^3 \cdot 10^{-3}, \qquad \text{кВт}.$$

Искомая высота труб воздухоподогревателя из граф.решения уравнения теплового баланса и теплообмена рис 12.5 $h_{\text{в п}}^*$, м.

13. Определение невязки теплового баланса котла

Уточненная тепловая потеря с уходящими газами:

$$Q_2^* = I_{ух}^* - I_{хв}, \qquad \text{кДж/кг.}$$

Уточненная тепловая потеря с уходящими газами:

$$q_2^* = Q_2^*/Q_р^р, \qquad \text{кДж/кг.}$$

Уточненный К.П.Д. котла:

$$\eta^* = 1 - q_2^* - q_3 - q_5.$$

Уточненный расход топлива:

$$B^* = D(i_{п.п}^* - i_{н.п})/(Q_р^р \eta^*), \qquad \text{кг/с.}$$

Невязка теплового баланса:

$$\Delta Q = Q_р^р \eta^* = \frac{Q_л Q_п^* Q_{пп}^* Q_{эк}^*}{B^*}, \qquad \text{кДж/кг.}$$

РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Аверин В.А., Колесниченко А.Г., Нагибин А.Я. Опыт создания судовых утилизационных котлов и перспективы их развития//Судостроение. 1980. №5 С. 18-23.

2. Аэродинамический расчет котельных установок (Нормативный метод) Под ред. С.И. Мочана Л.- Энергия. 1977. 255 с

3. Герловин Л.И. Слуцкер М.С. Судовые у утилизационные и комбинированные котлы. Л.: Судоромгиз. 1962. 252 с.

4. Гидравлический расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) Под ред. В.А. Локшина, Д.Ф. Пегерсона, А.Л. Шварца. М.: Энергия. 1978. 255 с.

5. Колесниченко А.Г., Нагибин А.Я., Пильдиш В.Г. Автоматизированные вспомогательные котлы-генераторы инертных газов //Судостроение 1982. №7. С. 17-20.

6. Коршунов Л.П. Утилизация тепла на судах флота рыбной промышленности. М.: Лег. пищ. пром-сть, 1983. 232 с.

7. Проектирование судовых парогенераторов К.С. Дементьев, В.А. Романов, А.С. Туолаков. Д.И. Волков. Л.: Судостроение. 1986. 332 с.

8. Седаков Л.П., Баракан Г.Х. Топливные проблемы в судовой энергетике // Судостроение. 1983. № 2. С. 19-25.

9. Сень Л.И. Пленочные теплообменные аппараты. Л.: Судостроение. 1986. 94 с.

10. Справочник по судовой акустике. Под ред. И.П. Клюкина, И.И. Боголепова. Л.: Судостроение. 1978. 503 с.

11. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод)/Под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубовского, Э.С. Карасиной. М.: Энергия. 1973. 295 с.

12. Турлаков А.С., Нигибин А.Я., Андреев А.В. Тепловые характеристики топок судовых котлов // Судостроение. 1982. №5 С. 18-20.

13. Хряпченков А.С. Судовые вспомогательные и утилизационные парогенератеры. Л.: Судостроение, 1979. 279 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ
К
Методические рекомендации по выполнению курсовой работы

Таблица 2. Давление p, МПа, температура t, °С, удельный объем v, м^3/кг, энтальпия i кДж/кг, коэффициенты теплопроводности λ, Вт/(м·К) и кинематической вязкости v, м^2/с, критерий физических свойств Pr для воды и пара на линии насыщения

p	t	Вода					Пар				
		$v' \cdot 10^3$	i'	$\lambda \cdot 10^2$	$v \cdot 10^6$	Pr	$v'' \cdot 10^3$	i''	$\lambda \cdot 10^2$	$v \cdot 10^6$	Pr
0,1	99,6	1,043	417,5	67,86	0,298	1,75	1,695	2675,7	2,51	21,00	0,995
0,2	120,2	1,061	504,7	68,31	0,246	1,44	0,886	2706,9	2,75	11,54	1,00
0,3	133,5	1,074	561,4	68,32	0,223	1,33	0,606	2725,5	2,92	8,30	1,013
0,4	143,6	1,084	604,7	68,25	0,207	1,20	0,462	2738,5	3,06	6,50	1,023
0,5	151,9	1,093	640,1	68,15	0,197	1,14	0,375	2748,5	3,19	5,38	1,031
0,55	155,5	1,097	655,8	68,06	0,192	1,10	0,343	2752,7	3,23	4,95	1,035
0,60	158,5	1,101	670,4	68,00	0,189	1,09	0,316	2756,4	3,28	4,65	1,039
0,65	162,0	1,105	684,2	67,93	0,186	1,07	0,293	2759,9	3,34	4,32	1,042
0,70	164,9	1,108	697,1	67,80	0,184	1,06	0,273	2762,9	3,38	4,05	1,05
0,75	167,8	1,112	709,3	67,73	0,180	1,04	0,255	2765,8	3,43	3,84	1,054
0,8	170,4	1,115	720,9	67,68	0,177	1,03	0,240	2768,4	3,47	3,62	1,060
0,85	173,0	1,118	732,0	67,59	0,175	1,02	0,227	2770,8	3,51	3,34	1,064
0,90	175,4	1,121	742,6	67,48	0,173	1,005	0,215	2773,0	3,57	3,19	1,070
0,95	177,7	1,124	752,8	67,42	0,170	0,985	0,204	2775,1	3,61	3,08	1,074
1,0	179,9	1,127	762,6	67,34	0,168	0,97	0,194	2777,0	3,63	2,99	1,079
1,5	198,3	1,154	844,7	66,97	0,162	0,92	0,132	2790,4	3,99	2,12	1,127
2,0	212,4	1,177	908,6	65,13	0,148	0.875	0,0995	2797,4	4,25	1,64	1,18
2,5	223,9	1,197	962,0	64,65	0,143	0,855	0,0799	2800,8	4,49	1,38	1,23
3,0	233,8	1,216	1008,4	63,81	0,139	0,840	0,0666	2801,9	4,71	1,15	1,26

