

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Методические указания по выполнению курсового проекта
для студентов специальности
1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций»

Витебск
2021

УДК 621.18(075.8)

Составители:

С.В. Жерносек, А.С. Марущак, В.Ю. Мовсесян

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 8 от 05.05.2021.

Котельные установки промышленных предприятий : методические указания по выполнению курсового проекта / сост. С. В. Жерносек, А. С. Марущак, В. Ю. Мовсесян. – Витебск: УО «ВГТУ», 2021. – 61 с.

Методические указания содержат рекомендации по выбору величин, определяющих технико-экономическую эффективность работы парового котла. Изложена методика поверочного теплового расчета топочной камеры и конвективного газохода парового котла, а также конструктивного расчёта водяного экономайзера. Определены тепловосприятости конвективных поверхностей нагрева и невязка теплового расчёта котла. Для проведения расчетов даны необходимые таблицы и номограммы. Содержание методических указаний соответствует учебной программе.

УДК 621.18(075.8)

© УО «ВГТУ», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Основные понятия. Общие сведения о теплогенерирующих установках	5
2 Паровые котлы типа ДЕ	8
2.1 Описание конструкции котлов	8
2.2 Конструкция газомазутного горелочного устройства типа ГМГ	15
2.3 Описание принципа работы котлов типа ДЕ	17
2.4 Теоретические основы ступенчатого испарения	18
2.5 Парообразующие поверхности нагрева	25
2.6 Испарительные поверхности нагрева котлов типа ДЕ и циркуляция воды в них	27
3 Общие сведения о тепловом расчете котельного агрегата	30
3.1 Основные понятия и определения	30
3.2 Рекомендации по тепловому расчёту котла	30
4 Тепловой расчёт котла	34
4.1 Задание на проектирование	34
4.2 Расчёт объёмов продуктов сгорания, объёмных долей трехатомных газов	34
4.3 Тепловой баланс котельного агрегата и определение расхода топлива	38
4.4 Расчёт теплообмена в топке	41
4.5 Тепловой расчёт 1-го конвективного пучка	46
4.6 Тепловой расчёт 2-го конвективного пучка	52
4.7 Тепловой расчёт водяного экономайзера	54
4.8 Компоновка водяного экономайзера	57
4.9 Расчёт невязки баланса котла	57
Заключение	58
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	59

ВВЕДЕНИЕ

Теплогенерирующие установки являются основным оборудованием котельных, обеспечивающих тепловой энергией в виде пара и нагретой воды нужды промышленных потребителей, а также жилищно-коммунального хозяйства.

Рост жилищного строительства в промышленных регионах и отсутствие капитальных вложений в развитие централизованного теплоснабжения делают актуальным вопрос строительства районных небольших производственно-отопительных котельных, в которых основным оборудованием являются котлы производительностью 1–30 тонн пара в час [1].

Широкое распространение в этом диапазоне нагрузок получили газомазутные котлы типа ДЕ-ГМ производительностью 4–25 т/ч [2, 3].

Поэтому в данных методических указаниях приведены описания компоновки, конструкции и принципа работы парового котла ДЕ-ХХ-14ГМ, дано описание физических процессов, происходящих в поверхностях нагрева, приведены указания к проведению теплового расчёта котла, который является предметом курсового проекта по дисциплине «Котельные установки промышленных предприятий».

Поверочный расчет парового котла выполняется для оценки показателей экономичности, выбора вспомогательного оборудования, получения исходных данных для проведения аэродинамического, гидравлического и прочностного расчётов.

При постоянной нагрузке в каждой точке котла устанавливаются вполне определённые значения параметров воды, пара и греющих газов, коэффициентов теплопередачи. Системы уравнений материальных и энергетических балансов связывают величины параметров рабочего тела и продуктов сгорания с величинами поверхностей нагрева, их конструктивными характеристиками.

Цель расчета состоит в определении температур газовой среды и тепловосприятий рабочего тела в поверхностях нагрева котла. В курсовом проекте проводится конструктивно-поверочный расчет, который обязателен при проведении поверочного расчета котла при переводе его на сжигание другого вида топлива, элементный состав которого отличен от расчётного.

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ

Теплогенерирующие установки предназначены для выработки пара или горячей воды, соответственно называются **паровыми или водогрейными котлами** [4].

Паровой котёл представляет собой системы поверхностей нагрева для производства пара из непрерывно поступающей в него воды за счёт использования тепловой энергии, выделившейся при сжигании топлива, подаваемого в топку вместе с необходимым количеством воздуха.

Водогрейный котёл представляет собой системы поверхностей нагрева для производства тепловой энергии в виде нагретой воды, непрерывно поступающей в него, за счёт использования тепловой энергии, выделившейся при сжигании топлива, подаваемого в топку вместе с необходимым количеством воздуха. Водогрейные котлы – прямоточные котлы.

Под **давлением парового котла** поднимается давление пара в барабане котла при производстве сухого насыщенного пара или давление в выходном коллекторе пароперегревателя при производстве перегретого пара.

Теплоносителем в теплогенерирующих установках являются продукты горения органического топлива, называемые **дымовыми газами**.

Рабочим телом называется вода и пар, которым продукты сгорания отдают свою энергию в поверхностях нагрева.

Поверхности нагрева – основные рабочие элементы котла, которые представляют собой металлические трубчатые поверхности, служащие для передачи тепла от горячих дымовых газов воде, пароводяной смеси, пару и воздуху [5].

Поверхности нагрева, получающие тепло преимущественно за счёт излучения, называются **радиационными**.

Поверхности нагрева, в которых передача тепла происходит за счёт конвективного теплообмена, называются **конвективными**.

Радиационные поверхности нагрева, расположенные в топке котла и воспринимающие тепло за счёт излучения, называются **топочными экранами**.

Барабан котла предназначен для разделения пароводяной смеси, поступающей из парообразующих поверхностей нагрева, на пар и воду и для распределения воды по циркуляционным контурам.

Водным пространством парового котла называют часть объёма барабана или верхнего барабана, если котёл многобарабанный, занятую водой.

Паровым пространством парового котла называют часть объёма барабана или верхнего барабана, если котёл многобарабанный, занятую паром.

Водяным объёмом называют часть объёма барабана, заполненного водой.

Зеркалом испарения называют поверхность, разделяющую паровой и водяной объёмы барабана котла. Топочное устройство (топка котла) предназначено для сжигания топлива наиболее экономичным образом и

превращения химической энергии топлива в тепловую энергию.

Фестон – сильно разреженная часть испарительной поверхности заднего или бокового экранов, расположенная в газовом окне между топочным пространством и газоходом.

Пароперегреватель – поверхность нагрева котла, в которой происходит перегрев полученного в котле пара до заданной температуры.

Конвективный пучок – парообразующая поверхность нагрева котла, расположенная за топкой по ходу газов.

Водяной экономайзер – конвективная поверхность котла, в которой подогревается поступающая в него вода теплом уходящих из котла продуктов сгорания.

Воздухоподогреватель – конвективная поверхность котла, предназначенная для подогрева воздуха теплом уходящих газов перед его подачей в топку котла.

Горелочное устройство служит для приготовления топливо-воздушной смеси к воспламенению топлива и активному его горению в топке котла.

Коллектор (камера) – предназначен для распределения или сбора рабочего тела, движущегося по отдельным элементам (трубам) котла.

Котельным агрегатом называется паровой котёл, включающий в себя топку и парообразующие поверхности нагрева, пароперегреватель, водяной экономайзер, воздухоподогреватель совместно с примыкающими к ним паропроводами, водопроводами, воздухопроводами и газоходами и установленной на них арматурой.

Паровые котлы с естественной циркуляцией – это барабанные котлы, в которых непрерывное движение пароводяной смеси в парообразующих поверхностях нагрева происходит за счёт разности удельных весов воды в опускных трубах и пароводяной смеси в подъёмных.

Паровые котлы с принудительной циркуляцией – это барабанные котлы, в которых непрерывное движение пароводяной смеси в парообразующих поверхностях нагрева происходит за счёт давления циркуляционных насосов, включенных в контуры циркуляции между опускными и подъёмными трубами испарительных поверхностей нагрева.

Тягодутьевые устройства включают в себя вентилятор(ы), дымосос(ы), газоходы и воздухопроводы, дымовую трубу, обеспечивающие подачу необходимого количества воздуха в топку котла, движение продуктов сгорания по газоходам и удаление их за пределы котельного агрегата.

Топливо – горючее вещество, сознательно сжигаемое для получения большого количества тепловой энергии.

Органическое топливо в зависимости от физического состояния подразделяется на: твердое, жидкое и газообразное.

Твердое топливо – дрова, торф, сланцы, бурый уголь, каменный уголь, антрацит.

Жидкое топливо – продукты переработки нефти: бензин, керосин, печное топливо, различные масла, мазуты.

Газообразное топливо – природный газ, попутный нефтяной газ, отходы

металлургического производства (коксовый, доменный газ), крекингový газ.

Слоевое сжигание топлива – это когда топливо горит в слое, лежащем на соответствующей опорной поверхности.

Факельное сжигание топлива – это когда топливо сгорает в топочной камере во взвешенном мелкодисперсном состоянии.

Ступенчатое испарение – способ повышения концентрации солей в котловой воде без ухудшения качества вырабатываемого пара.

Непрерывная продувка – постоянное удаление из барабана котла некоторого количества котловой воды с накопившимися растворенными в ней солями без нарушения режимов его работы.

Периодическая продувка периодическое удаление из нижнего барабана котла или нижних коллекторов парообразующих поверхностей котловой воды с осевшим шламом.

