

Исследование методик прочностного расчёта конструктивных элементов
судового парового котла

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС КОТЛОВ	8
1.1. Принцип действия, состав и системы котельных установок морских судов	8
1.2. Использование котлов и их классификация.....	9
1.3. Параметры теплоносителей и основные показатели рабочего процесса котлов	18
2. ПРОЧНОСТНЫЙ РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВОГО ПАРОВОГО КОТЛА.....	27
2.1. Общие положения	27
2.2. Применяемые материалы, их прочностные характеристики и допускаемые напряжения.....	28
2.3. Расчет прочности основных элементов котлов.....	30
2.4. Гидравлические испытания.....	35
2.5. Расчет на прочность	36
2.5.1. Расчет на прочность барабана котла	38
2.5.2. Расчет на прочность днища барабана котла.....	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	46

ВВЕДЕНИЕ

Применение водяного пара для различных целей и устройств, облегчающих труд человека, осуществлялось очень давно, раньше, чем была изобретена паровая машина. К таким устройствам можно отнести, например, шар Герона Александрийского (около 120 г. до н. э.) и паровую пушку Леонардо да Винчи (XV в.). Агрегаты, генерирующие пар для использования с целью получения механической работы, созданы несколько столетий спустя.

Впервые паровой котел как генератор, производитель пара, был отделен от исполнительного механизма в 1600 г. в установке Джамбатиста дела Порта для подъема воды. Однако отсутствие в то время универсального парового двигателя тормозило развитие паровых котлов.

Направление по созданию корабельных паровых котлов последовательно возглавляли Э.Э. Папмель, М.И. Шулинский, Г.А. Гасанов. Ими был спроектирован паровой котел для сторожевого корабля “Ураган” проекта. В процессе его создания был развернут комплекс научно-исследовательских и экспериментальных работ по теории горения и внутрикотловых процессов.

В январе 1930 г. после стендовых испытаний нескольких вариантов комиссией был принят к серийному производству паровой котел для этого корабля. В этом же году на Северной судостроительной верфи во главе с В.А. Бжезинским было организовано ЦКБС-1, в состав которого входили и турбинисты, возглавляемые Б.С. Фрумкиным. Коллективом турбинистов был создан первый отечественный турбозубчатый агрегат, состоящий из высокооборотных турбин высокого и низкого давления и зубчатого редуктора (максимальная частота вращения гребного вала составляла 630 об/мин).

В конце 30-х годов по мере накопления опыта проектирования, завершения теоретических экспериментальных работ и совершенствования

технологии изготовления корабельного оборудования отечественная судостроительная промышленность самостоятельно приступила к постройке энергетических установок легких крейсеров типа «Чапаев» и тяжелого крейсера «Кронштадт».

Опыт Второй мировой войны показал, что котлотурбинные энергетические установки большинства классов кораблей имеют недостаточную топливную экономичность, маневренность, долговечность котельных трубок, а также большие массогабаритные показатели. Для решения этих проблем необходимо было восстановить специализированные предприятия и конструкторские бюро. Так, в 1946 г. было создано специальное КБ котлостроения, которое возглавил Г.А. Гасанов. В 1946-1952 гг. на Северной судостроительной верфи было организовано СКБТ, которое возглавил опытный инженер Г.А. Оглобин.

В своей работе конструкторы использовали результаты исследований ученых Н.Н. Семенова, Я.Б. Зельдовича, Д.А. Франк-Каменецкого, Г.Ф. Кнорре, Л.А. Вулуса, Г.А. Абагянца, Н.М. Кузнецова. Велись научные работы, которые решали одну из важнейших проблем по организации смесеобразовательных процессов подогрева и испарения капель топлива, совершенствованию аэродинамической основы организации процессов в топке. К выполнению ряда работ были подключены специалисты Военно-морской академии и военно-морских училищ. Работы были направлены главным образом на создание высокоэкономичных автоматизированных паровых котлов с КПД 85—86% и подачей воздуха в топку.

Проведение новых исследований совпало с началом проектирования котлотурбинных энергетических установок для ряда кораблей: СКР «Горностай», ЭМ «Неустрасимый», ЭМ «Веский».

Для СКР «Горностай» был создан не имеющий аналогов турбозубчатый агрегат ТВ-9, состоящий из однокорпусной высокооборотной турбины реактивного типа, двухступенчатого редуктора с раздвоением мощности и конденсатора с самопроточной циркуляцией. Для повышения

экономичности установки, начиная с ЭМ «Неустрасимый», в главных котлах КВ-76 были увеличены начальные параметры пара до давления 64 кгс/см² и температуры перегрева – до 470°С.

С целью увеличения теплонапряжения топочного объема в котлах были применены подача воздуха в топку с давлением 900-1100 мм.в.ст. и двухфронтное отопление. Для этих кораблей также разработан высокооборотный двухкорпусный агрегат ТВ-8, большой мощности, с гибкими связями подвижных концов турбин с фундаментом. Для этих установок был создан и принципиально новый автоматизированный насосный турбоагрегат, включающий три насоса – питательный, конденсатный и бустерный – с единым высокооборотным турборедукторным приводом. Впервые были использованы подшипники на водяной смазке.

В результате комплекса этих работ была разработана новая методология компоновки энергетического оборудования, позволяющая разместить в одном энергетическом отсеке паровые котлы и турбозубчатый агрегат с обслуживающим их оборудованием, что упростило конденсатно-питательную систему, повысило экономичность и улучшило массогабаритные характеристики установки. Без существенных изменений эта установка применялась на большой серии ЭМ «Веский» и БПК «Гремящий».

При постройке кораблей в период 60-70-х годов потребовалось создание более экономичной и компактной котлотурбинной установки большой мощности. Выполненные в СКБК, ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова, 1-м ЦНИИ МО исследования показали возможность улучшения характеристик котельной установки на основе компрессорного наддува воздуха в топку котла с использованием тепла уходящих газов в турбонаддувочном агрегате.

Одновременно коллективом Кировского завода под руководством главного конструктора В.Э. Берга был разработан турбозубчатый агрегат ТВ-

12 мощностью 45 000 л.с., который стал основной базовой моделью для надводных кораблей.

Используя накопленный опыт проектирования и достижения науки 50-60-х годов, конструкторам удалось повысить мощность агрегата на 25% при одновременном снижении на 35% его массы и увеличении КПД на 3-4%.

В это же время в СКБК под руководством Г.А. Гасанова был спроектирован и построен высоконапорный паровой котел КВН 95/64 с высокими параметрами пара, в котором впервые было применено разработанное сотрудником 1-го ЦНИИ МО Ю.А. Убранцевым газоохладящее устройство эжекционного типа, позволившее снизить температуру уходящих газов до 100°C, что обеспечило значительное уменьшение теплового поля корабля.

Все эти нововведения были заложены в котлотурбинную энергетическую установку ракетного крейсера «Грозный». Став базовой, в дальнейшем она прошла ряд этапов усовершенствования конструкций главных и вспомогательных механизмов, автоматизированного управления, водного режима, улучшения характеристик и др. Мощность ГТЗА-674 была увеличена до 50 000 л.с.

Для кораблей постройки 70-80-х годов (ЭМ «Современный», «Адмирал Флота Советского Союза Кузнецов») были созданы высоконапорные котлы КВГ-3 и КВГ-4, а для резервной котельной установки корабля «Адмирал Нахимов» проекта 1144 - котел КВГ-2.

Таким образом, в результате большого объема выполненных НИР и ОКР в послевоенный период была создана унифицированная автоматизированная котлотурбинная энергетическая установка с высоконапорными котлами, которая является самой мощной среди установок на органическом топливе и широко применяется на современных крупных надводных кораблях.

Актуальность темы ВКР заключается в том, что в настоящее время особую актуальность приобретают вопросы рационального использования

топливно-энергетических ресурсов. Экономия топлива в судовых энергетических установках может быть достигнута снижением его расхода во вспомогательных котлах и применением систем утилизации тепла отработавших газов судовых двигателей внутреннего сгорания. Особое место должно уделяться изучению влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на экономичность котлов.

Цель ВКР - исследование методик прочностного расчёта конструктивных элементов судового парового котла.

Задачи ВКР:

- изучить принцип действия, состав и системы котельных установок морских судов;
- рассмотреть назначение использования котлов и их классификацию;
- рассмотреть параметры теплоносителей и основные показатели рабочего процесса котлов;
- рассмотреть применяемые материалы, их прочностные характеристики и допускаемые напряжения;
- изучить методики расчета прочности основных элементов котлов;
- произвести расчет на прочность барабана котла;
- произвести расчет на прочность днища барабана котла.

Объект ВКР – судовой паровой котел.

Предмет ВКР - прочностной расчёт конструктивных элементов судового парового котла.

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС КОТЛОВ

1.1. Принцип действия, состав и системы котельных установок морских судов

Принцип действия парового котла определяется сущностью его рабочего процесса, который состоит в том, чтобы за счет подвода определенных количеств тепла и воды генерировать заданное количество и качество пара.