Таблица 3. Давление p, МПа, температура t, °С, удельный объем ϑ, м^3/кг, энтальпия i, кДж/кг, коэффициенты теплопроводности λ Вт(м · К) и кинематической вязкости ν, м^2/с, критерий физических свойств Pr для воды и перегретого пара

p	t	$\vartheta \cdot 10^3$	i	$\lambda \cdot 10^2$	$\nu \cdot 10^4$	Pr
0,5	20	1,002	84,3	59,87	1,0050	6,99
	60	1,017	251,5	65,46	0,4749	2,98
	100	1,044	419,4	67,90	0,2946	1,75
	160	383,6	2767,4	3,22	5,5277	1,06
	200	425,0	2855,4	3,49	6,8298	0,99
	240	464,6	2939,9	3,82	8,2374	0,97
	280	503,4	3022,8	4,20	9,7710	0,95
	320	541,6	3105,5	4,61	11,4169	0,94
1,5	190	1,141	807,6	66,93	0,1610	0,94
	220	140,6	2849,2	4,05	2,3438	1,08
	240	148,3	2899,3	4,14	2,6027	1,04
	280	162,7	2993,0	4,42	3,1369	1,00
	320	176,5	3082,1	4,77	3,7083	0,97
	360	189,9	3169,3	5,18	4,3136	0,95
2,5	200	1,156	852,8	66,41	0,1530	0,91
	240	84,0	2851,0	4,51	1,4600	1,15
	280	94,0	2959,8	4,65	1,8100	1,05
	320	103,0	3057,1	4,94	2,1600	0,99
	360	112,0	3149,6	5,30	2,5400	0,97
	400	120,0	3239,9	5,78	2,9300	0,96
1	20	1,001	84,8	59,9	1,0033	6,99
	60	1,017	251,9	65,48	0,4748	2,98
	100	1,043	419,7	67,93	0,2946	1,75
	140	1,080	589,5	68,34	0,2119	1,23
	200	205,9	2827,5	3,72	3,2800	1,04
	240	227,5	2920,5	3,97	4,0131	1,00
	280	248,0	3008,3	4,31	4,7963	0,97
	320	267,8	3094,0	4,69	5,6345	0,95
2	200	1,156	852,6	60,37	0,1530	0,91
	240	108,0	2876,3	4,31	1,8860	1,08
	280	120,0	2976,9	4,53	2,3060	1,02
	320	130,8	3069,8	4,85	2,7430	0,98
	360	141,0	3159,5	5,24	3,1990	0,96
	400	151,2	3248,1	5,66	3,6748	0,95
3	220	1,189	943,9	65,05	0,1440	0,86
	240	68,0	2823,0	4,71	1,1750	1,22
	280	77,0	2941,8	4,78	1,4710	1,08
	320	85,0	3044,0	5,03	1,7760	1,01
	360	92,0	3139,3	5,37	2,0840	0,98
	400	99,0	3231,6	2,79	2,4040	0,96

Примечание. Цифры расположенные выше жирной линии, относятся к воде, ниже жирной линии — к перегретому пару

Таблица 4. Расчетные характеристики жидких топлив

Топливо	Элементарный состав, %						Низшая теплота сгорания, $Q_{н}^{р}$, МДж/кг
	$C^{г}$	$H^{г}$	$(N^{г}+O^{г})^{*}$	$S_{л}^{г}$	$A^{р}$	$W^{р}$	
Мазут 40:							
малосернистый	87,9	10,9	0,7	0,5	0,15	2	39,8
сернистый	86,5	10,8	0,7	2,0	0,15	2	39,4
высокосернистый	85,1	10,7	0,7	3,5	0,15	2	39,2
Мазут флотский:							
Ф12	86,5	12,2	0,5	0,8	0,15	1	40,9
Ф5	85,3	12,4	0,3	2,0	0,1	1	40,9
Топливо:							
моторное	86,5	12,6	0,5	0,4	0,05	1,5	41,4
дизельное	86,3	13,3	0,1	0,3	0,01	0	42,7
* Для расчетов принимать как кислород							

Таблица 5. Переводные коэффициенты для пересчета заданной массы топлива на искомую

Заданная масса	Искомая масса		
	рабочая	сухая	горючая
Рабочая	1	$\frac{100}{100-W^{р}}$	$\frac{100}{100-A^{р}-W^{р}}$
Сухая	$\frac{100-W^{р}}{100}$	1	$\frac{100}{100-A^{р}}$
Горючая	$\frac{100-A^{р}-W^{р}}{100}$	$\frac{100-A^{с}}{100}$	1

Таблиц 6. Форма последовательности расчетов для построения диаграммы $I_г - \vartheta$

ϑ, °C	$V_{RO_2} = \cdots$, м³/кг		$V^0_{N_2} = \cdots$, м³/кг		$V^0_{H_2O}$, м³/кг		$I^0_г$, кДж/кг	$V^0 = \cdots$ м³/кг		$I^0_в$, кДж/кг
	c_{CO_2}, кДж(м³ · К)	$(V_c)_{RO_2}$, кДж(кг · К)	c_{N_2}, кДж(м³ · К)	$(V^0_c)_{N_2}$, кДж(кг · К)	c_{H_2O}, кДж(м³ · К)	$(V^0_{HO_2})_{H_2O}$, кДж(кг · К)	$I^0_г = (V_{RO_2}c_{RO_2} + V^0_{N_2}c_{N_2} + V_{H_2O}c_{H_2O})\vartheta$	$c_в$, кДж(м³ · К)	$(V^0_c)_в$, кДж(кг · К)	$I^0_в = V^0 c_в \vartheta$
0										
Через 200—300										
2200										