Вода и полученный из неё пар широко используется в паросиловых установках и тепловых схемах котельных. В цикле котельных участвуют следующие потоки воды и пара:

– **исходная вода** (природная или водопроводная), получаемая от источников водоснабжения (река, артезианская скважина, водоём, городской водопровод), как правило, подвергается обработке для получения добавочной и подпиточной воды соответствующего качества;

– **добавочная вода** – вода, специально приготовляемая в установках химводоочистки, предназначенная для восполнения потерь теплоносителя в тепловой схеме котельной и потерь конденсата у промышленных потребителей;

– **питательная вода** – вода, подаваемая питательными насосами из деаэратора в паровые котлы, представляющая из себя смесь конденсата от теплообменников, возвратного конденсата от внешних потребителей с добавочной водой;

– **котловая вода** – вода, находящаяся в паровом котле;

– **подпиточная вода** – специально подготовленная вода в системе химводоочистки, направляемая на подпитку тепловой сети для компенсации потерь в ней теплоносителя, а при открытой системе теплоснабжения и на восполнение расхода воды на горячее водоснабжение;

– **продувочная вода** – вода, удаляемая из котла с непрерывной продувкой;

– **конденсат** – вода, полученная в результате конденсации пара в пароводяных теплообменниках и у промышленных потребителей пара;

– **пар** – теплоноситель, получающийся из воды путём её испарения;

– **влажный пар** – пар, содержащий мелкодисперсные капельки и имеющий степень сухости менее единицы;

– **сухой насыщенный пар** – пар, не содержащий влаги и имеющий степень сухости, равную единице;

– **перегретый пар** – пар, имеющий температуру выше температуры кипения при данном давлении;

– **редуцированный пар** – пар после редуционно-охладительной установки (РОУ).

2 ПАРОВЫЕ КОТЛЫ ТИПА ДЕ

2.1 Описание конструкции котлов

Паровой, двухбарабанный, вертикально-водотрубный котёл с естественной циркуляцией типа ДЕ предназначен для выработки насыщенного пара с температурой 194 °С и перегретого с температурой – 225 °С, с рабочим давлением пара 1,37 МПа, имеет несколько типоразмеров, отличающихся между собой номинальной производительностью 4; 6,5; 10; 16; 25 т/ч. Котлы обеспечивают тепловой энергией потребности технологических нужд, отопления, вентиляции, горячего водоснабжения [4, 5].

Внешний вид котла серии ДЕ приведён на рисунке 2.1.

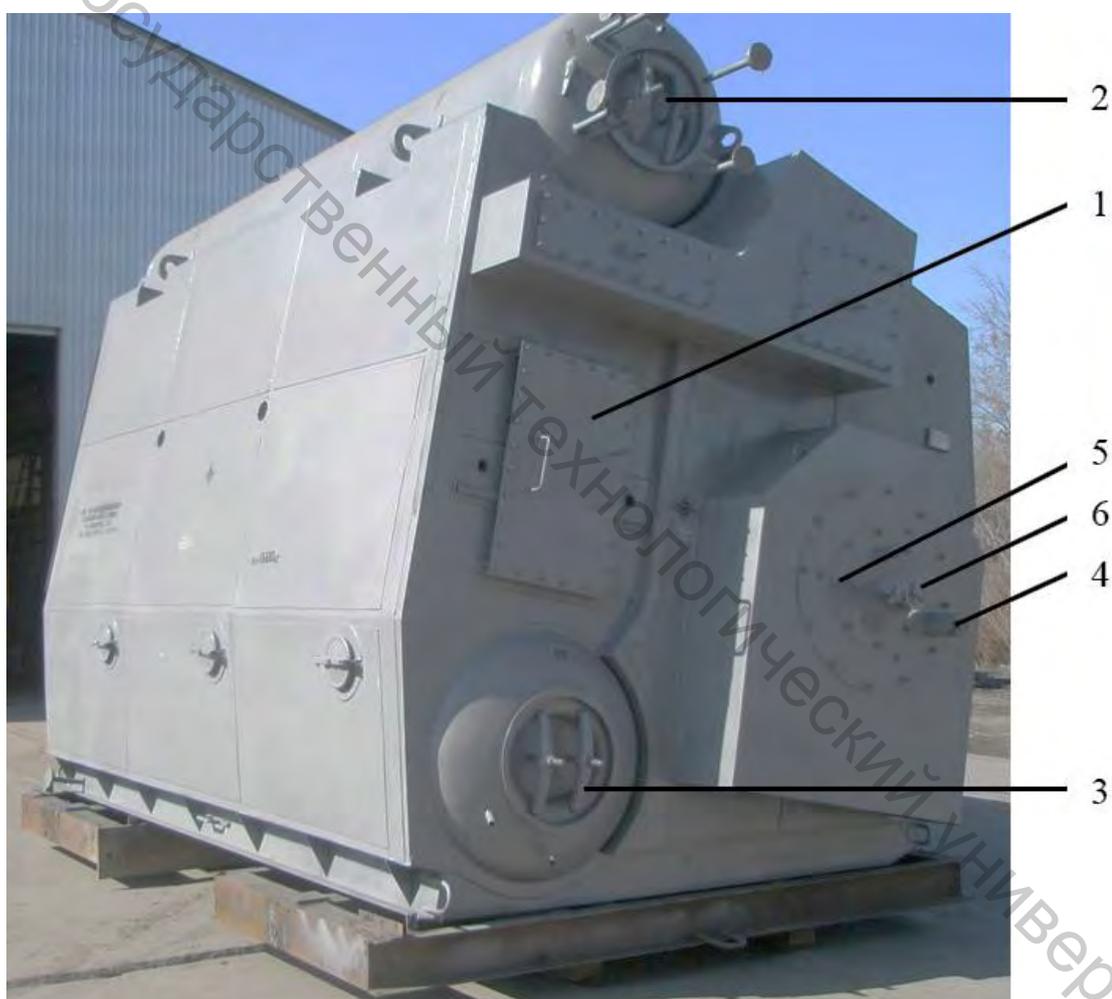


Рисунок 2.1 – Внешний вид котла типа ДЕ

Котлоагрегат представляет из себя моноблок, который смонтирован в заводских условиях на металлоконструкциях. На фронтальной поверхности топки котла размещено горелочное устройство (6). Слева от топки расположены друг над другом верхний (2) и нижний (3) барабаны, которые соединены между собой паробразующими поверхностями нагрева, расположенными под

обшивкой котла. Между барабанами расположен люк (1), через который при необходимости обеспечивается доступ к конвективному пучку. Горелочное устройство представляет из себя газомазутную горелку, которая имеет подвод газа к котлу через штуцер (5) и подвод мазутопровода к форсунке (4).

Основные технические характеристики котлов типа ДЕ показаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики котлов типа ДЕ

Наименование	Марки котла									
	ДЕ-4-14ГМ		ДЕ-6,5-14ГМ		ДЕ-10-14ГМ		ДЕ-16-14ГМ		ДЕ-25-14ГМ	
Тип топлива (Г – газ, М – мазут)	Г	М	Г	М	Г	М	Г	М	Г	М
Производительность, т/ч	4		6,5		10		16		25	
Температура питательной воды, °С	100	135	100	135	100	135	100	135	100	135
Радиационная поверхность нагрева, м ²	22,2		28,1		39,9		52,6		64	
Конвективная поверхность нагрева, м ²	56,2		81,8		131,6		181,8		230,1	
Глубина котла, мм	3530		4280		5710		7180		9390	
Ширина котла, мм	2920		2920		3030		3030		3090	
Высота котла, мм	4028		4028		4028		4032		4032	
КПД котла, %	92,13		92,23		93,24		93,1		93	
Масса котла, кг	11400		13080		16680		19130		23500	

Блок котла дополнительно комплектуется блочно монтируемым заводом, тягодутьевой установкой, экономайзером, деаэрационно питательной установкой, установкой сетевой воды, ХВО и т.д. На месте монтажа поставляемые блоки обвязываются трубопроводами.

Котлы специализированы на сжигание газа и мазута, что позволяет более полно реализовать преимущества использования высококалорийных топлив [6, 7].

На рисунке 2.2 а приведены разрезы парового котла ДЕ-16-14ГМ [4], а на рисунке 2.2 б – план и продольный разрез котла ДЕ-10-14ГМ.

На рисунке 2.3 приведена фотография котла ДЕ-16-14ГМ в стадии монтажа, на которой видно, как монтируется топка котла.

Характерной особенностью котлов этой серии является расположение топочной камеры (4) сбоку от конвективного пучка, образованного вертикальными трубами (5), развальцованными в верхнем и нижнем барабанах.