Есть два источника получения тепла в котле:

– первый (основной) - непосредственное сжигание органического топлива в топке котла. При этом образуются продукты сгорания топлива (дымовые газы), которые являются теплоносителем;

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

Надежность и эффективность рабочего процесса судового котла обеспечиваются как собственно агрегатом, так и другими частями установки, в состав которой могут входить вспомогательные устройства: насосы (питательные, топливные и циркуляционные), вентиляторы, дымососы, а также элементы системы автоматического регулирования, арматура и контрольно-измерительная аппаратура.

Паровой котел в агрегатированном исполнении в основном состоит из топки, парообразующих элементов, пароперегревателя, экономайзера и воздухоподогревателя. В топке сжигается топливо, в котельных элементах происходит парообразование, в перегревателе - превращение влажного насыщенного пара в сухой насыщенный, а затем в перегретый. Экономайзер служит для подогрева воды, поступающей в котел, при этом используется тепло дымовых газов. В воздухоподогревателе подогревается воздух, поступающий в топку для сжигания топлива. Возможно использование для подогрева воздуха двух теплоносителей - дымовых газов и пара.

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

Все обслуживающие агрегаты, вспомогательные элементы и системы составляют судовую котельную установку [7, с. 11].

1.2. Использование котлов и их классификация

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.

Сравнительную оценку конструктивных схем и теплотехнических характеристик паровых котлов производят согласно определенной их классификации. Возможно несколько различных подходов к вопросу о классификации агрегатов. Применительно к судовым энергетическим установкам классифицируют котлы по следующим основным признакам (с учетом ОСТ5.4295—79).

1. По назначению котлы используют в составе как главных, так и вспомогательных установок.

Главные котлы обеспечивают паром главный двигатель, приводящий в действие гребной винт, и некоторые вспомогательные потребители. Главные котлы устанавливают на современных паротурбинных судах. Их ранее использовали на пароходах сравнительно давней постройки, на которых главным двигателем была паровая поршневая машина.

Вспомогательные котельные установки применяют, как правило, на теплоходах. В этом случае установка состоит из агрегата, в котором сжигается органическое топливо, - его называют обычно вспомогательным

котлом, и утилизационного котла. На транспортных судах с главной пароэнергетической установкой вспомогательные котлы обычно не нужны.

2. По конструктивному исполнению, т. е. по относительному движению теплообменивающихся сред - дымовых газов и воды, котлы могут быть разделены на водотрубные и газотрубные. В водотрубных котлах внутри труб движется вода и пароводяная смесь, а нагретые дымовые газы (основной теплоноситель) омывают трубы снаружи. В газотрубных котлах, наоборот, внутри труб движутся дымовые газы, а вода окружает трубы с наружной стороны.

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

3. По принципу движения воды и пароводяной смеси все котлы можно разделить на агрегаты с естественной циркуляцией и с принудительным током воды. Процесс естественной циркуляции, т. е. движение воды и пароводяной смеси по замкнутому контуру, происходит за счет разности плотностей воды и пароводяной смеси и правильной компоновки парообразующих элементов.

Принудительный ток воды и пароводяной смеси в котлах создается специальным насосом. Причем различают два типа агрегатов: прямоточный, в котором принудительный ток обеспечивается питательным насосом, подающим в котел питательную воду, и с искусственной циркуляцией (или многократно принудительной), создаваемой отдельным циркуляционным насосом.

В настоящее время на морских судах как главные, так и вспомогательные котлы обычно выполняют водотрубными с естественной циркуляцией. Котлы с искусственной циркуляцией широко применяют как утилизационные агрегаты на теплоходах. Прямоточные котлы в судовой

практике не применяют, но их широко используют в стационарных установках.

4. По способу подачи воздуха на горение топлива, т. е. по давлению в топке водотрубные котлы можно разделить на обычные и с наддувом. В обычных агрегатах топливо сжигается в топке при давлении, примерно равном атмосферному, а с наддувом - при давлении значительно выше атмосферного. В обычных котлах воздух подается вентилятором, и поэтому их называют также котлами с вентиляторным дутьем. Котлы с наддувом газотурбокомпрессором, использующим энергию продуктов сгорания, - называют котлами с газотурбинным наддувом, или высоконапорными. На морских судах применяют обычные котлы без наддува.

5. По типу топлива главные и вспомогательные котлы могут работать на жидком, твердом и газообразном топливе. В судовых установках применяют котлы на жидком топливе. На некоторых газовозах в топках вспомогательных котлов сжигается газ испаряющегося груза [14, с. 248].

Рассмотрим подробнее конструкции основных разновидностей котлов.

Как уже было указано выше, по типу омывания поверхности нагрева газами труб или иных элементов судовые котлы подразделяются на две основные группы: газотрубные и водотрубные.

В газотрубном котле горячие газы как основной теплоноситель движутся внутри труб, а вода окружает их снаружи, в водотрубном котле — наоборот: вода и пароводяная смесь находятся внутри труб, а горячие газы омывают их снаружи.

При наличии двух групп котлов всегда имеется промежуточная группа, обладающая свойствами газотрубных, и водотрубных котлов (см, рис. 1).

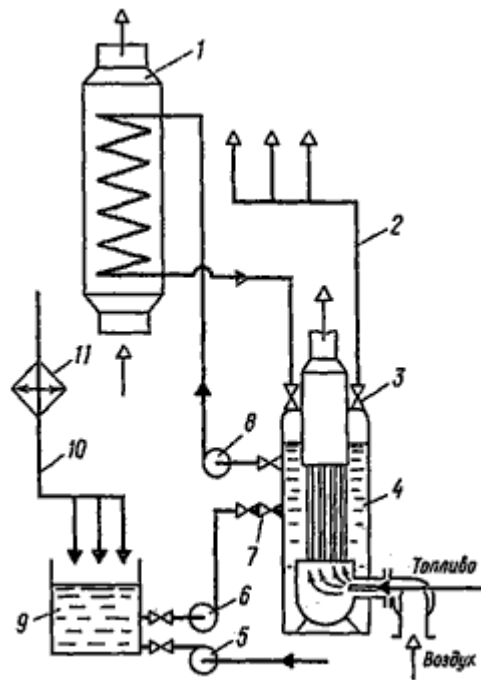


Рис. 1. Схема котельной установки с комбинированным отоплением

На современных судах в качестве главных применяются только водотрубные котлы. Вспомогательные котлы на теплоходах и газотурбоходах могут быть газотрубными и водотрубными (или газоводотрубными). У газоводотрубных котлов имеются элементы поверхности нагрева, сконструированные по газотрубному и водотрубному принципам. Газотрубные и газоводотрубные котлы чаще встречаются на судах зарубежной постройки. В последние годы преимущественное распространение стали получать водотрубные котлы.

Вертикальный газотрубный котел (рис. 2, а), В цилиндрическом корпусе 3 котла размещены топочная 4 и дымовая 1 камеры, соединенные прямыми трубами 6. Топливо и воздух в топку подаются от топливно-форсуночного агрегата (на рис. 2, а не показан) через патрубок 5, а продукты сгорания отводятся через патрубок 2 в дымоход.

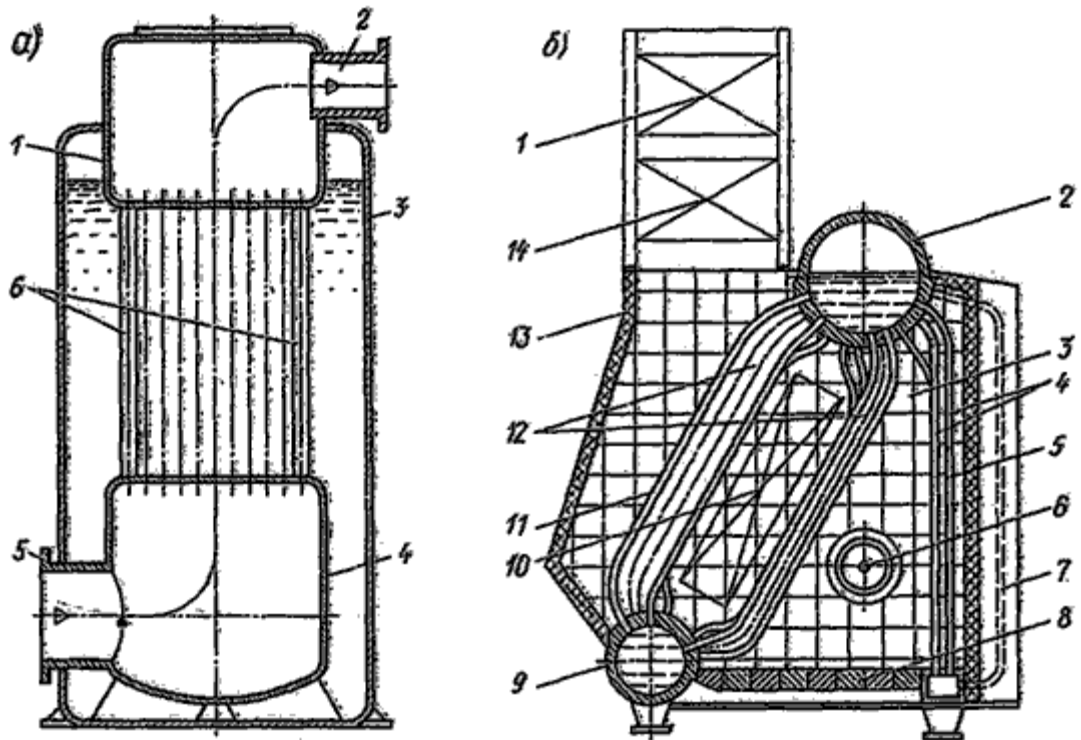


Рис. 2. Газотрубный (а) и водотрубный (б) котлы

Водотрубный котел (рис. 2, б). Котел состоит из верхнего парового 2 и нижнего водяного 9 коллекторов, соединенных трубами 12. Пучок труб 4, расположенных на боковой стенке, называется боковым экраном. Трубы 5 второго ряда экрана, загороженные трубами первого ряда, и трубы 7, расположенные вне топки или в специальных выгородках, называются опускными. У некоторых котлов опускными называют также трубы 11, наиболее отдаленные от топки. Все остальные трубы подъемные.