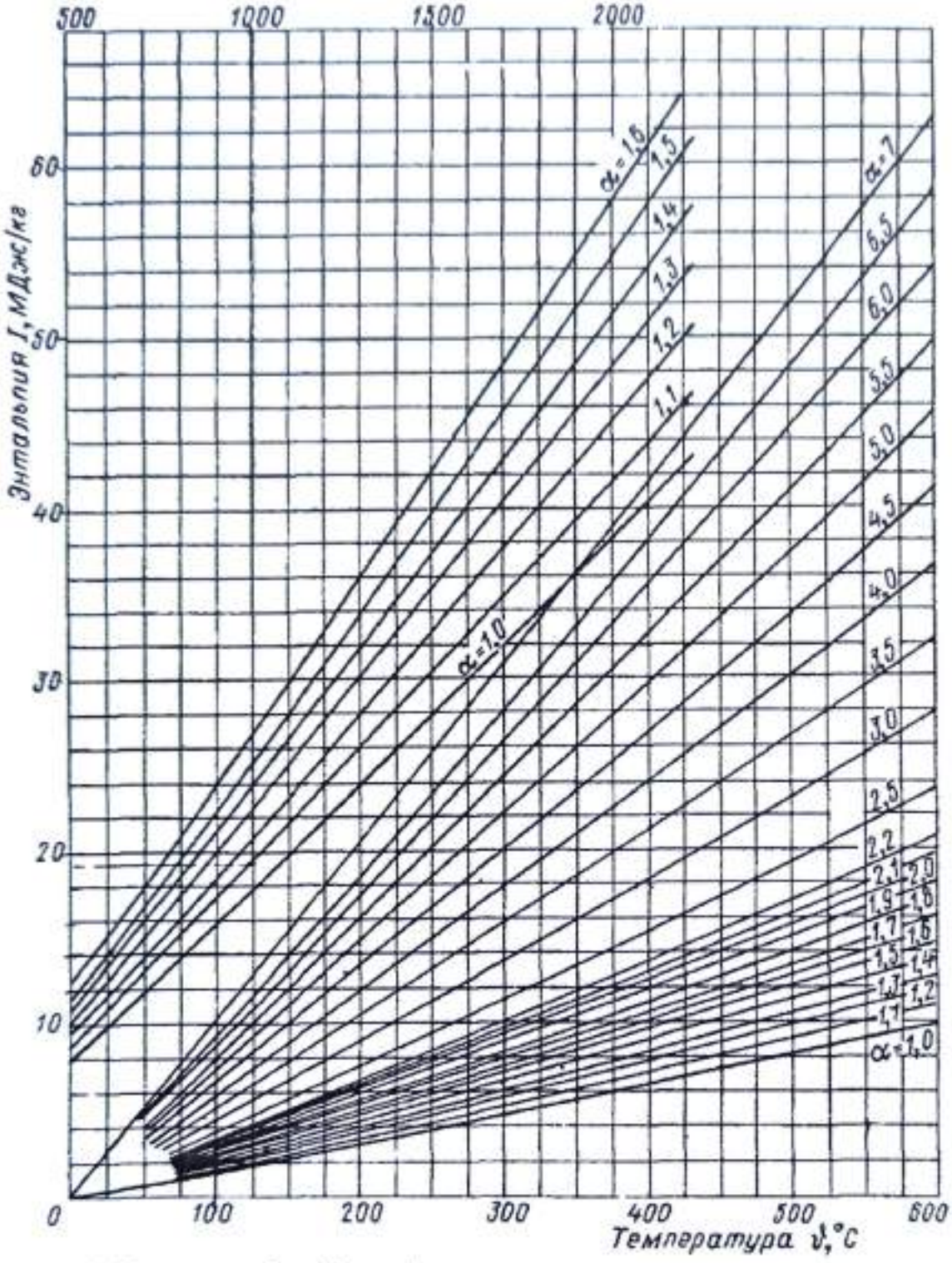


Рис. 2. Диаграмма $I_г - \vartheta$ для флотского мазута стандартного состава при различных значениях коэффициента избытка воздуха α

Таблица 7. Средние изобарные объемные теплоемкости газов и воздуха, кДж/(м^3 · К)

Температура °С, ϑ (t)	Газы		Водяной пар	Воздух	
	c_{CO_2}	c_{N_2}	c_{H_2O}	сухой $c_{с.в.}$	влажный $c_в$ при $d = 0{,}01$
0	1,60	1,30	1,50	1,30	1,32
200	1,79	1,30	1,52	1,31	1,33
400	1,93	1,32	1,57	1,33	1,35
600	2,04	1,34	1,62	1,36	1,38
1000	2,20	1,40	1,72	1,41	1,44
1400	2,31	1,44	1,83	1,45	1,48
1800	2,39	1,47	1,92	1,49	1,52
2200	2,45	1,50	2,00	1,51	1,55

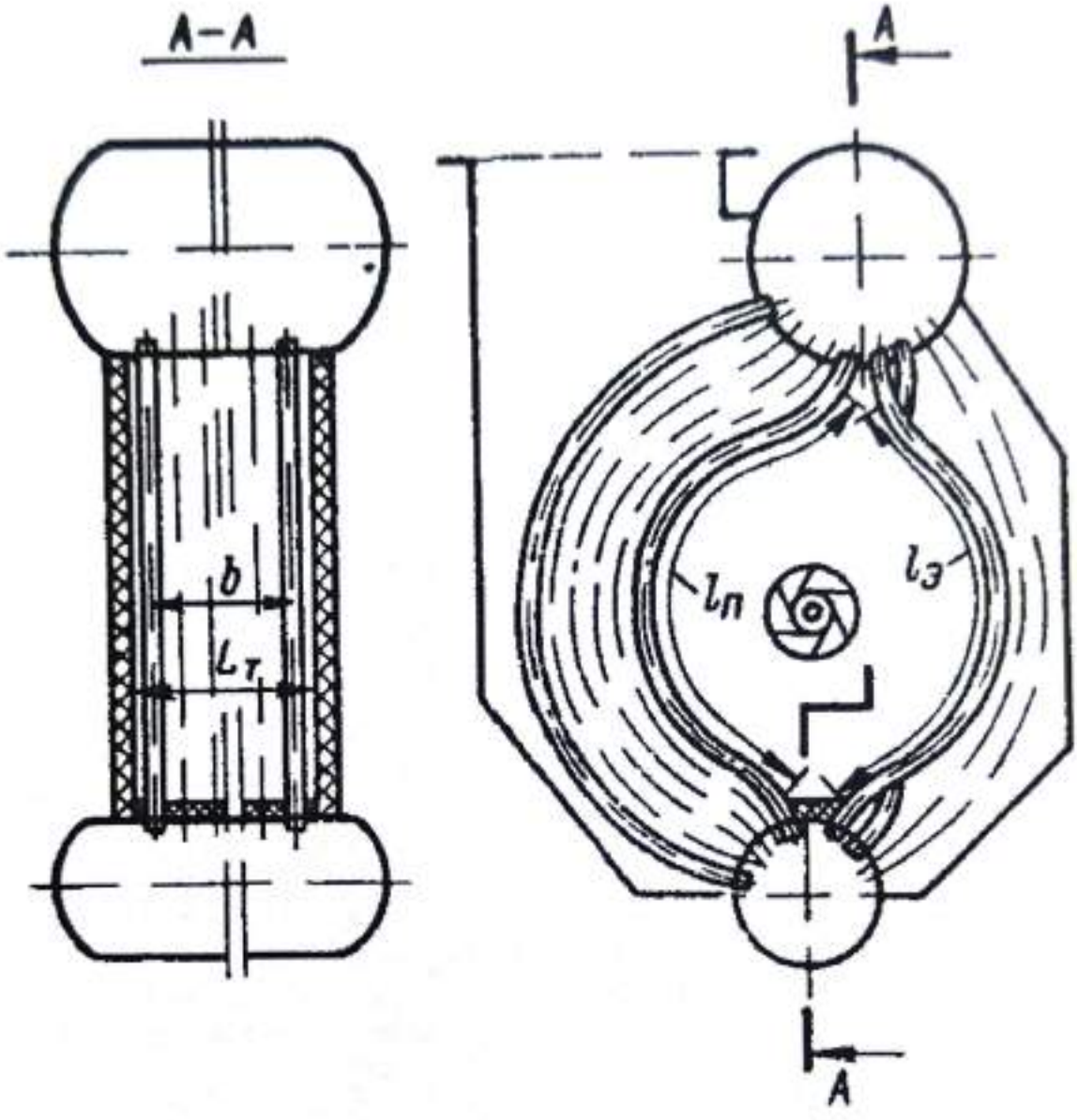


Рис. 3. К определению лучевоспринимающей поверхности нагрева топки.
b — среднее расстояние между осевыми линиями крайних труб в ряду