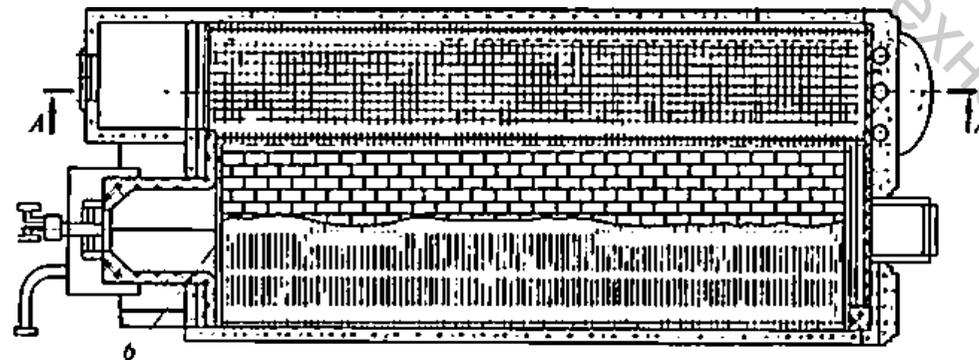
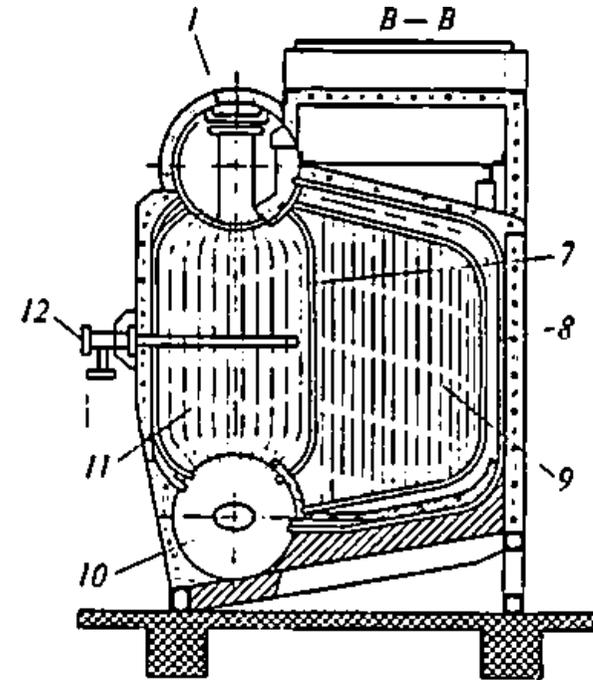
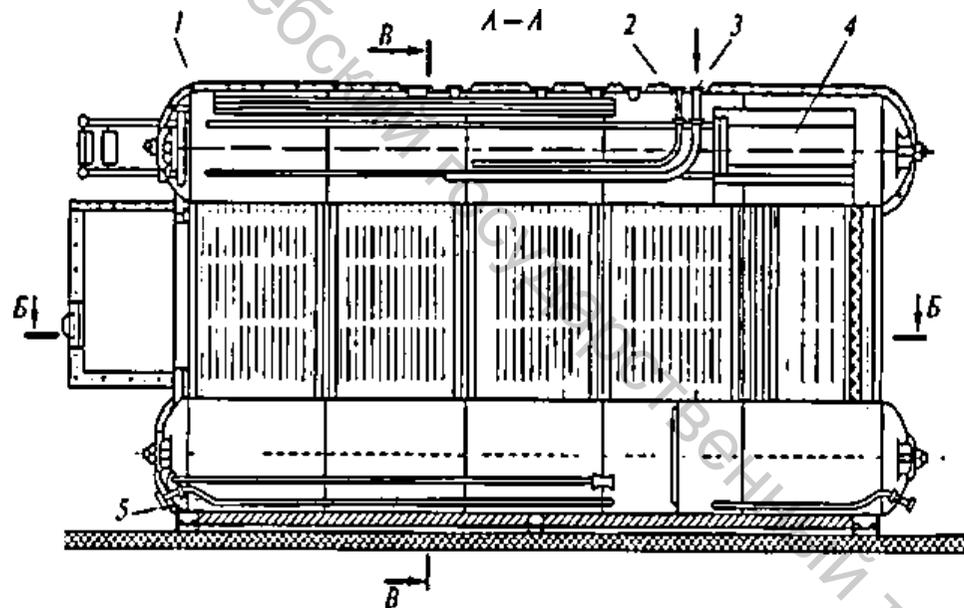


Рисунок 2.2 а – Паровой котёл ДЕ-16-14ГМ:

1 – верхний барабан; 2 – трубопровод для фосфатирования; 3 – трубопровод для подвода питательной воды; 4 – солевой отсон барабана; 5 – труба для продувки; 6 – горелка; 7 – газоплотная перегородка; 8 – правый экран; 9 – топочная камера; 10 – нижний барабан; 11 – конвективный пучок; 12 – устройство для продувки

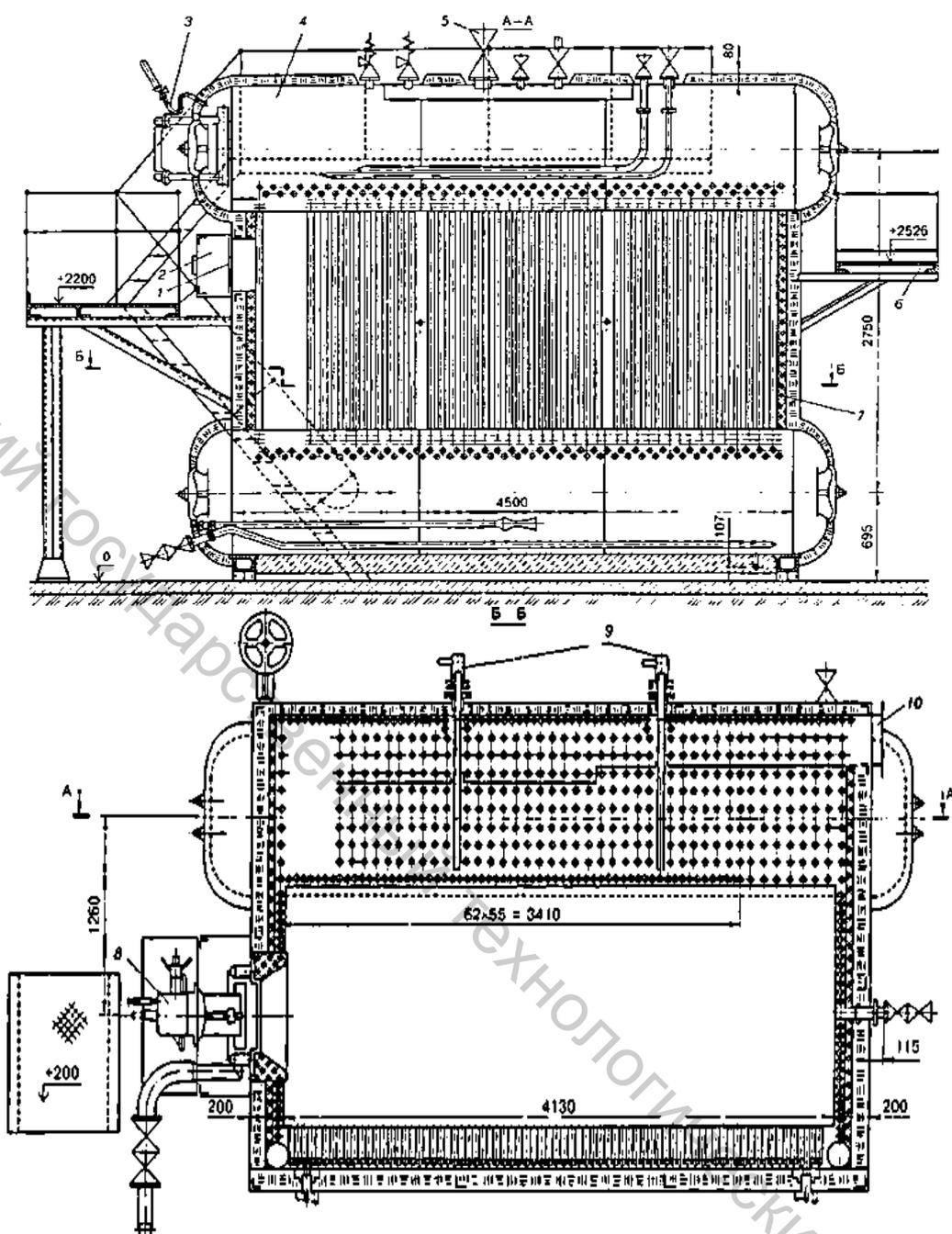


Рисунок 2.2 б – Паровой котёл ДЕ-10-14ГМ:

- 1 – взрывной предохранительный клапан; 2 – короб предохранительного взрывного клапана; 3 – трубка манометра; 4 – верхний барабан; 5 – паровая задвижка; 6 – площадка обслуживания; 7 – обмуровка огнеупорная; 8 – короб отвода продуктов сгорания; 9 – обдувочный аппарат; 10 – газомазутная горелка

Такое расположение топки предотвращает обогрев верхнего барабана и значительно уменьшает площадь ограждающих поверхностей [9, 10]. Котлы этой серии всех типоразмеров имеют единый поперечный профиль с одинаковой шириной топочной камеры по осям боковых экранов труб, равной 1790 мм.



Рисунок 2.3 – Топка котла типа ДЕ в процессе монтажа

Глубина топочной камеры изменяется в зависимости от номинальной паровой производительности котла. Средняя высота топки – 2500 мм. Длины цилиндрической части верхнего и нижнего барабанов одинаковы. В днищах барабанов имеются лазовые затворы (6) и (7) для внутреннего осмотра и очистки внутренних поверхностей барабанов котлов от отложений. Диаметр верхнего и нижнего барабанов составляет 1000 мм [4].

Топка котла полностью экранирована и отделена от конвективного пучка газоплотной перегородкой (8), образованной из труб диаметром 51x2,5 мм, установленных вплотную с шагом 55 мм и сваренных между собой. В задней части перегородки ниже верхнего барабана имеется окно для прохода топочных газов в конвективный пучок (9). В газовом окне расположен однорядный фестон.

Основными составными частями этих котлов являются: верхний и нижний барабаны, два конвективных пучка, фронтальный, боковой и задний экраны, образующие топочную камеру [11, 12].

Трубы левого бокового экрана, правого бокового экрана, образующего под и потолок топочной камеры, вводятся непосредственно в верхний и нижний барабаны котла.

Фронтальной экран котлов производительностью 4; 6,5 и 10 т/ч подсоединяется к верхнему и нижнему коллекторам диаметром 159x6 мм. Фронтальный экран аналогичен заднему экрану и отличается от него лишь

отсутствием части труб в местах расположения амбразуры горелок, лаза и совмещенного с ним взрывного клапана.

На котлах большей производительности 16 и 25 т/ч фронтальный экран образован четырьмя трубами, подсоединенными непосредственно к нижнему и верхнему барабанам.

Плотное экранирование боковых стен топки, пода и потолка с относительным шагом труб $s/d=1,03$ позволяет на котлах этого типа применить лёгкую изоляцию в 2–3 слоя изоляционных плит толщиной 100 мм, которые укладываются на слой шамотобетона толщиной 15–20 мм.

На фронтальной стене топки котлов производительностью 4; 6,5 и 10 т/ч установлено по одной газомазутной горелке типов ГМ-2,5; ГМ-4,5; ГМ-7 тепловой мощностью соответственно: 2,9 МВт (2,5 Гкал/ч); 5,22 МВт (4,5 Гкал/ч); 8,12 МВт (7 Гкал/ч). На котле ДЕ-16 установлена горелка типа ГМ-10 с цилиндрической амбразурой тепловой мощностью 11,6 МВт (10 Гкал/ч), а на котле ДЕ-25 – камера двухступенчатого сжигания с горелкой ГМ-16 тепловой мощностью 18,56 МВт (16 Гкал/ч).

Конвективный пучок котлов выполнен из коридорно-расположенных вертикальных труб диаметром 51x2,5 мм, которые развальцованы в верхнем и нижнем барабанах котла. Продольный шаг труб вдоль барабана – 90 мм, поперечный – 110 мм.