В зависимости от расположения различные поверхности нагрева котла получают неодинаковое количество теплоты, что в значительной степени обуславливает характер теплообмена. На рис. 2, б схематично показаны также экономайзер 1, воздухоподогреватель 14, обшивка котла 13, форсунка котла 6, кирпичная кладка 3, под 8, пароперегреватель 10.

Знакомясь с классификацией различных типов рассмотренных котлов, можно отметить основные достоинства и недостатки водотрубных и газотрубных котлов.

Водотрубные котлы имеют значительно большую паропроизводительность при меньших массовых показателях, чем газотрубные. Вспомогательные, особенно газотрубные котлы обычно ограничены давлением до 1,8 МПа и температурой 300 — 320 °С.

В зависимости от конструкции котла и эксплуатационных условий минимальное время на подъем пара до рабочего давления составляет 1,5 — 3,0 ч для водотрубных котлов и 4 — 24 ч для газотрубных. Все это объясняется меньшим количеством воды в водотрубном котле, хорошей ее циркуляцией, эластичностью труб, соединяющих коллекторы котла.

Сравнивая дополнительно взаимные достоинства и недостатки газотрубных и водотрубных котлов, можно также отметить: в водотрубном котле воды меньше его часовой паропроизводительности, поэтому изменение уровня воды от наивысшего до наименьшего допустимых может произойти очень быстро. Во избежание аварийных ситуаций и четкого поддержания уровня приходится применять более сложные автоматические системы регулирования и питания котла, связанные с автоматическим регулированием горения топлива. Необходимо использовать и сложную систему автоматического регулирования давления пара. На газотрубные котлы относительно мало влияет качество питательной воды. У более теплонапряженных водотрубных котлов при отложениях накипи на поверхности нагрева может создаваться опасность перегрева металла труб и их разрыва. Газотрубный котел имеет сравнительно небольшую паропроизводительность, но зато более высокую степень сухости пара вследствие невысокой интенсивности парообразования. Газотрубный котел имеет меньшую чувствительность к колебаниям нагрузки, что объясняется его большой аккумулялирующей способностью.

При всех достоинствах водотрубных утилизационных котлов с многократной принудительной циркуляцией они обладают меньшей надежностью из-за необходимости установки циркуляционных насосов,

работающих в сравнительно тяжелых условиях перекачки горячей воды и пароводяной смеси.

Упрощенные схемы вспомогательных котлов, наиболее распространенных на морских судах, показаны на рис. 3.

Секционный горизонтальный котел (рис. 3, а). У водотрубных котлов секционного типа классификационным признаком, относящим их к горизонтальному или вертикальному типу, служит наклон труб. У горизонтальных котлов наклон труб менее 30° , а у вертикальных более 30° (обычно $45 - 90^\circ$). Котлы имеют горизонтальный паровой коллектор 3 и прямые парообразующие трубы 6, объединенные камерами 1 и 5 в секции. Каждая секция соединяется с паровым коллектором короткими патрубками 4 и пароотводящей трубой 2.

Секционные котлы были широко распространены в недавнем прошлом как главные; в настоящее время они используются в качестве вспомогательных на отдельных серийных дизельных танкерах.

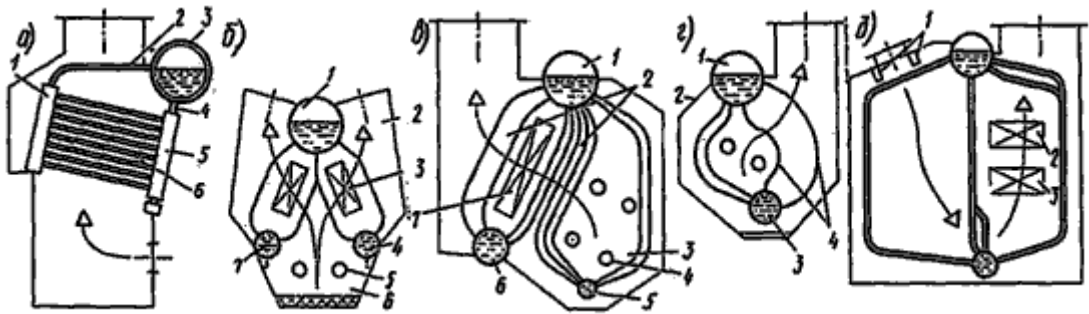


Рис. 3. Схемы основных конструктивных разновидностей водотрубных котлов с естественной циркуляцией

Трехколлекторный двухпроточный котел (рис. 3, б). У этого котла 2 паровой коллектор 1 соединяется с двумя водяными коллекторами 4 и 7 пучками труб. Газы, образующиеся в топке 6 при работе форсунок 5, проходят между трубами. Внутри пучков парообразующих труб может

располагаться пароперегреватель 3. Когда у каждого хода газа обогреваемые элементы разные, если пароперегреватель установлен на одной стороне движения газа, то котел будет ассиметричный, а когда по обе стороны хода газа стоят два одинаковых элемента, то котел будет симметричным. В настоящее время трехколлекторные котлы могут встретиться как главные и вспомогательные лишь на старых судах. Котлы такого типа часто называют котлами шатрового или треугольного типов. У котлов треугольного типа коллекторы и парообразующие трубы могут располагаться вертикально и горизонтально.

Трехколлекторный однопроточный котел (рис. 3, в). Котел конструктивно похож на серийные главные котлы отечественных паротурбинных установок Ленинградского производственного объединения «Кировский завод». Котел однопроточный, с естественной циркуляцией, имеет четыре коллектора — паровой 1, два водяных 5, б и один пароперегревателя 7. Газы, образующиеся в топке 3 при работе форсунок 4, проходят между трубами 2. Пароперегреватель 7 вырабатывает пар с температурой 470 °С при давлении в котле 4,4 МПа. Агрегат оборудован четырьмя паромеханическими форсунками 4, размещенными на переднем фронте котла. Это наиболее распространенный главный паровой котел серийных агрегатов для судов типов «Ленинский комсомол», «Пекин», «София».

Двухколлекторный, однопроточный по газу котел с естественной циркуляцией (рис. 3, г). Наиболее распространенный на морских судах вспомогательный двухколлекторный, с односторонним ходом газа и естественной циркуляцией котел преимущественно отечественного производства. Котел состоит из двух коллекторов 1 и 3, соединенных изогнутыми подъемными парообразующими трубами 4, экранными трубами 2, опускными трубами и трубами второго и третьего рядов экрана.

Котел шахтного типа (рис. 3, д). Это сравнительно новый тип главных котлов с развитой радиационной поверхностью нагрева в топке.

Отличительной особенностью котлов следует отметить потолочное расположение форсунок 1 и установку двух пароперегревателей: основного 3 и промежуточного 2. Такие котлы устанавливаются на крупнотоннажных судах с мощными пароэнергетическими установками.

Горизонтальный газотрубный котел (рис. 4, а). Это газотрубный котел одной из старейших конструкций, именуемый ранее обратным котлом шотландского типа, или обратным котлом. Конструкция просуществовала на флоте более 80 лет благодаря надежности, неприхотливости к питательной воде, большой аккумулирующей способности, прочности и простоте. Котел горизонтальный, цилиндрической формы, хорошо крепится на судовом фундаменте. Котел имеет цилиндрический корпус 3, топку (жаровую трубу) 6, огневую камеру 5, горизонтальные прямые трубы 4, дымовую коробку 2 и выпускной дымоход 1. Топка оборудована ротационной форсункой. Для внутреннего осмотра, вальцовки и очистки труб предусмотрены лазы и горловины. Существенными недостатками котла являются невысокое давление пара, неорганизованная циркуляция воды, жесткость конструкции, большая металлоемкость и высокая трудоемкость изготовления и ремонта.