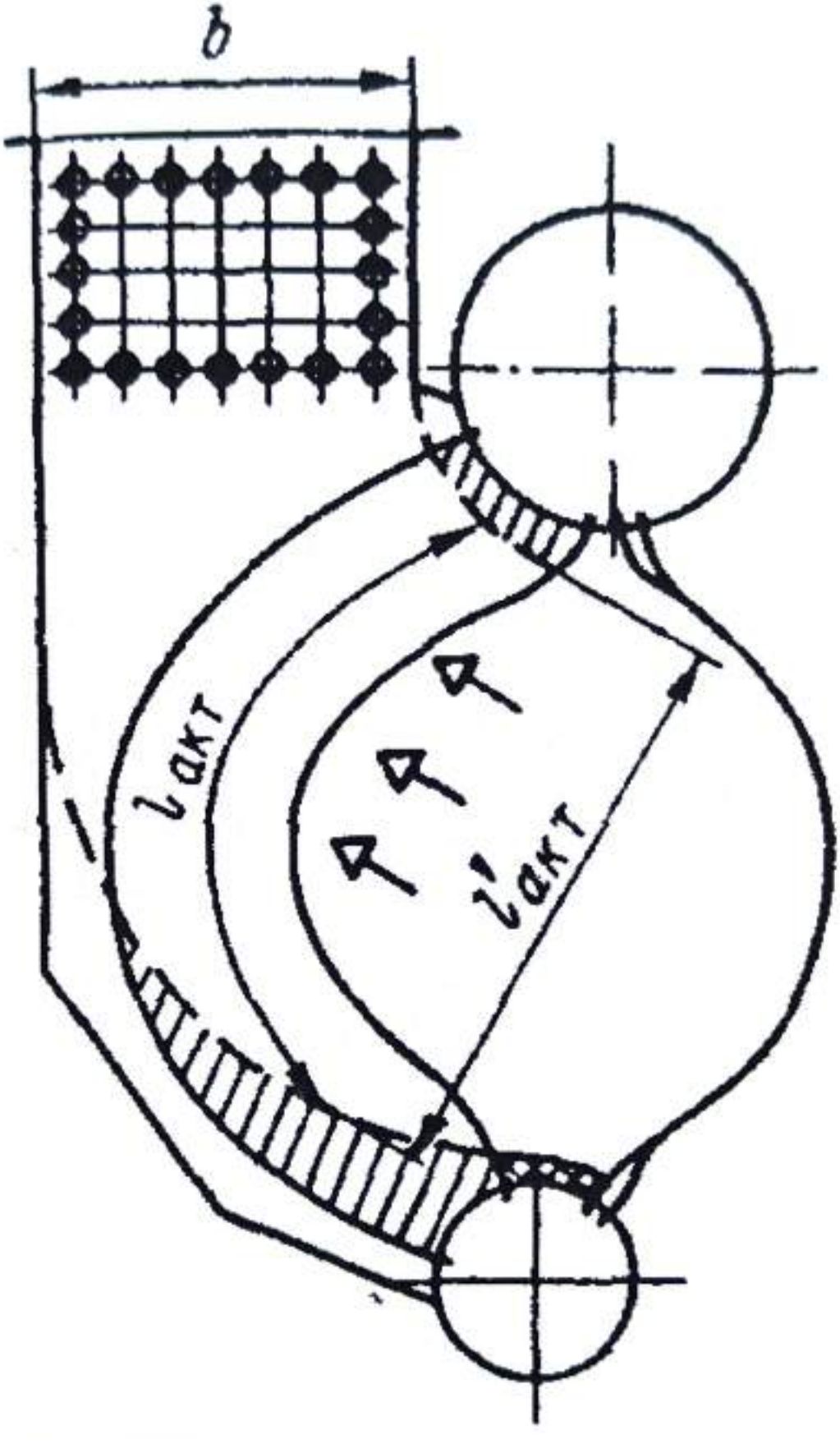


Рис. 4. Схема ВПК для определения коэффициента полноты омывания ω и площади живого сечения притопочного пучка труб

Таблица 8. Физические характеристики воздуха (числитель) и продуктов сгорания (знаменатель) среднего состава ($r_{H_2O} = 0{,}11$; $r_{RO_2} = 0{,}13$) при $p =$ 0,0981 МПа · (1 · кгс/см^2)

$\vartheta(t)$, °C	$\vartheta \cdot 10^6$, м^3/с	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м · К)	Pr	$\vartheta(t)$, °C	$\vartheta \cdot 10^6$, м^3/с	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м · К)	Pr
0	13,2 / 11,9	2,43 / 2,28	0,70 / 0,74	1100	200 / 188	8,46 / 11,75	0,72 / 0,57
100	23,2 / 20,8	3,19 / 3,13	0,69 / 0,70	1200	223 / 211	8,87 / 12,56	0,73 / 0,56
200	34,8 / 31,6	3,87 / 4,12	0,69 / 0,67	1300	247 / 234	9,27 / 13,49	0,73 / 0,55
300	48,2 / 43,9	4,48 / 4,84	0,69 / 0,65	1400	273 / 258	9,65 / 14,42	0,73 / 0,54
400	62,9 / 57,8	5,05 / 5,70	0,70 / 0,64	1500	300 / 282	10,02 / 15,35	0,73 / 0,53
500	79,3 / 73,0	5,62 / 6,56	0,70 / 0,62	1600	327 / 307	10,38 / 16,28	0,74 / 0,52
600	96,7 / 89,4	6,15 / 7,42	0,71 / 0,61	1700	355 / 333	10,75 / 17,33	0,74 / 0,51
700	115,0 / 107,0	6,66 / 8,27	0,71 / 0,60	1800	384 / 361	11,11 / 18,14	0,74 / 0,50
800	135,0 / 126,0	7,14 / 9,15	0,72 / 0,59	1900	415 / 389	11,45 / 18,96	0,74 / 0,49
900	155,0 / 146,0	7,61 / 10,01	0,72 / 0,58	2000	448 / 419	11,86 / 19,89	0,74 / 0,49
1000	177,0 / 167	8,05 / 10,9	0,72 / 0,58	2100	478 / 450	12,09 / 20,70	0,75 / 0,48