Пароперегреватель котлов производительностью 4; 6,5; 10 т/ч выполнен в виде змеевика из труб диаметром 32x3 мм. Пароперегреватель в котлах большей производительности (16 и 25 т/ч) выполнен из двух рядов вертикальных труб диаметром $\varnothing 51/2,5$ мм (рис. 2.4).

В водяном пространстве верхнего барабана находится питательная труба и труба для ввода фосфатов. В нижнем барабане размещают перфорированные трубы для продувки, а также устройство для парового прогрева воды в барабане при растопке и патрубки для спуска воды.

На котлах производительностью 4–10 т/ч через патрубок для слива воды осуществляется периодическая и непрерывная продувки. На котлах большей производительности (16 и 25 т/ч) через эту трубу осуществляется только периодическая продувка, а непрерывная производится из солёного отсека верхнего барабана котлов [13, 14].

В верхнем барабане котлов расположены сепарационные устройства. В первой ступени испарения в качестве сепарационных устройств используются щитки и козырьки, направляющую из экранных труб пароводяную смесь на уровень воды. Сепарационные устройства второй ступени испарения выполнены из продольных щитов, направляющих движение пароводяной смеси на торец барабана и затем вдоль него к поперечной перегородке, разделяющей отсеки.

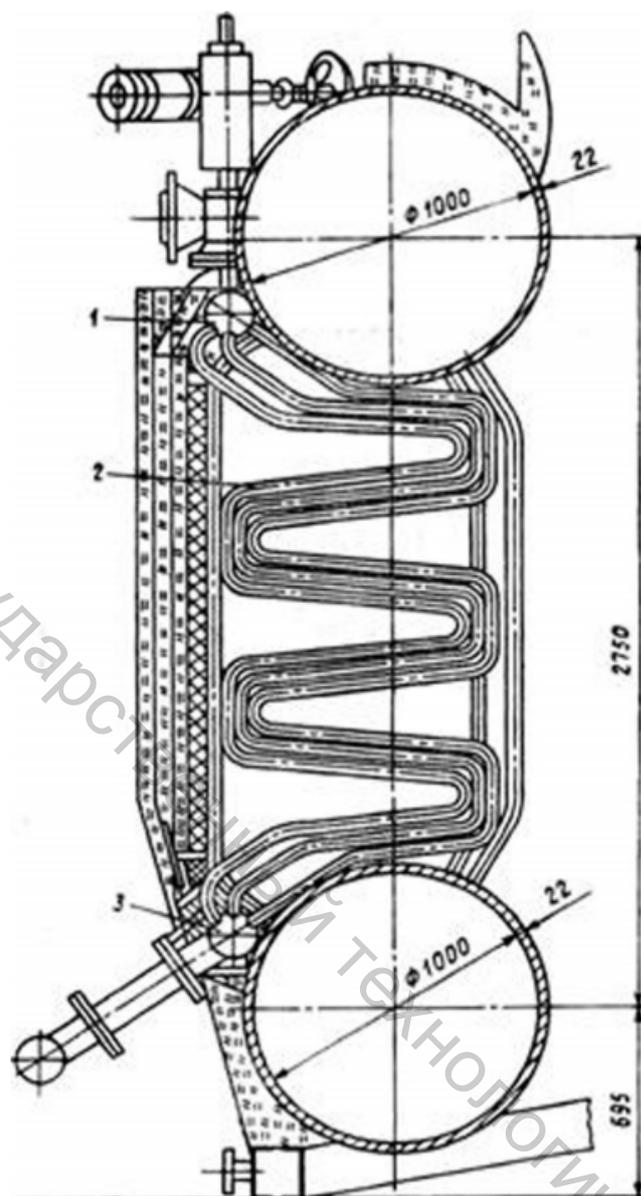


Рисунок 2.4 – Змеевиковый пароперегреватель котлов типа ДЕ:
 1 – входной коллектор; 2 – змеевиковая поверхность нагрева;
 3 – выходной коллектор

Для выравнивания скоростей пара внутри барабана по его длине выше сепарационных устройств в барабане котла располагается дырчатый пароприёмный потолок.

Перед пароприёмным потолком устанавливается горизонтальный жалюзийный сепаратор, кроме котла производительностью 4 т/ч.

Чистый и соленый отсеки сообщены между собой по пару и через подпиточную трубу по воде.

На всех котлах осуществляется внутри котловая обработка воды. По трубопроводу 2 в верхний барабан вводится водный раствор 3-натрийфосфата, который вступает в реакцию с растворёнными в котловой воде солями и переводит их в нерастворенное состояние с образованием шлама. Шлам по

опускным трубам опускается в нижний барабан и выводится из котла периодической продувкой.

Питательная вода после водяного экономайзера вводится в верхний барабан через трубу 3.

Опускными трубами в контурах циркуляции являются последние по ходу газов наименее обогреваемые ряды труб конвективного пучка.

Для снижения температуры уходящих газов и повышения коэффициента полезного действия котлы оснащаются индивидуальными чугунными водяными экономайзерами. Экономайзеры устанавливаются в котельной рядом с паровыми котлами и присоединяются к ним с помощью газоходов.

Чугунные экономайзеры собираются из отдельных типовых элементов – ребристых труб длиной 1500, 2000, 2500 или 3000 мм, которые соединяются между собой фасонными изделиями, называемыми калачами.

В зависимости от количества труб экономайзеры монтируются на месте и обкладываются кирпичной кладкой или поставляются в виде отдельных блоков, которые собираются на заводе.

При монтаже на месте собирают горизонтальную группу из не более чем восьми труб в ряду и собирают колонку из четырёх рядов труб по высоте. Количество рядов по высоте ограничивается возможностями обдувочных аппаратов, встраиваемых в блоки экономайзера.

Скорость воды в трубах экономайзера составляет 0,3–1,5 м/с. Вода движется снизу вверх, чтобы воздух, выделяющийся из воды при её нагревании, лучше удалялся. Продукты сгорания обычно направляют по схеме противотока по отношению к направлению движения воды.

Котлы серии ДЕ имеют высокую степень заводской готовности, что повышает эффективность их монтажа.

2.2 Конструкция газомазутного горелочного устройства типа ГМГ

Горелочные устройства служат для приготовления топливо-воздушной смеси и подачи ее в топочную камеру.

Для сжиганий мазута и газа в топках котлов типа Е (ДЕ) широкое распространение получили горелочные устройства типа ГМГ, конструкция и принцип работы которого подробно описаны в [16, 17].

Конструкция газомазутной горелки типа ГМГ приведена на рисунке 2.5. Горелка ГМГ предназначена для совместного и отдельного сжигания газообразного и жидкого топлива [18, 19].

По центру горелки установлена паромеханическая форсунка для сжигания жидкого топлива, которая обеспечивает хорошее качество распыла во всём диапазоне регулирования нагрузок.

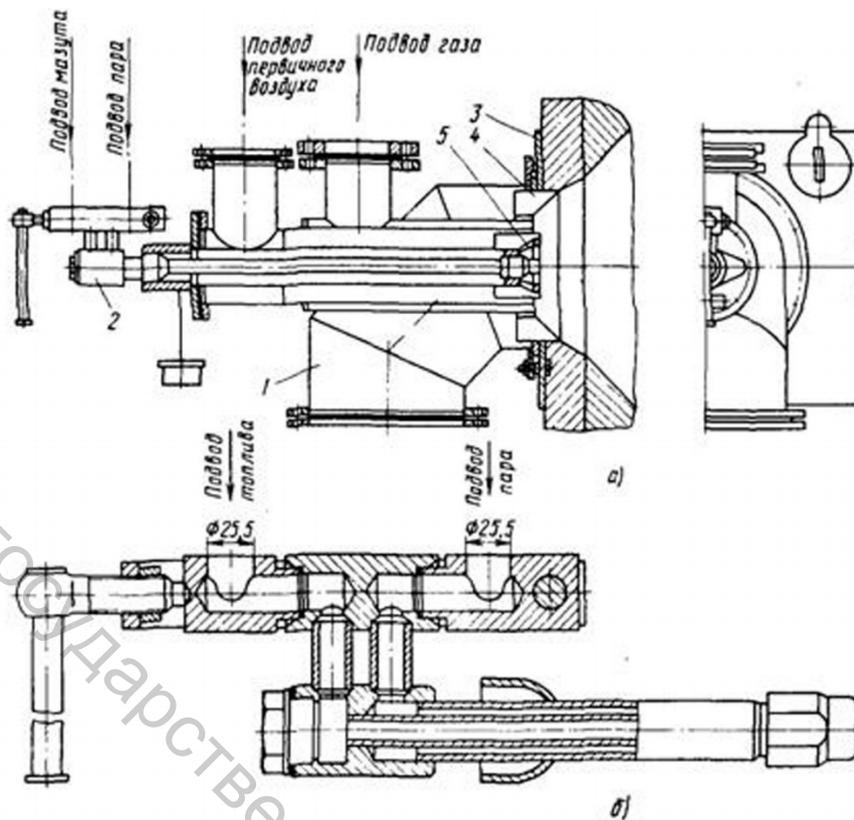


Рисунок 2.5 – Горелочное устройство типа ГМГ:

а – горелка; б – форсунка; 1 – газозвудушная часть; 2 – мазутная горелка; 3 – монтажная плита; 4 – регистр вторичного воздуха; 5 – регистр первичного воздуха

В мазутную форсунку (2) подается мазут и пар для распыла мазута. В форсунке мазут по внутренней трубе поступает к кольцевому завихрителю, из которого по тангенциальным каналам подается в камеру завихрения. В камере завихрения жидкое топливо приобретает вращательно-поступательное движение и за счёт центробежных сил распыливается на выходе из сопла.

Воздух в горелку поступает двумя потоками. Около 15 % от общего количества в виде первичного воздуха через регистр первичного воздуха (5) подаётся к корню факела. В регистре поток воздуха закручивается, обеспечивая хорошее перемешивание его с топливом.

Другая часть топлива в виде вторичного воздуха в количестве примерно 85 % от общего количества закручивается в лопаточном аппарате регистра (4) лопатками, установленными под углом 45° к направлению движения потока. Регистры первичного и вторичного воздуха выполняются левого и правого вращения.