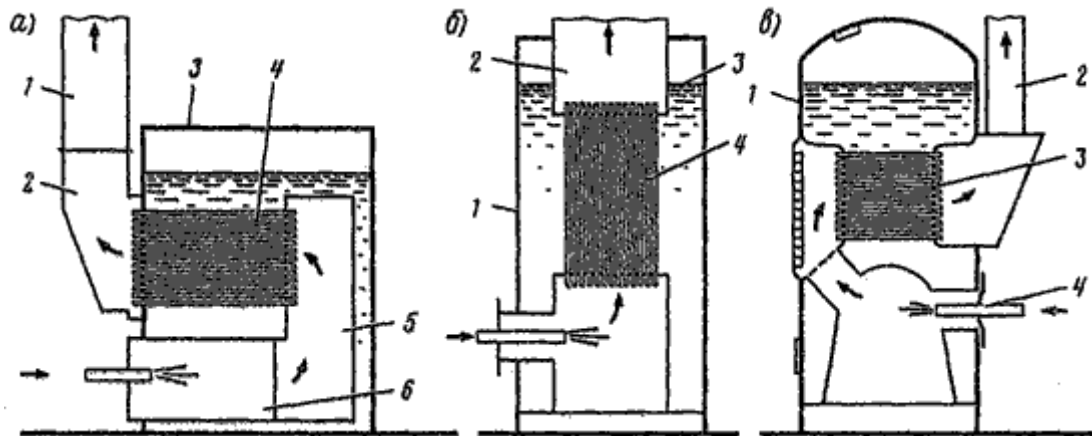


Рис. 4. Схемы газотрубных котлов

Вертикальный газотрубный котел с вертикальными трубами (рис. 4; б). Это котел обычного типа широко распространенный на судах зарубежной и

отечественной постройки. Котел имеет цилиндрический корпус 1 и вертикальные прямые трубы 4, соединенные с дымовой камерой 2. Паровое пространство расположено выше зеркала испарения 3. Котел имеет автоматизированный топливно-форсуночный агрегат с безвахтенным обслуживанием. С аналогичной конструкцией котла можно встретиться на танкерах типа «Сплит».

Вертикальный газотрубный котел с горизонтальными трубами (рис. 4, в). Котел имеет цилиндрический вертикальный корпус 1, прямые горизонтальные трубы 3 камеры для прохода газа, выпускной дымоход 2. Котел работает от топливно-форсуночного агрегата 4 с безвахтенным обслуживанием. Для поворота газа в камерах предусмотрены съемные щитки, одновременно упрощающие и очистку котла.

Рассмотренная классификация судовых котлов по указанным основным признакам нуждается в дополнениях, которые определяются конструктивными и другими конкретными особенностями агрегатов и отдельных их групп [2, с. 56].

1.3. Параметры теплоносителей и основные показатели рабочего процесса котлов

Рабочий процесс котла весьма сложен: его 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 сопротивления, на преодоление которых требуется определенный расход энергии.

В пароводяном тракте происходят процессы подвода питательной воды, подогрева ее до кипения, парообразования, перегрева пара и отвода 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 [8, с. 30].

Основными эксплуатационными показателями котла являются такие величины, которые определяют его надежность и эксплуатационную эффективность. К основным показателям относят:

- полную паропроизводительность D_k ;
- расход топлива B ;
- испарительность топлива u ;
- рабочее давление пара в барабане или сепараторе утилизационной установки p_u ;
- давление и температуру перегретого пара $p_{пер}$ и $t_{пер}$;
- коэффициент избытка воздуха α ;
- температуру уходящих дымовых газов t_{yx} ;
- коэффициент полезного действия η_k ;
- температуру питательной воды, подводимой в котел $t_{п.н}$;
- температуру воздуха, поступающего в топку для горения топлива t_B ;
- тепловое напряжение топчного объема q_v ;
- относительное водосодержание ω .

Для утилизационной установки к показателям рабочего процесса относят также температуры отработавших газов двигателя соответственно перед котлом t_1 и за ним t_2 .

Перечисленные величины изменяются во время работы котла в зависимости от его нагрузки. Закономерности изменения этих величин

различны и определяются режимом работы главной или вспомогательной пароэнергетической установки судна.

Паропроизводительность является главным показателем, характеризующим нагрузку. В условиях эксплуатации судна котел должен обеспечивать паропроизводительность, необходимую для заданного режима работы энергетической установки. В зависимости от мощности турбинной установки полная паропроизводительность одного главного котла при нормальной нагрузке, соответствующей полному ходу судна, может составлять 10000-80000 кг/ч, а иногда 100000 кг/ч и больше.

Вспомогательные котельные установки теплоходов могут иметь самые разные значения паропроизводительности - от 500 до 50000 кг/ч и более для одного агрегата, что определяется прежде всего назначением судна. Наиболее высокий расход пара требуется на крупнотоннажных дизельных танкерах (паротурбинный привод грузовых насосов, подогрев груза и др.). При выполнении расчетов котлов иногда удобно определять паропроизводительность в килограммах на секунду (кг/с) [11, с. 309].

Расход топлива является показателем, также характеризующим нагрузку котла. Расход топлива определяется общей экономичностью энергетической установки, его качеством, условиями эксплуатации и определяется в килограммах на час (кг/ч) или килограммах на секунду (кг/с).

Общие расходы на топливо довольно значительные - около 40% (иногда и выше) стоимости эксплуатации судна. Поэтому количество топлива, сжигаемого в котлах, является показателем, характеризующим эффективность всей установки. Мероприятия, обеспечивающие снижение расхода топлива, имеют первостепенное значение как при проектировании, так и при эксплуатации судовой установки.

Испарительность топлива - это условный показатель, который представляет отношение паропроизводительности к расходу топлива ($u = D_k / B$), т. е. его значение соответствует количеству пара, производимого при сжигании 1 кг топлива. Для главных котлов испарительность топлива

составляет 13-14 кг/кг, а для вспомогательных эта величина может быть несколько ниже.

Параметры пара характеризуются его рабочим давлением и температурой. 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.

Абсолютные значения параметров пара определяются типом главного двигателя и тепловой схемой установки. Для паровых транспортных судов современной постройки применяют турбинные установки, использующие пар повышенных и высоких параметров.

Экономическая целесообразность повышения параметров пара тем, больше, чем выше мощность энергетической установки [6, с. 104].

Отечественная и зарубежная практика эксплуатации судов с турбинными установками сравнительно небольшой мощности показывает, что для таких установок используют пар давлением 3-3,5 МПа и температурой 400-420° С. Указанные параметры пара обеспечивают достаточную экономичность установки, позволяют снизить стоимость постройки, так как для элементов котла и турбин может быть использована обычная углеродистая сталь. Серия отечественных судов типа «Сергей Боткин» оборудована турбозубчатыми установками мощностью около 3300 кВт, работающими на таких параметрах пара. Развитие современных энергетических установок как стационарных, так и судовых за последние годы характеризуется значительным повышением начальных параметров пара.

В стационарной практике для мощных турбинных установок тепловых электростанций применяют сверхкритические и сверхвысокие параметры пара (давление до 30 МПа и температура 650° С для энергоблоков мощностью 300-800 МВт и более).

Отечественной судостроительной промышленностью совместно с заводами, строящими турбинное и другое оборудование для пароэнергетических установок, построено три серии современных танкеров и сухогрузных судов. Эти суда оборудованы турбозубчатыми установками с повышенными параметрами пара (давление пара 4,42 МПа и температура 470° С). Это позволило создать надежные и экономичные установки, а также обеспечило необходимые условия для их дальнейшего совершенствования. Повышенные параметры пара - рабочее давление до 9 МПа и температура 515° С - применены в паротурбинной установке, которая использована для отечественных танкеров типа «Крым», имеющих дедвейт 150000 т. Судовое паротурбостроение в части обеспечения начальных параметров пара развивалось аналогично и в заграничной практике.

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 или водяного барабана. Весь генерируемый насыщенный пар проходит через пароперегреватель. Требуемое количество охлажденного пара получается за счет снижения температуры перегретого пара в пароохладителе. Основным параметром охлажденного пара - его температура, так как падение давления в пароохладителе сравнительно невелико. Пар за пароохладителем должен быть слабоперегретым [13, с. 55].

Условия работы внутрибарабанного пароохладителя таковы, что охлажденный пар всегда будет иметь некоторый перегрев. Объясняется это тем, что давление охлаждаемого пара ниже рабочего в барабане назначения сопротивлений в сообщительных трубах, пароперегревателе и арматуре.

Поэтому температура стенки труб пароохладителя, равная температуре кипения t_s при давлении в барабане p_k , будет выше температуры насыщения при давлении охлаждаемого пара.

Перегрев охлажденного пара в $15-50^\circ \text{C}$ обуславливается главным образом требуемым температурным напором, обеспечивающим приемлемые размеры пароохладителя.

Для вспомогательных котельных установок используют низкие параметры: давление примерно $0,5-152 \text{ МПа}$, иногда до $3,0-3,5 \text{ МПа}$, 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 $240-280^\circ \text{C}$.

Температура питательной воды 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. При этом предусматривается три - пять ступеней подогрева питательной воды. Если в установке используют нормальные и повышенные параметры пара ($3-5 \text{ МПа}$ и $420-480^\circ \text{C}$), то можно обеспечить в трех ступенях подогрева температуру воды до $165-200^\circ \text{C}$.

Абсолютное значение температуры питательной воды за последней ступенью водоподогревателя определяется в основном начальными параметрами пара. Как правило, чем выше эти параметры, тем больше будет и температура питательной воды, поступающей в главный котел. При высоких параметрах ($9-10 \text{ МПа}$ и $510-520^\circ \text{C}$) иногда бывает целесообразно применить четыре или пять ступеней подогрева, обеспечивающих температуру питательной воды 225°C и более. При использовании сверхвысоких параметров пара температура питательной воды при многоступенчатом ее подогреве достигает 280°C .