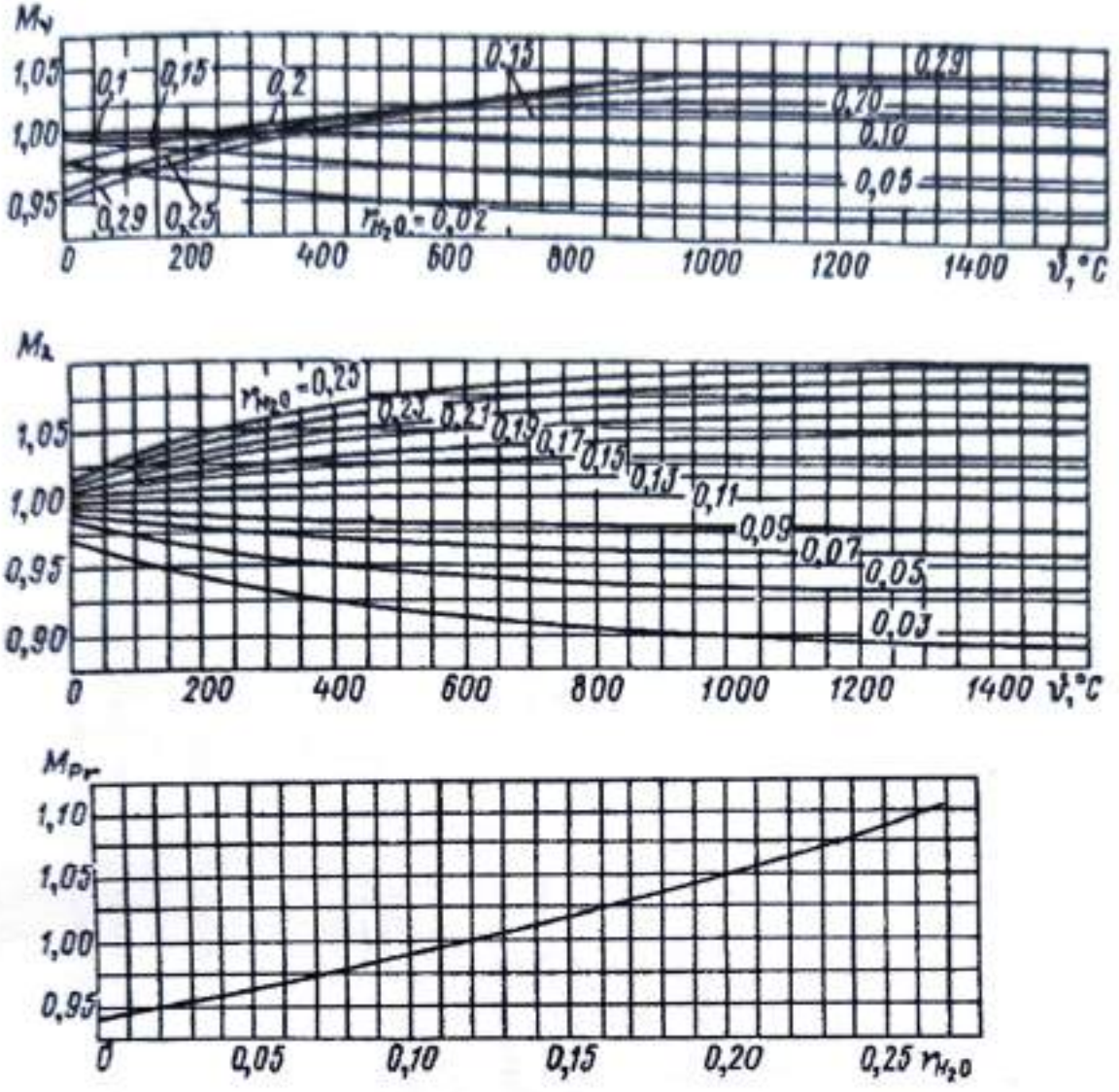


Рис. 5. Графики для определения поправочных коэффициентов M_ν, M_λ, M_{Pr}

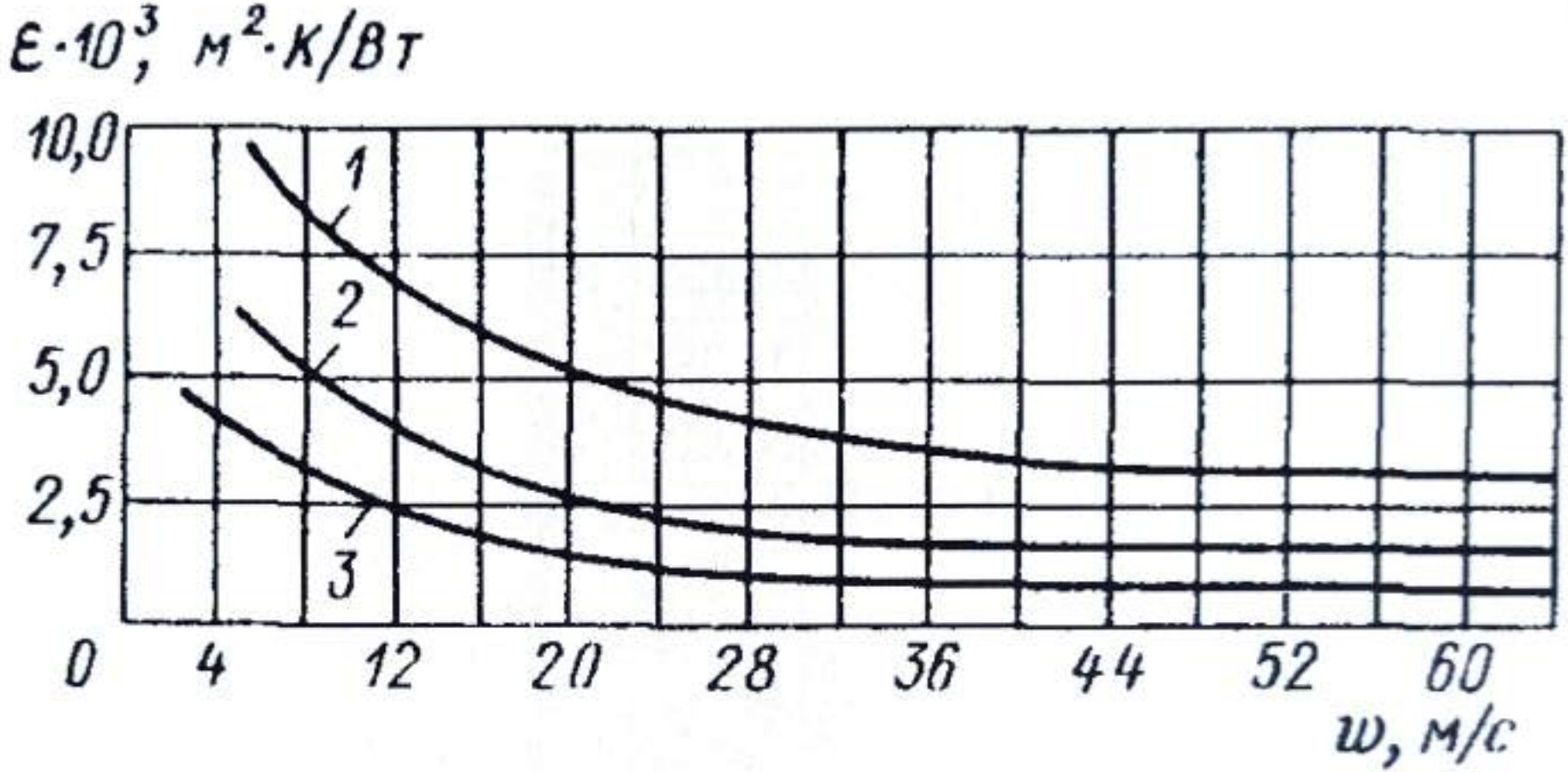


Рис. 6. Зависимость коэффициента загрязнения ε от скорости газов ω при поперечном омывании шахматных пучков труб.

1 - парообразующие пучки труб; 2 - гладкотрубные экономайзеры;
3 - пароперегреватели.