Газообразное топливо подаётся к корню факела.

При работе котла на жидком топливе подача первичного воздуха в горелку не регулируется. При работе на газе расход первичного воздуха изменяется пропорционально расходу газа регулятором воздуха.

2.3 Описание принципа работы котлов типа ДЕ

При работе котла в него через горелочное устройство, установленное на фронтальной стене топочной камеры, подаётся органическое топливо, которое сжигается в топочном пространстве. При горении топлива образуются продукты сгорания, и выделяется большое количество тепловой энергии. Продукты сгорания приобретают температуру порядка 1700–1900 °С. Внутренняя поверхность стен топки экранирована, закрыта парообразующими трубами.

Так как скорость движения продуктов сгорания в топке невелика, то основным способом передачи тепловой энергии в ней является излучение. За счёт лучистого теплообмена часть тепловой энергии продукты сгорания отдают парообразующим поверхностям нагрева, охлаждаясь до температуры 1150–1250 °С на выходе из топки. За счёт тепловой энергии, полученной экранными поверхностями в находящейся в них воде, образуется пар, и пароводяная смесь начинает двигаться вверх к верхнему барабану.

Схема движения продуктов сгорания в котлах производительностью 4; 6,5 и 10 т/ч показана на рисунке 2.6.

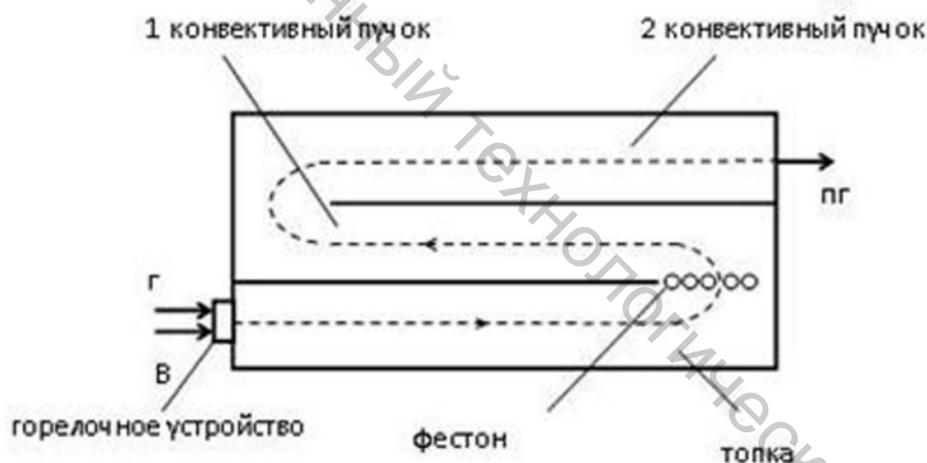


Рисунок 2.6 – Схема движения газов в котлах производительностью 4; 6,5 и 10 т/ч

Дымовые газы проходят топку до заднего экрана, в районе которого расположено окно в перегородке, отделяющей топку от конвективного пучка.

Первый конвективный пучок от топочной камеры отделён левым топочным экраном, который представляет собой газоплотную перегородку, выполненную из сваренных между собой труб диаметром 51x2,5 мм.

В газовом окне расположен однорядный фестон.

На котлах производительностью 4; 6,5 и 10 т/ч конвективный пучок имеет продольные перегородки, разделяющие его на два хода (первый и второй конвективные пучки).

При входе в первый конвективный пучок дымовые газы изменяют свое направление на 180° и двигаются в направлении фронта котла.

В районе фронтальной стенки котла имеется газовое окно в перегородке, отделяющей первый конвективный пучок от второго. Проходя через газовое окно дымовые газы вновь меняют своё направление движения на 180° , попадая во второй конвективный пучок. Выход газов осуществляется через заднюю стенку котла.

Котлы при помощи газовых коробов соединяются с водяными экономайзерами, монтируемыми в отдельных колонках за котлами.

На рисунке 2.7 приведена схема движения газов в котлах производительностью 16 и 25 т/ч.

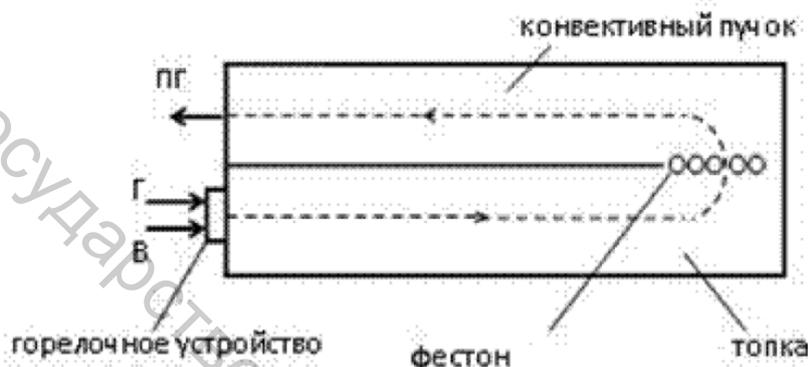


Рисунок 2.7 – Схема движения газов в котлах производительностью 16–25 т/ч

Котлы производительностью 16 и 25 т/ч не имеют в конвективном пучке продольных перегородок, поэтому конвективный пучок является однопоточным, и дымовые газы покидают котел через газовое окно на фронтальной стенке. Переброс дымовых газов с фронтального экрана котлов к водяному экономайзеру осуществляется газовым коробом.

На рисунке 2.8 представлена фотография конвективного пучка котлов серии ДЕ.

Котельный пучок со стороны топки котла представляет плотную трубную систему (1), с достаточным разрежением справа (2). Плотная трубная система со стороны топки в дальнейшем покрывается изоляцией, создавая левый экран топочной камеры. Разреженное пространство труб (2) является однорядным фестоном котла, расположенным в газовом окне между топочной камерой и котельным пучком.

Котлы производительностью 4; 6,5; 10 т/ч имеют одну ступень испарения. Котлы большей производительностью (16 и 25 т/ч) имеют двухступенчатую систему испарения с внутри барабанным солевым отсеком.

2.4 Теоретические основы ступенчатого испарения

Организация водно-сепарационной схемы работы барабанных котлов по методу ступенчатого испарения широко применяется для снижения концентрации примесей в котловой воде [20, 21, 22].



Рисунок 2.8 – Вид котельного пучка со стороны топки

Принцип непрерывного производства пара в барабанных паровых котлах основан на работе контуров циркуляции котловой воды. При такой схеме производства пара имеется барабан котла (1), нижние коллектора, объединяющие часть парообразующих поверхностей нагрева (2), в которые котловая вода в общем случае подается из барабана через опускные не обогреваемые трубы (3), а из них по парообразующим поверхностям нагрева (4) пароводяная смесь поступает в барабан котла (1). Принцип работы циркуляционных контуров рассмотрен в следующем разделе настоящего издания.

Уровень содержания примесей в котловой воде также определяется качеством поступающей в барабан питательной воды. Схема одноступенчатого испарения приведена на рисунке 2.9 [23, 24].

При одноступенчатой схеме испарения питательная вода (5) поступает в барабан котла (1). В процессе её испарения в парообразующих поверхностях нагрева (4) концентрация примесей растет, поскольку их растворимость в паре (7), образовавшемся из котловой воды, существенно ниже, чем в воде. Следовательно, концентрация примесей растет в котловой воде в процессе производства пара. Для того чтобы концентрация примесей в котловой воде не достигла значения, при котором начнется их вынос с паром, образовавшимся в котле, применяется непрерывная продувка (6), производимая из барабана котла. Концентрация примесей в котловой воде зависит от параметров работы парового котла и для каждой группы паровых котлов определена требованиями правил технической эксплуатации.

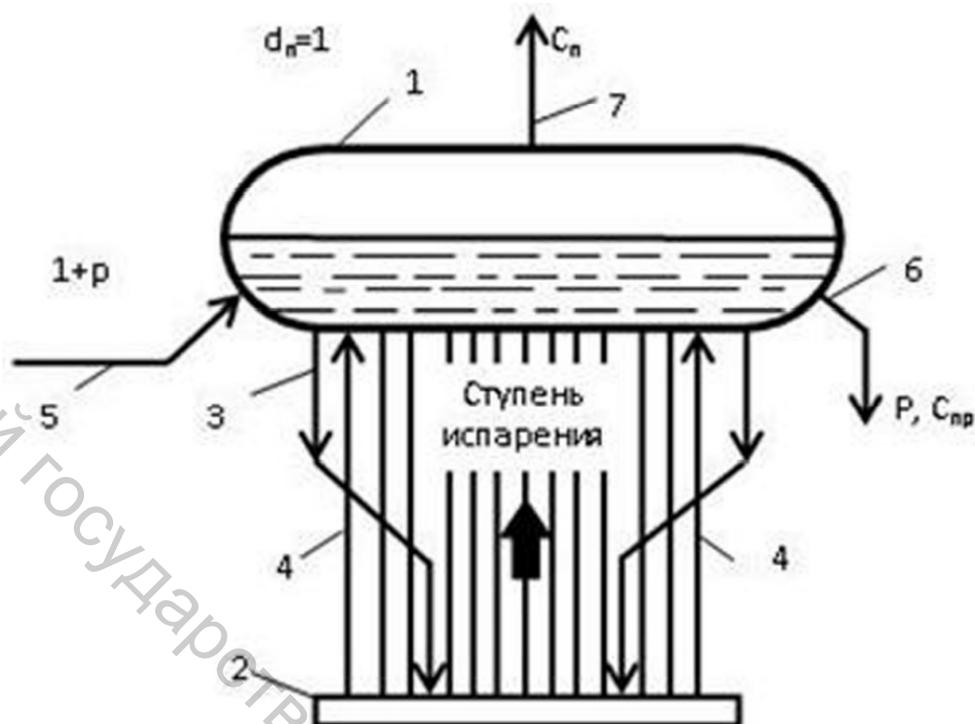


Рисунок 2.9 – Простейшая схема одноступенчатого испарения в барабанном котле:

1 – барабан котла, 2 – нижний коллектор 3 – опускные трубы, как правило, необогреваемые, 4 – парообразующие поверхности нагрева, 5 – подача питательной воды в котел, 6 – непрерывная продувка котла, 7 – выход пара из котла, C_{Π} – концентрация примесей в паре, $C_{\Pi.в.}$ – концентрация примесей в питательной воде, $C_{\Pi.р.}$ – концентрация примесей в продувочной воде, d_{Π} – 1 – доля насыщенного пара в котле, p – величина непрерывной продувки котла в долях от его нагрузки

Для рассматриваемой одноступенчатой системы испарения запишем уравнение баланса содержания примесей в следующем виде:

$$C_{\Pi.в.}(1 + p) = C_{\Pi} + pC_{\Pi.р.}, \quad (2.1)$$

где $C_{\Pi.в.}$ – концентрация примесей в питательной воде, p – относительная величина продувки, C_{Π} – концентрация примесей в паре, $C_{\Pi.р.}$ – концентрация примесей в продувочной воде.