Для судовой установки температура питательной воды имеет большое значение, так как в эксплуатационных условиях изменение ее влияет на паропроизводительность (или на расход топлива) и на температуру перегретого пара [1, с. 84].

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.

Температура холодного воздуха, поступающего в воздухоподогреватель, зависит от места забора воздуха вентилятором. Обычно воздух засасывается из верхней части машинного отделения, где температура составляет 30-40° С.

Температура горячего воздуха, поступающего в топку, определяется главным образом типом воздухоподогревателя, нагрузкой котла и требуемым значением его к. п. д. В условиях морского транспортного судна температура горячего воздуха при сжигании мазута в топках главных котлов может достигать 200-250° С, иногда и выше.

В экономайзерах судовых котлов вода не доводится до состояния кипения, поэтому ее запас в экономайзере не включен в величину G_B (количество воды в парообразующих элементах, кг). Водосодержание, определяющееся в основном геометрическими размерами водяного тракта, характеризует аккумулялирующую способность, т. е. инерционность котла, а, следовательно, его работоспособность при изменениях нагрузки.

Для водотрубных котлов, установленных на морских судах, обычно $\omega = 0,25 \div 0,4$ ч, а иногда и выше $\omega = 0,5 \div 1$ ч.

Чем меньше водосодержание, тем более заметны колебания уровня воды и давления пара при изменениях режима. Поэтому при низких значениях ω надежная работа котла может быть обеспечена лишь с помощью специальной, иногда довольно сложной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане. При водосодержании $\omega \geq 0,5$ ч может

быть использована простая система автоматического регулирования уровня, что обычно имеет место у вспомогательных и утилизационных котельных установок [10, с. 59].

Выше рассмотрены некоторые основные показатели рабочего процесса котлов. Что касается других показателей, перечисленных в начале этого параграфа, представляется целесообразным произвести сравнительную их оценку после рассмотрения основных теоретических определений рабочего процесса котлов.

Отмеченные показатели позволяют использовать их для оценки основных требований, предъявляемых к судовым котлам.

На современных морских судах устанавливаются в качестве главных водотрубные котлы с естественной циркуляцией. Назначение и требования к ним определяются конкретным типом судна. При этом главные котлы должны обеспечивать главные турбины и вспомогательные потребители паром требуемых параметров при всех режимах работы. Вспомогательные котлы на паротурбинных судах обычно не устанавливают, так как эффективность работы одного главного агрегата при значительном уменьшении нагрузки (стояночный режим) не ниже, чем у малого вспомогательного, который является дополнительным элементом, усложняющим энергетическую установку. Вспомогательные паропотребители должны расходовать не насыщенный пар из пароводяного барабана, а охлажденный или из отборов главной турбины, так как это увеличивает надежность работы пароперегревателя и повышает экономичность судовой установки.

В турбинных установках с промежуточным перегревом пара главный котел должен также обеспечивать примерно одинаковую температуру перегретого пара после первичного и вторичного (промежуточного) пароперегревателей [15].

В соответствии с изложенным к главному котлу предъявляют ряд основных требований.

Паровой котел морского судна должен обладать высокой надежностью, иметь простую и удобную в обслуживании конструкцию и наивысшую экономичность при возможно меньших габарите и массе. Стоимость постройки, эксплуатационные расходы и трудозатраты на ремонт должны быть также невысокими.

Требования, предъявляемые к котлу, обычно обеспечиваются лишь в том случае, если он выбран в соответствии с назначением судна и типом энергетической установки. Причем требования в отношении экономичности и снижения габарита и массы могут быть всегда удовлетворительно разрешены.

2. ПРОЧНОСТНЫЙ РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВОГО ПАРОВОГО КОТЛА

2.1. Общие положения

Основные конструктивные элементы котлов находятся под давлением воды и пара и омываются горячими газами высокой температуры, достигающей 1500-1600 °С во вспомогательных и 400-450 °С в утилизационных котлах. Условия работы котлов осложнены также быстрой и частой сменой нагрузки.

Для продолжительной и надежной работы котлов необходимо обеспечить прочность их конструкции. Это достигается правильным выбором материалов котлов на основе расчетов их прочностных характеристик и допускаемых напряжений, а также высокого качества выполнения всех технологических процессов при изготовлении котлов.

Разгерметизация парового котла (разрывы коллекторов или труб, находящихся под давлением; разрушение арматуры и др.) может привести к неблагоприятным последствиям. В связи с этим постройка и эксплуатация судовых паровых котлов с давлением 0,07 МПа и более, а также водогрейных котлов с температурой подогрева выше 115 °С осуществляются под наблюдением специальных органов технического надзора [3, с. 77].

В официальных изданиях этих органов — «Правилах классификации и постройки морских судов» и «Правилах постройки судов внутреннего плавания» - содержатся требования, регламентирующие постройку ПК (ВК).

До начала изготовления ПК Регистру представляют чертежи с описаниями, характеристики применяемых материалов и электродов, расчеты на прочность находящихся под давлением деталей. Все расчеты на прочность должны производиться в соответствии с Правилами Регистра [14, с. 45].

2.2. Применяемые материалы, их прочностные характеристики и допускаемые напряжения

Качество материалов, из которых изготавливают элементы ПК, определяются химическим составом, механическими характеристиками и технологическими свойствами. Так как механические характеристики стали зависят от температуры, очень важно правильно оценить температурные условия работы элемента конструкции, для того чтобы выбрать соответствующую марку материала. За расчетную температуру, при которой выбирают механические характеристики, принимают среднюю (по толщине стенки) температуру металла. Значения расчетной температуры стенки, °С, для основных элементов парогенератора следующие:

- Пароводяные и водяные коллекторы и трубы, необогреваемые - t_{cp}
- То же, обогреваемые горячими газами, но защищенные от теплового облучения - $t_{cp} + 30$
- Парообразующие и экономайзерные трубы, обогреваемые - $t_{cp} + 50$
- Жаровые трубы волнистые - $t_{cp} + 75$
- Коллекторы, камеры, гладкие жаровые трубы и огневые камеры, подверженные тепловому облучению - $t_{cp} + 90$
- Стенки коллекторов и труб пароперегревателей при температуре пара до 450 °С, необогреваемые - $t_{мп} + 25$
- То же, обогреваемые - $t_{мп} + 35$

Наибольшая температура нагреваемой среды t_{cp} для парообразующих труб и коллекторов принимается равной t_s (температура насыщения), для экономайзеров $t_{эж}$ (температура воды на выходе из экономайзера,) для пароперегревателей $t_{мп}$ (температура пара на выходе из пароперегревателя). В любом случае расчетную температуру следует принимать не менее 250 °С.

При оценке условий обогрева элементы конструкции котлов считаются защищенными от теплового облучения, если их стенки покрыты огнеупорной изоляцией или защищены рядом труб с максимальным зазором между трубами до 3 мм, или двумя рядами труб шахматного расположения с шагом вдоль ряда не более двух наружных диаметров, или тремя и более рядами труб шахматного расположения с шагом не более 2,5 диаметра [5, с. 104].

Вспомогательные и утилизационные ПК имеют невысокие параметры пара, расчетная температура стенок их основных элементов не превышает 450 °С. Поэтому для их изготовления может быть использована качественная малоуглеродистая сталь марок 10, 20, 15К, 20К - Сталь 10 и 20 (главным образом сталь 10) применяют для изготовления труб, из которых komponуют поверхности нагрева. Из листовой стали 15К и 20К делают коллекторы, камеры и другие элементы. В котлостроении для изготовления коллекторов диаметром до 500 мм используют цельнотянутые трубы из стали марки 22ГК с повышенным содержанием марганца.

Элементы конструкции вспомогательных и утилизационных ПК (каркас, обшивку, фундаменты и др.) изготавливают из малоуглеродистой стали. В качестве исходных при расчетах прочности принимают следующие характеристики материалов: для расчетных температур 120-350 °С — предел текучести σ_s^t , соответствующий расчетной температуре; для расчетных температур свыше 350 °С — меньшее из значений предела текучести σ_s^t и предела длительной прочности $\sigma_{д.л.}^t$. (напряжение, при котором образец, проработавший 10^5 ч, разрушится).

В прочностных расчетах допускаемое напряжение σ_d МПа, определяется по формуле $\sigma_d = K/n$, где К — характеристика прочности материала σ_s^t или $\sigma_{д.л.}^t$; n — коэффициент запаса прочности, для коллекторов и труб n = 1,7, для волнистых жаровых труб n — 3, для гладких жаровых труб

и огневых камер n — 2,5, для дымовых патрубков, находящихся под давлением, и других подобных стенок, омываемых газами, $n = 2,2$ [14, с. 248].

2.3. Методики расчета прочности основных элементов котлов

При расчете на прочность основных элементов котлов определяем толщину цилиндрических стенок коллекторов и труб, а также толщину днищ коллекторов.

Толщина цилиндрических стенок коллекторов и труб, подверженных внутреннему давлению, должна быть не менее величины δ , мм, определяемой по формуле (1) или по формуле (2).

$$\delta = D_H p / (2\sigma_d \varphi + p) + c, \quad (1)$$

$$\delta = D_B p / (2\sigma_d \varphi - p) + c, \quad (2)$$

где p - расчетное давление пара (воды) в котле, МПа;

D_H, D_B — наружный и внутренний диаметры стенок, мм;

φ - коэффициент прочности сварных соединений;

c - прибавка, учитывающая утонение стенки в процессе изготовления и эксплуатации, мм.