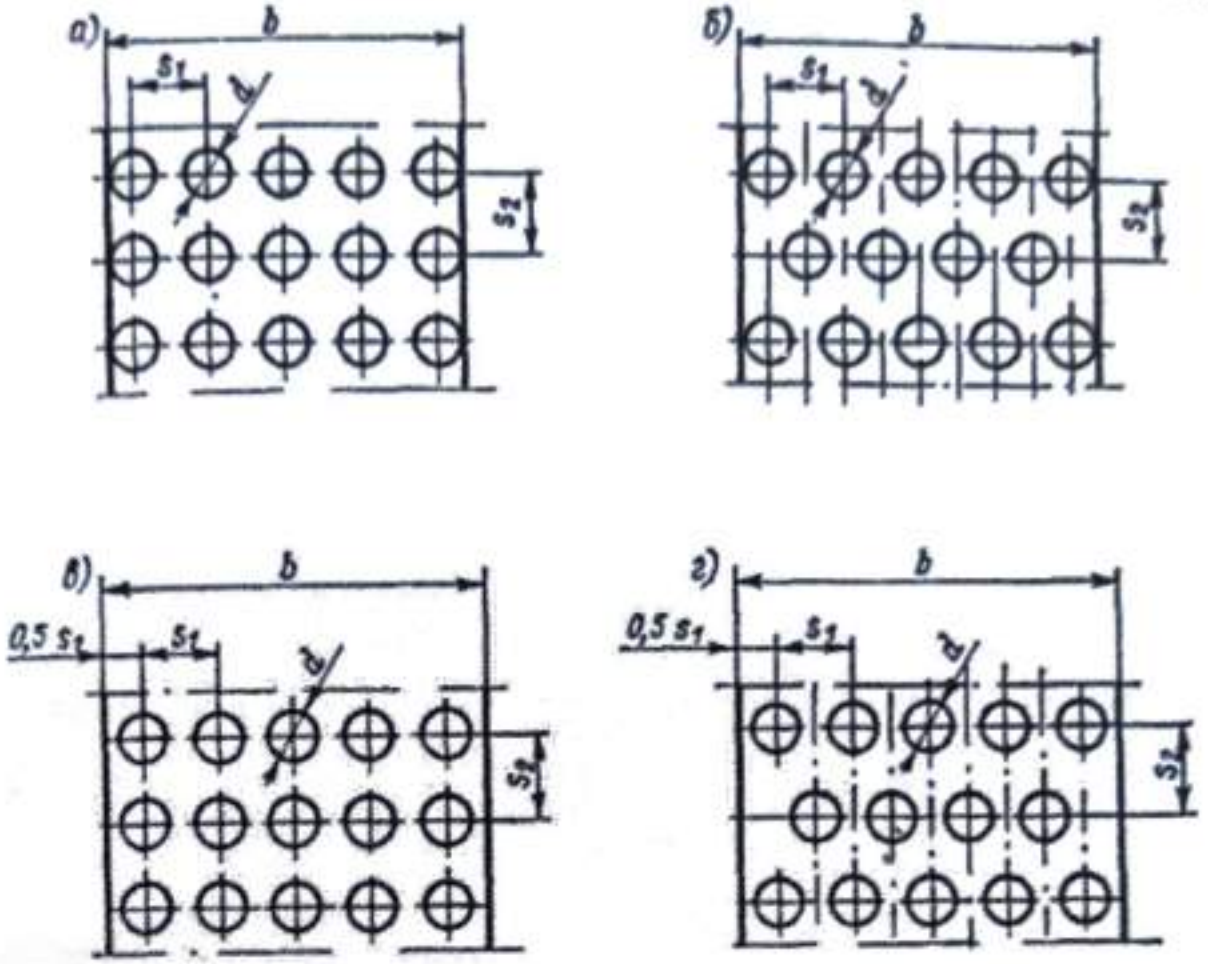


Рис. 7. Поперечные сечения газоходов с различной компоновкой трубных пучков:

а - трубы расположены непосредственно у стенки, строение пучка коридорное, $b = (z_1 - 1)s_1 + d$; б - трубы расположены непосредственно у стенки, строение пучка шахматное, $b = (z_1 — 0{,}5)s_1 + d$; в - трубы расположены на расстоянии $0{,}5 \cdot s_1$ от стенки, строение трубного пучка коридорное, $b = z_1 \cdot s_1$; г - трубы расположены на расстоянии $0{,}5s_1$ от стенки, строение трубного пучка шахматное, $b = (z_1 + 0{,}5)s_1$.

Таблица 9. Значения коэффициентов тепловой эффективности конвективных поверхностей нагрева вспомогательных и утилизационных котлов

Поверхность нагрева	Тип котла	Коэффициент тепловой эффективности ψ
Парообразующая	Вспомогательный водотрубный вертикальный (см. рис. 1.1)	0,49—0,56
Пароперегревательная:		
вертикального типа	То же	0,68—0,72
змеевикового типа	»	0,80—0,88
Экономайзерная	»	0,55—0,70
Воздухоподогревательная	»	0,75—0,85
Парообразующая	Вспомогательный газотрубный	0,60-0,65
Парообразующая	Утилизационный газотрубный	0,70-0,75
Любая из указанных выше	Утилизационный водотрубный	0,60-0,65