Концентрация веществ в котловой воде отвечает составу продувочной воды, поэтому в уравнении (1), заменив значение концентрации продувочной воды на концентрацию котловой воды, получим:

$$C_{К.в.} = \frac{C_{\Pi.в.}(1 + p) - C_{\Pi}}{p}. \quad (2.2)$$

Из этого соотношения следует, что если принять солесодержание пара равным нулю, поскольку растворимость примесей в нём более чем на порядок ниже, чем в воде, то из соотношения (2.2) получим:

$$C_{к.в.} = \frac{C_{п.в.}(1+p)}{p} \quad (2.3)$$

Качество пара можно повысить за счёт снижения концентрации вредных примесей в котловой воде, за счет повышения величины непрерывной продувки, что приведет к снижению концентрации в котловой воде. Этот путь экономически не выгоден. При обеспечении нормальной работы котлов в качестве исходной мы используем воду с температурой порядка 15–20 °С. А продувочная вода имеет температуру, близкую к температуре насыщения в барабане котла. Таким образом, повышение величины непрерывной продувки приводит к снижению экономичности работы котла.

Поэтому величина непрерывной продувки строго регламентируется и в соответствии с ПТЭ не должна превышать 5–10 % от производительности котла.

Для повышения экономичности выработки пара в настоящее время широко применяется ступенчатое испарение [23]. Принципиальные основы ступенчатого испарения рассмотрим ниже.

На рисунке 2.10 приведена принципиальная схема двухступенчатого испарения, рассмотрение которой позволяет понять физику процессов, происходящих при этом [24].

Схема ступенчатого испарения предусматривает разделение испарительных поверхностей нагрева на отдельные циркуляционные контуры, общим элементом для которых является паровое пространство барабана котла. При двухступенчатом испарении водяной объём барабана котла разделяется на два отсека.

Нижние коллектора парообразующих поверхностей нагрева имеют свои опускные трубы и подключенные к ним соответствующие парообразующие поверхности нагрева. Паровая производительность соленого отсека должна составлять 20–10 % от паровой производительности чистого отсека.

В барабане котла установлена перегородка, которая делит его на два отсека. Отсеки по воде разделены, имея свои контуры циркуляции. В перегородке выполнено водоперепускное окно, через которое осуществляется продувка первой ступени испарения во вторую. Питательная вода поступает только в чистый отсек.

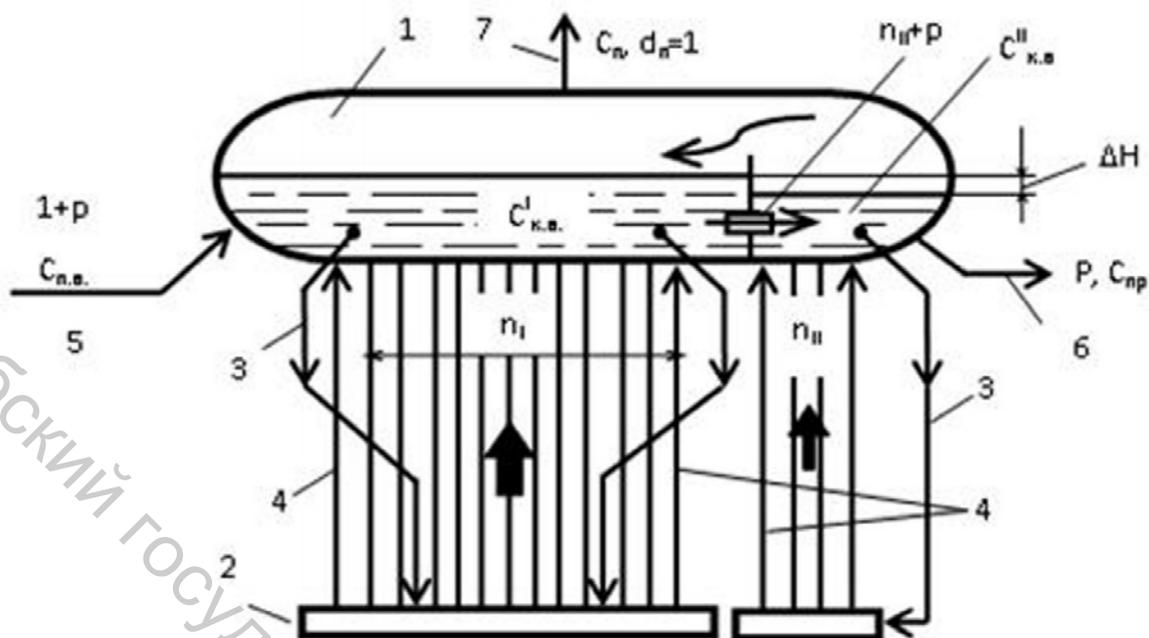


Рисунок 2.10 – Двухступенчатая схема испарения:

- 1 – барабан котла, 2 – нижние коллектора испарительной системы, 3 – необогреваемые опускные трубы, 4 – испарительные поверхности нагрева, 5 – подача питательной воды в котел, 6 – непрерывная продувка котла, 7 – выход пара из котла

Сопоставим качество пара, получаемое при одноступенчатом испарении, с качеством пара, получаемым при двухступенчатом испарении, при одном и том же качестве питательной воды и одинаковой величине непрерывной продувки. Непрерывная продувка равна 5 % от производительности котла.

При одноступенчатом испарении на основании уравнения (2.3) получим соотношение для концентрации примесей в котловой воде в следующем виде:

$$C_{к.в.} = \frac{C_{п.в.}(1 + 0,05)}{0,05} = 21C_{п.в.} \quad (2.4)$$

Рассчитаем концентрацию примесей в чистом и солёном отсеке при условии, что паровая производительность чистого отсека n_1 составляет 85 % от паровой производительности котла, солёного отсека n_2 – 15 % при той же самой величине непрерывной продувки котла.

Для чистого отсека продувкой будет являться величина непрерывной продувки котла p и то количество котловой воды, из которой произведен пар парообразующими поверхностями нагрева солёного отсека. При такой величине продувки чистого отсека концентрация веществ в котловой воде чистого отсека значительно ниже, чем при одноступенчатом испарении.

Содержание примесей в первой ступени определим по соотношению:

$$C_{к.в.}^I = \frac{C_{п.в.}(n_1 + n_2 + p)}{n_2 + p} = 5,25C_{п.в.} \quad (2.5)$$

Содержание примесей во второй ступени испарения составит:

$$C_{К.В.}^2 = \frac{C_{К.В.}^1 (n_2 + p)}{p} = 21,04 C_{П.В.} \quad (2.6)$$

Из приведённого примера видно, что содержание примесей в чистом отсеке значительно ниже содержания примесей во втором отсеке. Отсюда следует, что основная масса пара при двухступенчатом испарении получается из пара более высокого качества и только 15 % пара мы получаем из пара с примесями, очень близкими к концентрациям их в котловой воде при одноступенчатом испарении.

Приведённый пример доказывает эффективность использования двухступенчатого испарения.

На рисунке 2.11 приведена схема ступенчатого испарения котлов типа ДЕ производительностью 16 и 25 т/ч.

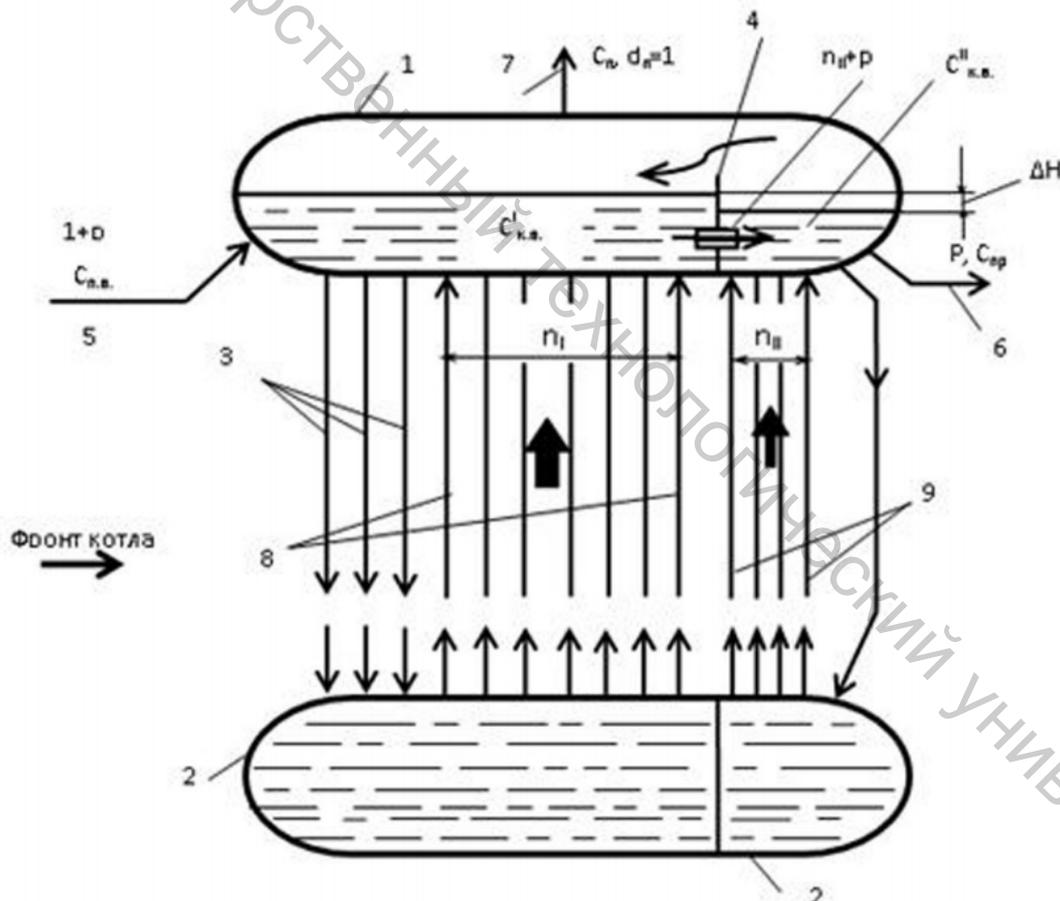


Рисунок 2.11 – Двухступенчатая схема испарения котлов ДЕ производительностью 16 и 25 т/ч:

- 1 – верхний барабан котла, 2 – нижний барабан котла, 3 – опускные трубы чистого и солёного отсеков, 4 – перегородка в верхнем барабане котла,
- 5 – подача питательной воды в котел, 6 – непрерывная продувка котла,
- 7 – глухая перегородка, 8 – подъемные трубы чистого отсека,
- 9 – подъемные трубы солёного отсека

Схема двухступенчатого испарения этих котельных агрегатов отличается от классической схемы тем, что у испарительных поверхностей нагрева отсутствуют нижние коллектора, и все они включены в нижний барабан котла. Поэтому рассмотрим более подробно приведённую двухступенчатую схему испарения.

При одноступенчатом испарении все парообразующие поверхности его – экранные поверхности топки (боковые, фронтальной и задней экраны), поверхности котельного (котельных) пучка – объединены нижним и верхним барабанами.

При двухступенчатом испарении нижний барабан разделяется глухой перегородкой на два отсека. Чистый отсек, как было сказано ранее, объединяет 80–85 % поверхностей нагрева котла, а солёный – 20–15 %.

В верхнем барабане котла выполнена перегородка, которая делит верхний барабан котла на два отсека. Перегородка разделяет только водяной объём и несколько выступает над уровнем воды. В ней имеется отверстие, соединяющее чистый и солёный отсеки по воде.

Чистый отсек включает в себя часть верхнего барабана (1), расположенную с фронтальной поверхности котла, часть нижнего барабана (2), парообразующие поверхности (8) чистого отсека и опускные трубы (3). Опускная система первой ступени испарения состоит из последних по ходу газов слабо обогреваемых рядов труб конвективного пучка.

Поверхностями нагрева солёного отсека являются наиболее обогреваемые трубы котельного пучка, соединённые с верхним барабаном котла за перегородкой (4). Эти трубы по ходу газов расположены сразу за фестоном.

Опускными трубами солёного отсека являются необогреваемые трубы, соединяющие солёный отсек верхнего барабана с частью нижнего барабана.

На рисунке 2.12 показан вид котла производительностью 16 т/ч со стороны заднего экрана топки. В этой части барабанов котла располагается солёный отсек.

На рисунке хорошо видна необогреваемая опускная система солёного отсека котла.

Опускная труба (1) и монтажные отверстия (2) для присоединения второй опускной трубы. Опускные трубы расположены за поверхностью конвективного пучка вне зоны обогрева продуктами сгорания.

Необогреваемые опускные трубы имеют диаметр 159х4,5 мм. У котла производительностью 16 т/ч их две, а на котле производительностью 25 т/ч таких опускных труб 3 [11].



Рисунок 2.12 – Вид трубной системы котла производительностью 16 т/ч со стороны солевого отсека

2.5 Парообразующие поверхности нагрева

Процесс генерации пара в котлах с естественной циркуляцией осуществляется в отдельных контурах циркуляции.

Принцип работы циркуляционного контура рассмотрим на примере работы простого циркуляционного контура, приведённого на рисунке 2.13.

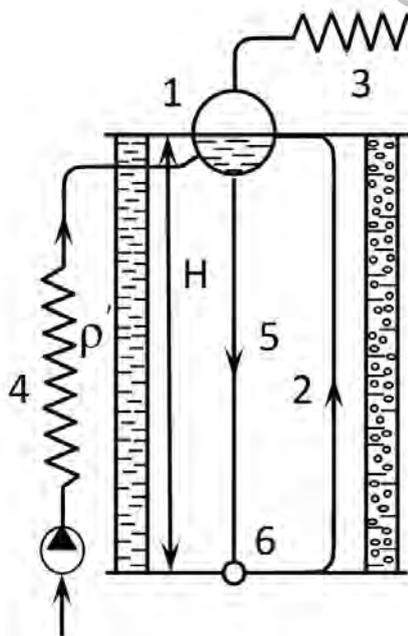


Рисунок 2.13 – Схема циркуляционного контура котла:
 1 – барабан котла; 2 – парообразующие трубы; 3 – пароперегреватель;
 4 – водяной экономайзер; 5 – опускные трубы; 6 – нижний коллектор

Контур объединяет систему параллельных подъёмных труб (2), имеющих одинаковое конструктивное оформление и одинаковый тепловой обогрев. Они объединены в одно звено, имеющее свой распределительный коллектор и свою опускную систему (5), состоящую из одной или нескольких опускных труб, а внизу объединённых коллектором (6). Замкнутая система образует циркуляционный контур, который заполняется водой до уровня ниже диаметральной плоскости барабана 1 на 15–20 см.

При создании в топочной камере зоны высоких температур газов в обогреваемых газами трубах вода закипает. Далее при подведении тепла к экранным трубам они заполняются пароводяной смесью, имеющей плотность $\rho_{см}$, которая ниже плотности воды.

Необогреваемые трубы 5 заполнены водой, имеющей плотность воды ρ' при давлении в барабане.

Вертикальная плоскость, проходящая вдоль оси нижнего коллектора, условно разделяет гидравлическую систему на две части. С левой стороны от коллектора система подвержена давлению столба воды, заполняющей опускную, необогреваемую трубу, равному $H\rho'g$. С правой стороны система подвержена давлению столба пароводяной смеси, заполняющей обогреваемые трубы, равному $H\rho_{см}g$.

Разность давлений $H(\rho' - \rho_{см})g$ называется движущим напором естественной циркуляции:

$$S_{дв} = H(\rho' - \rho_{см})g, \quad (2.7)$$

где $S_{дв}$ – движущий напор естественной циркуляции, Па; H – высота контура, м; ρ' ; $\rho_{см}$ – плотности воды и пароводяной смеси, кг/м³, g – ускорение свободного падения, м/с².

Обогреваемые трубы получили название подъёмных труб, не обогреваемые трубы – опускных труб.

В подъёмных трубах происходит в основном испарение воды. Поток пароводяной смеси обеспечивает охлаждение металла подъёмных труб, обогреваемых продуктами сгорания, и гарантирует их длительную и надёжную работу.

Такие котлы получили название паровых котлов с естественной циркуляцией. Величина движущего напора прямо пропорциональна высоте контура H и разности плотностей воды и пароводяной смеси, являющейся функцией интенсивности теплообмена в топке.

Отношение массового расхода циркулирующей воды G_0 , кг/с, к количеству образовавшегося пара в единицу времени D , кг/с, называется кратностью циркуляции:

$$\kappa = G_0 / D. \quad (2.8)$$

Кратность циркуляции обычно составляет величину от 4 до 200. Расход воды в контуре циркуляции в k раз больше паровой производительности котла.

Область перехода от воды к состоянию пара называют зоной фазового перехода [5].

2.6 Испарительные поверхности нагрева котлов типа ДЕ и циркуляция воды в них

Испарительными поверхностями вертикально-водотрубных паровых котлов являются поверхности, в которых происходит испарение воды, а часто и догрев воды до температуры кипения. Такими поверхностями являются **котельные пучки**, получающие тепло преимущественно за счёт конвективного теплообмена с горячими продуктами сгорания, **фестон**, расположенный в газовом окне и представляющий полурадиационную поверхность нагрева, и **экранные поверхности топки**, получающие тепловую энергию за счёт радиационного обогрева [26].

В котлах типа ДЕ применяются сложные контуры, которые состоят из нескольких простых контуров, у которых некоторые звенья являются общими. В нашем случае общими являются опускные трубы.



Рисунок 2.14 – Трубная система котла типа ДЕ производительностью 4–10 т/ч

На рисунке 2.14 изображена трубная система котла типа ДЕ производительностью от 4 до 10 т/ч (вид сзади).

Слева расположен задний экран топки, объединенный верхним и нижним коллекторами, соединенными с верхним и нижним барабанами котла. Нижний коллектор расположен горизонтально, а верхний – наклонно.

С правой стороны от топки расположен конвективный пучок, разделённый на две части глухой перегородкой (1). Котлы этой производительности имеют двухходовой конвективный пучок. Продукты сгорания покидают топку котла, проходят через первый конвективный пучок (2) от задней стенки топочной камеры к фронтальной стенке котла, разворачиваются в газоходе на 180° и возвращаются к задней стенке котла. Из правой части конвективного пучка (3) продукты сгорания уходят в газоход, соединяющий котел с водяным экономайзером. Часть труб второго конвективного пучка (3), которые находятся в зоне низких температур, поскольку омываются продуктами сгорания перед их выходом в газоход, с наибольшей вероятностью можно считать опускными трубами всех парообразующих поверхностей нагрева котла.

На рисунке 2.15 изображена трубная системы котла типа ДЕ производительностью 16 и 25 т/ч (изометрия).



Рисунок 2.15 – Изометрия трубной системы котла типа ДЕ производительностью 16 и 25 т/ч

Котлы этой производительности имеют одноходовой котельный пучок, поэтому продукты сгорания покидают котел с фронтальной стенки котла. Продукты сгорания на выходе из топки, проходя фестон, поворачивают на 180°, проходя через конвективный пучок, покидают котел. Газоход к котлу подсоединяется с фронтальной поверхности котла. Часть труб конвективного пучка, так же, как и у котлов меньшей производительности этой серии, является опускной для всех парообразующих поверхностей котлов, включая и парообразующие поверхности фронтального и заднего экранов, а другая часть является подъемными трубами.