При расчете сепараторов, пароводяных, водяных коллекторов, коллекторов и труб пароперегревателя, парообразующих труб ПК с естественной циркуляцией p принимают равным рабочему давлению пара p_p в пароводяном коллекторе.

В случае расчета коллекторов и труб экономайзеров, коллекторов и труб парообразующих поверхностей нагрева ПК с принудительной циркуляцией расчетным давлением будет являться сумма рабочего давления и гидравлического сопротивления, т. е. $p = p_p + E\Delta p_i$, где $E\Delta p_i$ - гидравлическое сопротивление тракта рассчитываемого элемента

(экономайзера или парообразующей поверхности нагрева) и трубопроводов, соединяющих этот элемент с сепаратором.

Коэффициент φ учитывает ослабление прочности стенки сварными соединениями или отверстиями для крепления труб. Для бесшовных цилиндрических стенок, не ослабленных сварными соединениями или отверстиями $\varphi = 1$.

Коэффициент прочности сварных соединений φ выбирают в зависимости от типа соединения и способа сварки:

- для стыковых соединений при двусторонней под флюсом электрошлаковой и двусторонней ручной сварке $\varphi = 0,9$, при односторонней сварке под флюсом и ручной на подкладке $\varphi = 0,8$, при односторонней сварке под флюсом без защиты сварочной ванны, а также при ручной сварке без подварки $\varphi = 0,7$;

- для угловых и тавровых соединений при двусторонней сварке со скосом двух кромок или одной кромки с последующей подваркой $\varphi = 0,9$, при односторонней сварке с разделкой одной кромки на удаляемой подкладке без подварки или двусторонней без скоса кромок $\varphi = 0,7$, при односторонней сварке с разделкой одной кромки без подкладки и без подварки $\varphi = 0,5$.

Коэффициент φ стенки, ослабленной отверстиями одинакового диаметра, принимают равным наименьшему из трех следующих значений:

- при ослаблении стенки продольным рядом отверстий (вдоль оси коллектора), формула (3).

$$\varphi = (s_1 - d) / s_1$$

(3)

- при ослаблении стенки несколькими рядами с коридорным расположением отверстий, формула (4).

$$\varphi = 2[(s_2 - d) / s_2] \quad (4)$$

– при ослаблении стенки несколькими рядами с шахматным расположением отверстий, формула (5).

$$\varphi = n_s [(s'_2 - d) / s'_2] \quad (5)$$

где d — диаметр отверстия;

s_1 и s_2 — шаг отверстий соответственной в продольном и поперечном направлениях по отношению к оси коллектора (шаг s_2 принимают по дуге средней окружности);

s'_2 — шаг в косом диагональном направлении, $s'_2 = \sqrt{s_1^2 / 4 + s_2^2}$;

n_s — коэффициент, принимаемый в зависимости от параметра $2s_2/s_1$

При расположении отверстий в сварных швах φ принимают равным произведению коэффициента прочности сварного соединения и коэффициента ослабления отверстиями.

Прибавку c к толщине стенки принимают равной: $c = 1$ мм при $\delta \leq 30$ мм и $c = 0$ при $\delta > 30$ мм. Независимо от результатов расчета по формулам (1) и (2) минимальная толщина цилиндрических стенок трубных решеток с ввальцованными трубами должна быть равна 12 мм, а с приварными трубами — 10 мм.

Толщина гладкой жаровой трубы $\delta_{ж.т.}$, мм, с жесткими элементами (кольцами жесткости) определяется по формуле (6).

$$\delta_{ж.т.} = \frac{50B + 5\sqrt{100B^2 + 4AE}}{A}, \quad (6)$$

где

$$A = 200 \frac{\sigma_d}{D} \left(1 + \frac{D}{10l}\right) \left(1 + \frac{5D}{l}\right)$$

$$B = p(1 + 5D/l); E = 0,045pD;$$

D - средний диаметр жаровой трубы, мм;

l - расчетная длина цилиндрической части между жесткими элементами жаровой трубы, мм.

Толщину волнистой жаровой трубы $\delta_{ж.т.}$ вычисляют по формуле $\delta_{ж.т.} = pD_B / 2\sigma_D + c$, где D_B — наименьший внутренний диаметр жаровой трубы в ее волнистой части, мм.

Толщина гладкой жаровой трубы должна быть не менее 7 мм и не более 20 мм; толщина волнистой жаровой трубы — не менее 10 мм и не более 20 мм.

Днища коллекторов в современных водотрубных ПК обычно имеют эллиптическую форму. Днища других форм применяются редко. Сферические днища существенно увеличивают длину коллектора. Толщину плоских днищ, испытывающих высокие напряжения, пришлось бы делать весьма значительной. Сферические и плоские днища иногда используются в газотрубных ПК. Плоские днища могут быть применены в водяных коллекторах водотрубных ПК низкого давления ($p \leq 0,5$ МПа) с внутренним диаметром коллектора $D_B \leq 500$ мм, так как плоское днище легче изготовить.

На рис. 5 изображено эллиптическое днище с двумя отверстиями. Оно штампуется с короткой цилиндрической частью, высота которой $H_1 \geq 3\delta$, высота выпуклой части днища $H = (0,20 - 0,25) D_H$ [14, с. 260].

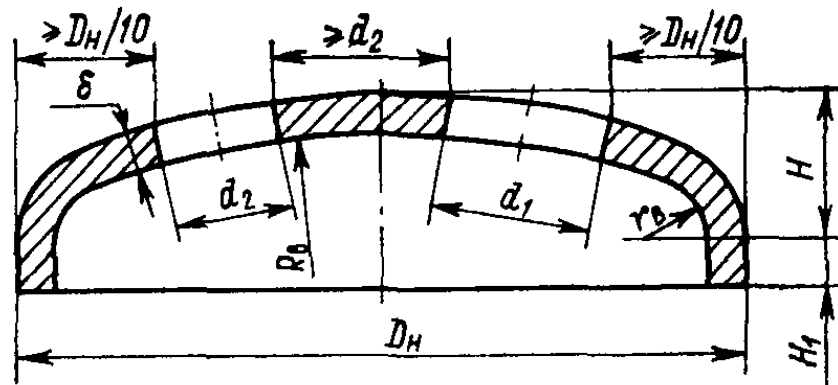


Рис. 5. Эллиптическое днище с двумя отверстиями

Выпуклые днища бывают глухими и с отверстиями для лаза, крепления арматуры и вывода труб различного назначения. Днище глухое, если оно не имеет отверстий для лаза или имеет отверстия диаметром, не превышающим 4δ (но не более 100 мм), которые расположены на расстоянии не менее $0,2D_H$ (по проекции) от наружного контура цилиндрической части.

Отверстия в днищах и цилиндрических стенках могут иметь укрепления в виде дискообразных накладок, приварных штуцеров, патрубков или отбортовки краев отверстия. При наличии в днищах двух и более отверстий расстояние между краями соседних отверстий должно быть не менее диаметра наименьшего отверстия.

Согласно Правилам Регистра, толщина стенки выпуклого днища, подверженного внутреннему или наружному давлению, должна быть не менее, формула (7).

$$\delta = D_H py / (4\delta_d \varphi) + c, \quad (7)$$

где D_H - наружный диаметр днища, мм;

y - коэффициент формы выпуклых днищ;

d - диаметр наибольшего отверстия в днище.

Коэффициент прочности φ определяется по формуле, подобной (3), например, при наличии одного отверстия в днище диаметром $d\varphi = (D_H - d) / D_H$.

Прибавку к толщине c принимают равной 2 мм при внутреннем и 3 мм при наружном давлении. Минимальная толщина стенки выпуклых днищ должна быть не менее 5 мм.

Для определения толщины плоских днищ, мм, не подкрепленных связями, и плоских крышек горловин Правилами Регистра рекомендуется следующая формула (8).

$$\delta = K_d D_B \sqrt{p / \sigma_d} + c, \quad (8)$$

где D_B - внутренний диаметр днища, мм;

K_d — коэффициент, учитывающий тип и форму днища.

Для днищ, имеющих круглую форму, $K_d = 0,45$, а для днищ, имеющих прямоугольную форму, $K_d = 0,50$; для днищ и плоских крышек горловин, имеющих круглую и плоскую форму, $K_d = 0,57$.

Плоские днища могут быть подкреплены связями (металлическими стержнями, трубами), которые жестко соединяют или два противоположных днища, или днище и какой-либо другой элемент ПК. Толщину таких плоских днищ, мм, следует рассчитывать по формуле (9).

$$\delta = K_d d \sqrt{p / \sigma_d} + c, \quad (9)$$

где коэффициент $K_d = 0,34 - 0,42$ в зависимости от конструкции подкрепляющих связей;

d - условный расчетный диаметр, мм, т.е. диаметр наибольшей окружности, которую можно провести через центры трех связей или которая пройдет через центры связей и коснется окружности начала отбортовки.