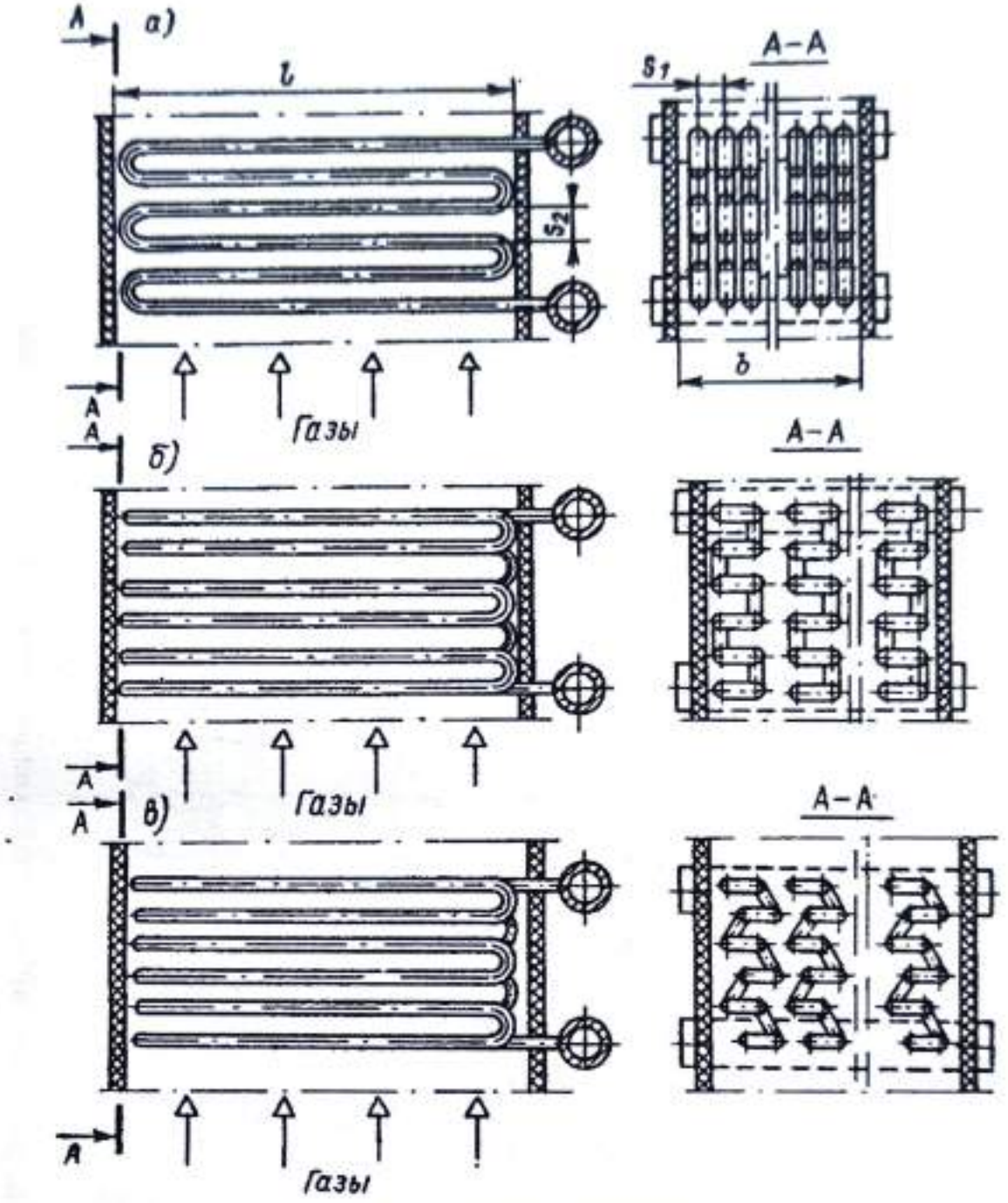


Рис. 8. Схемы змеевиков:

а - простой (повороты в одной вертикальной плоскости); б - двухходовой для коридорного строения пучка; в - двухходовой для шахматного строения пучка

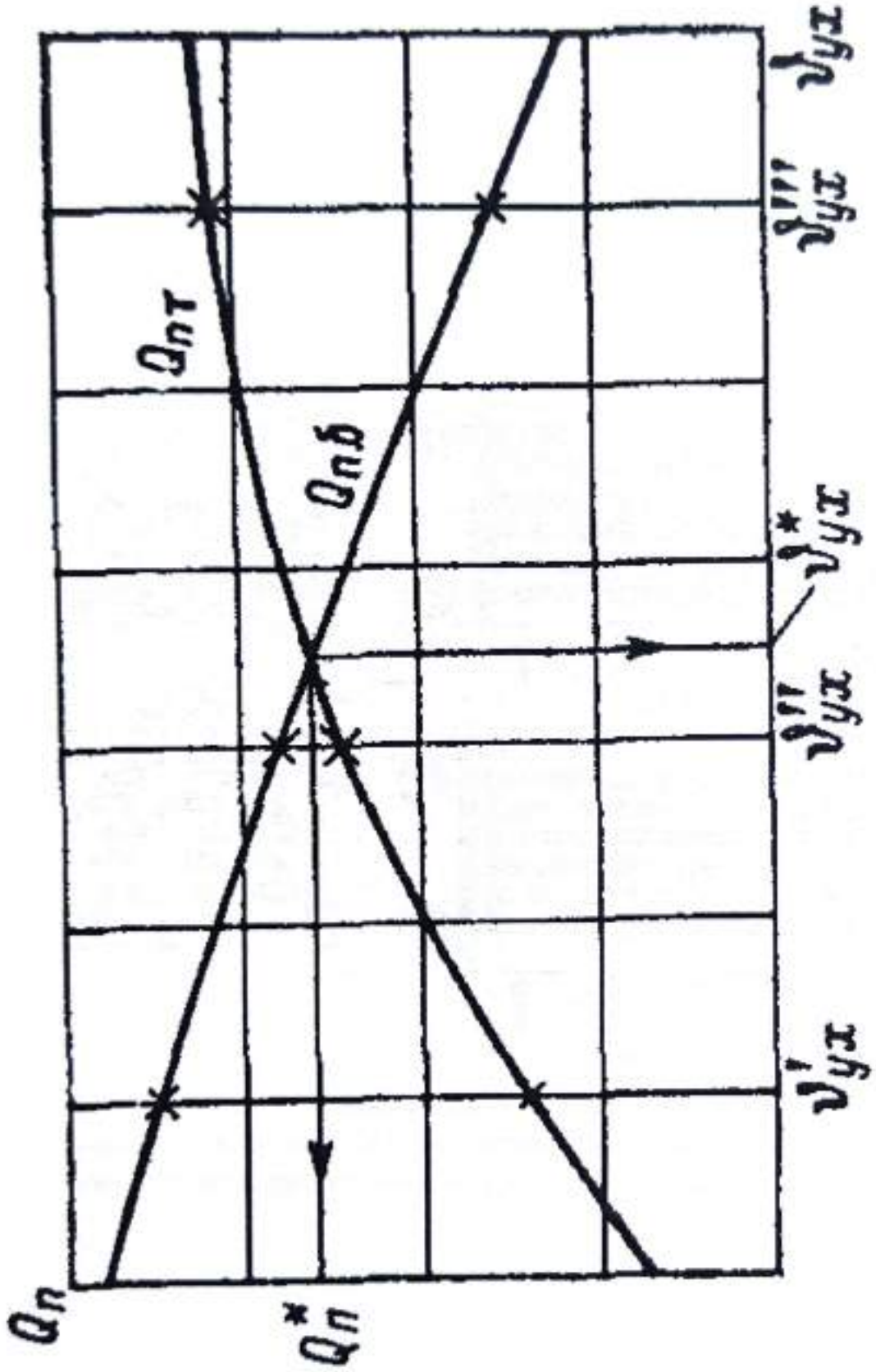


Рис. 9. Графики решения уравнений теплообмена (12.6) и теплового баланса (12.9)