2.4. Гидравлические испытания

Для проверки прочности конструкции в качестве ее изготовления все элементы котла, а затем и котла в сборе подвергаются гидравлическим испытаниям пробным давлением. Гидравлические испытания проводят по окончании всех сварочных работ, когда изоляция и защитные покрытия еще отсутствуют. Прочность и плотность сварных и вальцовочных соединений элементов проверяют пробным давлением - 1,5 рабочих давлений в котле.

Размеры элементов, испытываемых пробным давлением должны подвергаться проверочному расчету на это давление. При этом напряжения не должны превышать 0,9 предела текучести материала.

После окончательной сборки и установки арматуры котел подвергается окончательному гидравлическому испытанию давлением 1,25 от рабочего, но не менее 0,1МПа выше рабочего.

При гидравлических испытаниях котел заполняют водой и доводят рабочее давление воды до пробного давления специальным насосом. Результаты испытаний определяют визуальным осмотром котла, а также по скорости падения давления.

Котел признается выдержавшим испытания, если давление в нем не падает и при осмотре не обнаруживаются течи, местные выпучины, видимые изменения формы и остаточные деформации. Отпотевание и появление мелких капелек воды у вальцовочных соединений течью не считается. Однако появление росы и слезинок у сварных швов не допускается.

Паровые котлы после установки на судно должны быть подвергнуты паровой пробе при рабочем давлении, которая заключается в том, что котел приводится в эксплуатационное состояние и проверяется в действии при рабочем давлении.

Газовые полости утилизационных котлов испытывают воздухом давлением 10 кПа. Газоходы вспомогательных и комбинированных ПК испытаниям не подвергают [7, с. 117].

2.5. Расчет на прочность

Выбор конструкционного материала проводим по Правилам устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов, потому что барабан является элементом парового котла. Выполним расчет для парового котла КАВ 6,3/7.

Схема внешнего вида парового котла КАВ 6,3/7 представлена на рис. 6.

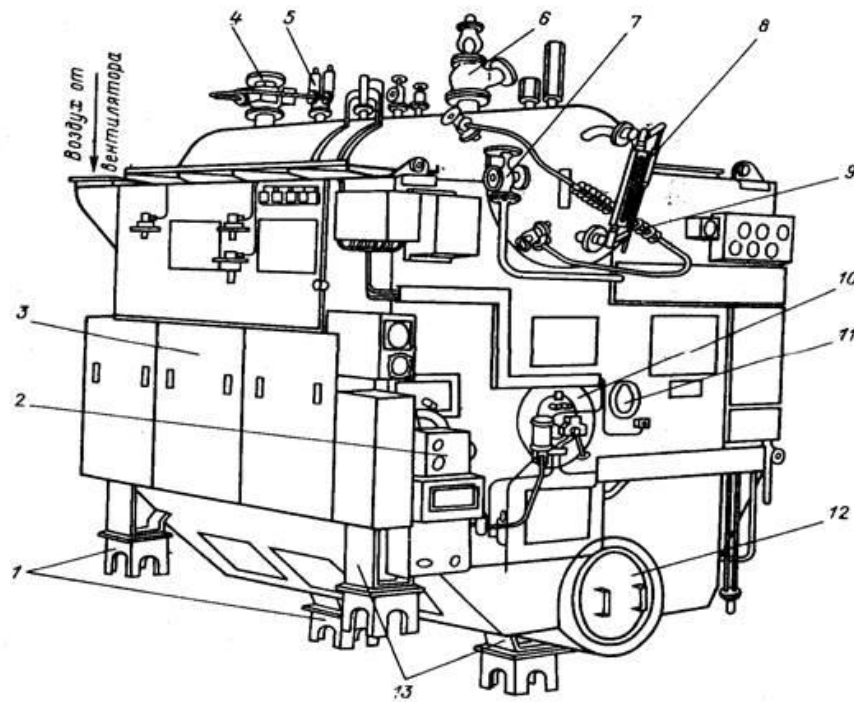


Рис. 6. Схема внешнего вида парового котла КАВ 6,3/7

В состав котла КАВ 6,3/7 входят следующие элементы: собственно паровой котел; топливная, воздушная и питательная системы; системы автоматического управления, защиты и сигнализации; система зажигания топлива; контрольно-измерительные приборы.

Непосредственно на наружной обшивке установлены топливный блок 3, регулирующий блок 2, кнопочный пост «пуск-стоп» и другие устройства системы автоматического управления, а также приборы теплотехнического контроля.

Расчётное давление равно избыточному давлению в барабане (рабочему)

$$P_p = P = 1,7 \text{ МПа}$$

Расчётная температура стенки металла барабана равна температуре насыщения котловой воды и пара (т.к. барабан является необогреваемым элементом конструкции).

Температуру насыщения находим по абсолютному давлению в

барабане

$$P_{абс} = P_{изб} + P_{атм} = 1,7 + 0,1 = 1,8 \text{ МПа}$$

$$t_p = t_s = 207 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Барабан парового котла изготавливается из листовой стали; он состоит из цилиндрической части - обечайки и днищ выпуклой формы. Выбор материала производим по таблице «Материалы, которые используются для изготовления котлов, пароперегревателей, экономайзеров, работающих под давлением» приложения раздела «Материалы» Правил устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов.

По P_p и t_p выбираем марку стали и выписываем нормативную документацию на лист и на сталь.

Котельная сталь: 22К.

Нормативные документы:

- на сталь: ГОСТ 5520-79; ТУ 108.1025-81
- на лист: ГОСТ 5520-79; ТУ 108.1025-81

Предельные параметры:

- температура: 350 $^\circ\text{C}$;
- давление: не ограничено.

2.5.1. Расчет на прочность барабана котла

Конструкционный расчет цилиндрической обечайки барабана котла выполняется по формуле (10):

Определим толщину стенки:

$$S = \frac{P \cdot D_a}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] + P} + C, \quad (10)$$

где P – расчетное давление, МПа;

D_a – наружный диаметр, мм;

φ – коэффициент прочности;

$[\sigma]$ – номинальные допускаемые напряжение, МПа;

C – прибавка к расчетной толщине стенки.

Расчетная толщина стенки:

$$S_p = \frac{P \cdot D_a}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] + P} = \frac{1,7 \cdot 0,69}{2 \cdot 0,2 \cdot 106 + 1,7} = 27,6 \text{ мм}.$$

Коэффициент прочности φ определяем по формуле (11).

$$\varphi_d = \frac{t - d}{t} \quad (11)$$

$$\varphi_d = \frac{t - d}{t} = \frac{95 - 76}{95} = 0,2.$$

Номинальные допускающие напряжения $[\sigma]$ выбираем для выбранной марки стали, расчетной температуры, и наработки 10^5 часов:

$$[\sigma] = 106 \text{ МПа}.$$

Прибавки определяем по:

C_{11} – технологическая прибавка, выбираем по нормативной документации на лист как минусовый допуск на толщину листа (10% от S):

$$C_{11} = 0,1 \cdot S = 0,1 \cdot 27,6 = 2,76 \text{ мм}.$$

C_{12} – технологическая прибавка, учитывает утонение стенки при вальцовке листа:

$$C_{12} = 2,76 \text{ мм}.$$

C_{21} – эксплуатационная прибавка, которая учитывает коррозионный износ внутренней стенки обечайки в условиях эксплуатации:

$$C_{21} = 1 \text{ мм}.$$

C_{22} – эксплуатационная прибавка, учитывающая коррозионный износ наружной стенки обечайки; для необогреваемых деталей:

$$C_{22} = 0,5$$

Сумма прибавок составит:

$$C = C_{11} + C_{12} + C_{21} + C_{22} = 2,76 + 2,76 + 1 + 0,5 = 7,02 \text{ мм} .$$

Определяем толщину стенки с учетом прибавок и выбираем из ряда толщин по ГОСТ толщину стенки как ближайшее большее от полученного значения:

$$S = S_p + C = 27,6 + 7,02 = 34,62 \text{ мм}$$

Принимаем толщину стенки из стандартного типа ряда: $S = 36 \text{ мм}$.

2.5.2. Расчет на прочность днища барабана котла

В соответствии с правилами устройства и безопасной эксплуатации форма выпуклых днищ для вновь изготовленных котлов должна быть эллиптической или шаровой. Отношение высоты выпуклой части днища измеренной от внутренней поверхности к внутреннему диаметру должно быть не менее 0,2. Днища рекомендовано изготавливать из одного листа.

В соответствии с правилами устройства и безопасной эксплуатации выбираем глухую эллиптическую форму днища, которая представлена на рис. 7.

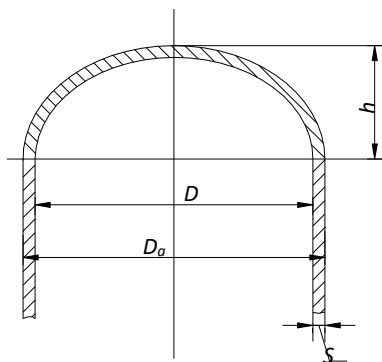


Рис. 7. Глухая эллиптическая форма днища

Расчет на прочность глухого днища эллиптической формы проводим

по формуле (12).

$$S_p = \frac{P \cdot D}{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P} \cdot \frac{D}{2 \cdot h} + C \quad (12)$$

$$S_p = \frac{P \cdot D}{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P} \cdot \frac{D}{2 \cdot h} + C = \frac{1,7 \cdot 618}{4 \cdot 1 \cdot 106 - 1,7} \cdot \frac{618}{2 \cdot 155} + 7,02 = 12 \text{ мм}$$

Определяем внутренний диаметр:

$$D = D_a - 2 \cdot S = 690 - 2 \cdot 36 = 618 \text{ мм}.$$

Принимаем $\varphi = 1$. Номинальные допускающие напряжения составят:

$$[\sigma] = 120 \text{ МПа}.$$

$$h/D = 0,25, \text{ тогда } h = D \cdot 0,25 = 618 \cdot 0,25 = 155 \text{ мм}$$

Прибавки составят:

$$C_{11} = 1,2 \text{ мм}; C_{12} = 1,2 \text{ мм}; C_{21} = 1 \text{ мм}; C_{22} = 0,5$$

Сумма прибавок составит:

$$C = C_{11} + C_{12} + C_{21} + C_{22} = 1,2 + 1,2 + 1 + 0,5 = 3,9 \text{ мм}$$

$$S = S_p + C = 12 + 3,9 = 15,9 \text{ мм}$$

Принимаем толщину стенки из стандартного типа ряда: $S = 16 \text{ мм}$.

В правилах устройства и безопасной эксплуатации указано, что форма отверстия должна быть эллиптической формы и его размер по большей оси эллипса должен быть не менее 450 мм.

$$d/D = 400/618 = 0,65$$

В связи с тем, что полученное значение d/D превышает нормативное значение $d/D = 0,6$, рассчитываем новый внутренний диаметр обечайки барабана:

$$D = 400/0,65 = 667 + 10 = 677 \text{ мм}$$

Новую толщину стенки по внутреннему диаметру определим по формуле (13).

$$S = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P} + C \quad (13)$$

$$S = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P} + C = \frac{1,7 \cdot 677}{2 \cdot 0,2 \cdot 106 - 1,7} + 7,2 = 35,3 \text{ мм}$$

Принимаем толщину стенки из стандартного типа ряда: $S = 36 \text{ мм}$.

Для днища, ослабленного лазом, φ находим по формуле (14).

$$\varphi = \frac{2}{\frac{d}{\sqrt{D_m \cdot (S - c)}} + 1,75}, \quad (14)$$

где D_m – средний диаметр.

$$\varphi = \frac{2}{\frac{d}{\sqrt{D_m \cdot (S - c)}} + 1,75} = \frac{2}{\frac{400}{\sqrt{683,5 \cdot (36 - 7,2)}} + 1,75} = 0,44$$

$$D_m = \frac{Da + D}{2} = \frac{690 + 677}{2} = 683,5 \text{ мм}.$$

Новая толщина днища, ослабленного отверстием для лаза

$$S_p = \frac{P \cdot D}{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P} \cdot \frac{D}{2h} + C = \frac{1,7 \cdot 677}{4 \cdot 0,44 \cdot 106 - 1,7} \cdot \frac{677}{2 \cdot 169,2} + 7,02 = 19,5 \text{ мм}.$$

Прибавки составят:

$$C_{11} = 1,95 \text{ мм}; C_{12} = 1,95 \text{ мм}; C_{21} = 1 \text{ мм}; C_{22} = 0,5.$$

Сумма прибавок составит:

$$C = C_{11} + C_{12} + C_{21} + C_{22} = 1,95 + 1,95 + 1 + 0,5 = 5,4 \text{ мм}.$$

$$S = S_p + C = 19,5 + 5,4 = 24,9 \text{ мм}$$

Принимаем толщину стенки из стандартного типа ряда: $S = 28 \text{ мм}$.

Расчёт глухого днища:

$$S_p = \frac{P \cdot D}{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P} \cdot \frac{D}{2h} = \frac{1,7 \cdot 677}{4 \cdot 1 \cdot 106 - 1,7} \cdot \frac{677}{2 \cdot 169,2} + 7,02 = 12,5 \text{ мм}$$

Прибавки составят:

$$C_{11} = 1,25 \text{ мм}; C_{12} = 1,25 \text{ мм}; C_{21} = 1 \text{ мм}; C_{22} = 0,5.$$

Сумма прибавок составит:

$$C = C_{11} + C_{12} + C_{21} + C_{22} = 1.25 + 1.25 + 1 + 0.5 = 4 \text{ мм} .$$

$$S = S_p + C = 12.5 + 4 = 16.5 \text{ мм}$$

Принимаем толщину стенки из стандартного типа ряда: $S = 18 \text{ мм} .$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной ВКР было проведено исследование методик прочностного расчёта конструктивных элементов судового парового котла.

Для достижения цели, были решены следующие задачи:

- изучены принцип действия, состав и системы котельных установок морских судов;
- рассмотрены назначение использования котлов и их классификация;
- рассмотрены параметры теплоносителей и основные показатели рабочего процесса котлов;
- рассмотрены применяемые материалы, их прочностные характеристики и допускаемые напряжения;
- изучены методики расчета прочности основных элементов котлов;
- произведен расчет на прочность барабана котла;
- произведен расчет на прочность днища барабана котла.

Подводя итог, стоит сделать следующие выводы.

По назначению котлы используют в составе как главных, так и вспомогательных установок.

Главные котлы обеспечивают паром главный двигатель, приводящий в действие гребной винт, и некоторые вспомогательные потребители. Главные котлы устанавливают на современных паротурбинных судах. Их ранее использовали на пароходах сравнительно давней постройки, на которых главным двигателем была паровая поршневая машина.

Вспомогательные котельные установки применяют, как правило, на теплоходах. В этом случае установка состоит из агрегата, в котором сжигается органическое топливо, - его называют обычно вспомогательным котлом, и утилизационного котла. На транспортных судах с главной пароэнергетической установкой вспомогательные котлы обычно не нужны.

По конструктивному исполнению, т. е. по относительному движению теплообменивающихся сред - дымовых газов и воды, котлы могут быть разделены на водотрубные и газотрубные. В водотрубных котлах внутри труб движется вода и пароводяная смесь, а нагретые дымовые газы (основной теплоноситель) омывают трубы снаружи. В газотрубных котлах, наоборот, внутри труб движутся дымовые газы, а вода окружает трубы с наружной стороны.

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

Для проверки прочности конструкции в качестве ее изготовления все элементы котла, а затем и котла в сборе подвергаются гидравлическим испытаниям пробным давлением. Гидравлические испытания проводят по окончании всех сварочных работ, когда изоляция и защитные покрытия еще отсутствуют. Прочность и плотность сварных и вальцовочных соединений элементов проверяют пробным давлением - 1,5 рабочих давлений в котле

По результатам конструкционного расчета цилиндрической обечайки барабана, была рассчитана толщина стенки, которая составила $S = 36 \text{ мм}$.

В соответствии с правилами устройства и безопасной эксплуатации была рассчитана глухая эллиптическая форма днища. Результат расчета толщины стенки из стандартного типа ряда составил $S = 18 \text{ мм}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Болдырев О.Н. Судовые энергетические установки. Часть II. Котлотурбинные энергетические установки. Учебное пособие. Северодвинск: Севмашвтуз, 2004. — 457 с.
2. Верете А. Г., Дельвинг А. К. Судовые паровые и газовые энергетические установки. – Спб.: Судостроение, 2013. — 378 с.
3. Волынцев А. В. Теплонасосная установка для использования на судах промыслового флота / А. В. Во- лынцев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 4. — С. 121–125.
4. Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александрова А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – Спб.: Судостроение, 2015. — 568 с.
5. Грузберг Я.Ю. Судовые парогенераторы – Спб.: Судостроение, 2014. — 488 с.
6. Елистратов С. Л. Комплексное исследование теплонасосных установок: диссертация / С. Л. Елистратов. — Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе, 2010. — 383 с.
7. Енин В.И. Судовые паровые котлы. – М.: Транспорт, 2004. — 560 с.
8. Калиниченко И. В. Получение пара на судне тепловым насосом. / И. В. Калиниченко, А. А. Андреев, Н. Б. Андреева // Водный транспорт. — 2015. — № 2 (23). — С. 48–57.
9. Салов, Н.Н. Курсовое проектирование энергетических установок промышленных судов [Электронный ресурс] : Учеб. пособие для студентов вузов / Н.Н. Салов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2014. – 112 с.
10. Соболенко А. Н. Судовые энергетические установки: дипломное проектирование / А. Н. Соболен- ко, Р. Р. Симашов. — М.: Моркнига, 2015. — Ч. 2. — 426 с.

11. Троицкий Б.Л., Сударева Е.А. Основы проектирования судовых энергетических установок – Спб.: Судостроение, 2014. — 435 с.
12. Харин В.М. и др. Судовые машины, установки, устройства и системы: учебник для высших морских учебных заведений. – Одесса: Феникс, 2016. – 646 с.
13. Хордас, Г. С. Расчеты общесудовых систем: справ. / Г. С. Хордас. – Ленинград : Судостроение, 1983. – 440 с.
14. Хряпченков А.С. Судовые вспомогательные и утилизационные котлы: Учебное пособие.- 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1988. — 296 с.
15. Электронное пособие для котлов. - Кафедра «Эксплуатация водного транспорта», 2015 г.