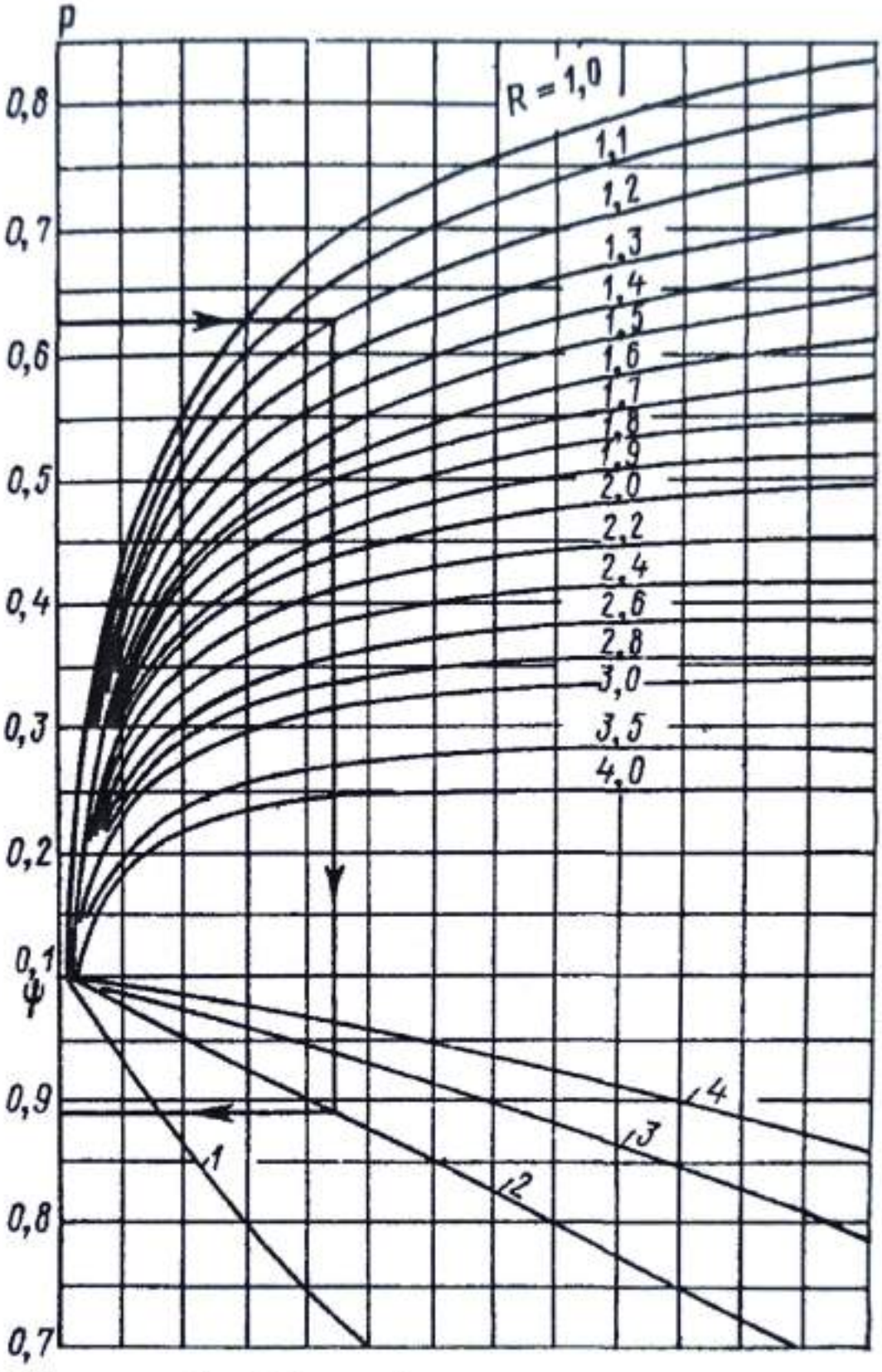


Рис. 10. Поправочный коэффициент ψ для определения температурного напора при перекрестном движении сред:
1- однократный перекрест; 2- двукратный перекрест; 3- трехкратный перекрест; 4- четырехкратный перекрест

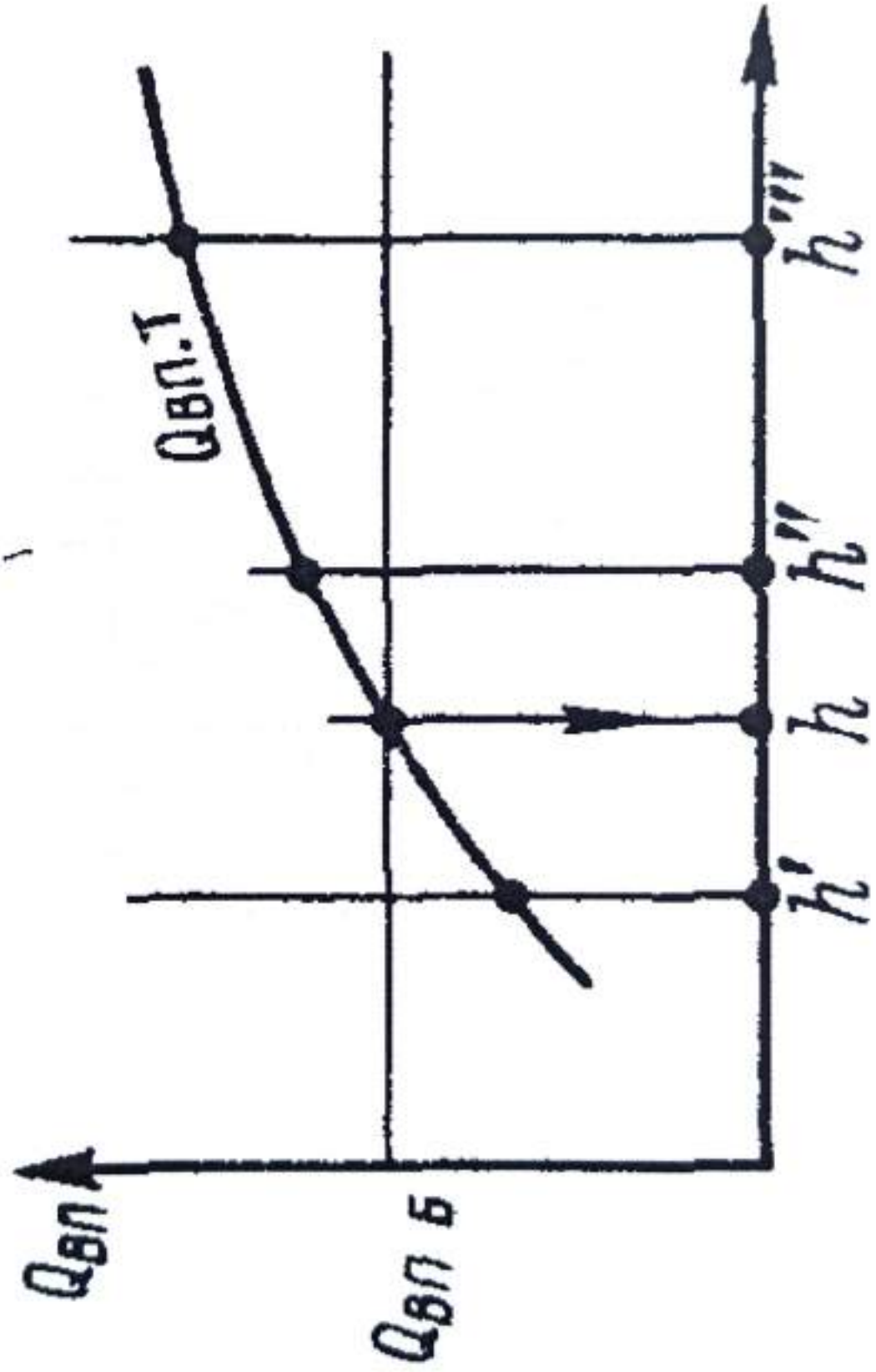


Рис. 11. К определению высоты труб воздухоподогревателя

Навчальне видання

Ігор Захарович Маслов
механік І-го розряду, к.т.н., доц., зав. каф. СЕУіС
Роман Олександрович Разінкін
механік ІІІ-го розряду, асистент. каф. СЕУіС
Андрій Ігорович Найдьонов
механік ІІІ-го розряду, асистент. каф. СЕУіС

під загальною редакцією
Костянтин Андрійович Лихогляд
механік - універсал, доц. каф. СЕУіС

УСТРІЙ СУДНОВИХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК І ЇХ БЕЗПЕЧНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ

Навчальний посібник

Російською мовою