Опускными трубами являются слабо обогреваемые трубы, располагающиеся в зоне минимальных температур продуктов сгорания. Для нашего котла такими трубами являются трубы (1).

Из верхнего барабана вода по слабо обогреваемым трубам поступает в нижний барабан котла, который распределяет её по всем парообразующим трубам. Вода по более обогреваемым трубам, в которых частично испаряется, за счет полезно образовавшегося напора пароводяной смеси поднимается в верхний барабан котла.

Как показано в предыдущем разделе, силой, вызывающей движение в контурах циркуляции, является разность плотностей пароводяной смеси в подъемных трубах и воды – в опускных. В верхнем барабане пароводяная смесь разделяется за счёт сепарационных устройств на воду и пар. Вода возвращается в водяной объём котла, а пар направляется к потребителю или в пароперегреватель. Котловая вода с вновь поданной из экономайзера питательной водой вовлекается в циркуляцию.

3 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕПЛОМ РАСЧЕТЕ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

3.1 Основные понятия и определения

Тепловой расчёт котельного агрегата в зависимости от целей, стоящих перед ним, различается на поверочный и конструктивный.

Поверочный расчёт котла проводится для оценки показателей экономичности и надёжности его работы на конкретном виде топлива, выбора вспомогательного оборудования и получения исходных данных для проведения аэродинамического и гидравлического расчётов, оценки интенсивности коррозии и т.д. [25].

При проведении поверочного расчёта должны быть известны: тип котельного агрегата, компоновка и размеры его поверхностей нагрева, вид сжигаемого топлива и способ его приготовления к сжиганию, нагрузка и параметры пара, температура питательной воды и перегретого пара, величины непрерывной продувки.

При конструктивном расчёте известны все параметры воды, пара и продуктов сгорания на входе и выходе из каждой поверхности нагрева, а также конструктивная схема котла [25].

При конструктивном расчёте определяются размеры топки и поверхностей нагрева отдельных элементов котла, необходимые для обеспечения принятой номинальной производительности.

При поверочно-конструктивном расчёте часть поверхностей нагрева рассчитывается поверочным расчётом, в результате которого определяются их тепловосприятия, а часть поверхностей – конструктивным расчётом. В результате конструктивного расчёта определяется необходимая площадь поверхности нагрева водяного экономайзера.

Такой расчёт обычно проводится при переводе котла на сжигание того вида топлива, который не предусматривался для сжигания данным типом котла при его проектировании. Например, котел был спроектирован для сжигания мазута, а его в процессе эксплуатации перевели на сжигание газообразного топлива.

3.2 Рекомендации по тепловому расчёту котла

Тепловой расчёт котла начинается с определения объёмов теоретически необходимого количества воздуха и объёмов продуктов сгорания для заданного вида топлива и его расчётных характеристик. Затем рассчитываются действительный объём воздуха и продуктов сгорания в топке и газоходах котла в соответствии с выбранными избытком воздуха в топке и присосами по газоходам котла. Определяются энтальпии продуктов сгорания и воздуха,

тепловые потери котельного агрегата. Составляется тепловой баланс котла, рассчитываются коэффициент полезного действия и расход топлива [26].

Рекомендации по проведению теплового расчета топки и конвективных поверхностей нагрева сформулированы на основании общих положений методик расчёта котлов малой и средней производительности.

1. Тепловой расчет топки осуществляется методом последовательных приближений. В начале теплового расчёта топки котла задаёмся температурой продуктов сгорания на выходе из неё. Затем по этой температуре рассчитываются параметры $V_{c_{cp}}$ и ξ_{ϕ} , которые используются далее для расчёта температуры на выходе из топки. Полученное значение температуры на выходе из топки сравнивается с температурой, принятой для определения $V_{c_{cp}}$ и ξ_{ϕ} . Если принятое и расчетное значения отличаются более чем на ± 100 °С, то расчёт необходимо повторить, задавшись новым значением температуры. Если принятое и расчетное значения отличаются менее чем на ± 100 °С, то расчёт считается законченным, расчетным значением температуры на выходе из топки считается значение, полученное на основании расчёта, и оно используется далее при проведении расчета конвективных поверхностей нагрева.

2. Газоход котла, в котором расположены конвективные пучки, отделён от топки котла однорядным фестоном. В соответствии с рекомендациями нормативного метода [26] при размещении в газовом объёме фестонов с числом рядов $z \leq 3$ тепловой расчёт этой поверхности (фестона) не проводится, а сама поверхность включается в поверхность стен топки.

3. При поверочном расчёте конвективных поверхностей нагрева предварительно задаются температурой одной из сред – продуктов сгорания или нагреваемой среды (пара, пароводяной смеси или воды).

Дальнейший расчёт состоит из двух этапов:

– на первом этапе по принятому значению температуры рассчитывается энтальпия этой среды. Затем по уравнению баланса по принятой температуре определяют тепловосприятие этой поверхности нагрева и рассчитывают конечную энтальпию второй среды;

– на втором этапе рассчитывается величина тепловосприятия этой поверхности по уравнению теплообмена.

Если тепловосприятие по уравнению теплопередачи будет отличаться от определённого тепловосприятия по балансу менее чем на 2 %, расчёт не уточняется. Полагается, что расчёт закончен и окончательными считаются температура и тепловосприятие, принятые при расчёте теплового баланса.

При большем расхождении необходимо принять новое значение температуры и повторить расчёт.

При первом приближении величина тепловосприятия по уравнению теплопередачи может оказаться выше величины тепловосприятия по балансу.

В этом случае необходимо принять такую температуру газов на выходе из поверхности нагрева, при которой разница между температурами продуктов сгорания на входе и выходе из поверхности нагрева была бы больше, чем при первом приближении и наоборот.

4. Для второго приближения целесообразно принимать значение темпера-

туры, которое отличается от первоначально принятого при первом приближении расчёта не более чем на 50 °С. В этом случае коэффициент теплопередачи пересчитывать не надо. Необходимо пересчитать только температурный напор и тепловосприятие излучением, если таковое имеет место, и заново решить уравнения баланса и теплопередачи.

5. Если при втором приближении расхождение между величинами тепловосприятия по уравнению теплопередачи и тепловосприятия по балансу окажется более 2 %, то истинную температуру можно найти путём аналитической интерполяции [28]:

$$\vartheta''_p = \vartheta''_2 + (\vartheta''_2 - \vartheta'')(Q_B - Q_T)_2 / [(Q_B - Q_T)_1 - (Q_B - Q_T)_2] \quad (3.1)$$

Полученное значение температуры принимается за расчётное значение.

Для завершения расчета необходимо только рассчитать тепловосприятие продуктов сгорания для определённой температуры и тепловосприятие поверхности нагрева по балансу.

6. При тепловом расчёте конвективного пучка следует учитывать, что температура обогреваемой среды постоянна и равна температуре кипения при давлении в барабане котла. При этих условиях температурный напор рассчитывается по следующему соотношению [25]:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\sigma} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\sigma}}{\Delta t_m}} \quad (3.2)$$

В тех случаях, когда $\Delta t_{\sigma} / \Delta t_m < 1,7$, температурный напор можно с достаточной точностью определить как среднеарифметическую разность температур.

7. При тепловом расчёте второго конвективного пучка и водяного экономайзера коэффициент теплоотдачи излучением не учитывается, если средняя температура продуктов сгорания в них меньше 300 °С.

8. Водяной экономайзер рассчитывается конструктивно. В результате расчёта определяется поверхность нагрева водяного экономайзера. В расчёте экономайзера используется фактический расход воды через него с учетом продувки.

9. Температура загрязненной стенки поверхности водяного экономайзера рассчитывается по соотношению:

$$t_z = t_{cp.в} + \Delta t \quad (3.3)$$

10. После расчёта экономайзера определяется расчетная невязка теплового баланса теплогенерирующей установки по следующему соотношению:

$$\Delta Q = Q_p^p \cdot \eta_{к.а} - (Q_m + Q_{кн1} + Q_{кн2} + Q_{вэ}), \quad (3.4)$$

где $Q_m, Q_{кн1}, Q_{кн2}, Q_{вэ}$ – тепловосприятия поверхностей нагрева: топки, котельных пучков и водяного экономайзера.

В формулу подставляются значения, определённые из уравнений теплового баланса.

При правильном выполнении расчёта величина невязки не должна превышать 0,5 % от величины располагаемого тепла.

Если расчётная невязка теплового баланса теплогенерирующей установки будет превышать 0,5 %, то необходимо повторить тепловой расчёт котла, задаваясь в каждой поверхности другими значениями температур с тем, чтобы получить меньшие расхождения между тепловосприятиями по балансу и по уравнению теплопередачи.

4 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ КОТЛА

4.1 Задание на проектирование

Провести поверочно-конструктивный тепловой расчёт парового котла ДЕ-XX-14ГМ, служащего для выработки насыщенного пара. Варианты заданий выдаются преподавателем в начале семестра. Исходные данные для теплового расчёта парового котла показаны в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Исходные данные для теплового расчёта котла

Характеристика	Обозначение
Маркировка котла	ДЕ-XX-14ГМ
Номинальная паровая производительность	$D_{ном}$
Температура питательной воды	$t_{пв}$
Давление питательной воды	$p_{пв}$
Вид топлива	ПРИРОДНЫЙ ГАЗ
Содержание метана	CH_4
Содержание этана	C_2H_6
Содержание пропана	C_3H_8
Содержание бутана	C_4H_{10}
Содержание пентана	C_5H_{12}
Содержание углекислого газа	CO_2
Содержание азота	N_2
Низшая теплота сгорания топлива	Q_n^c
Процент продувки котла	p

4.2 Расчёт объёмов продуктов сгорания, объёмных долей трехатомных газов

Объёмы и энтальпии воздуха и продуктов сгорания рассчитываются на 1 м^3 сухого газообразного топлива при нормальных условиях (0°C и $101,3 \text{ кПа}$).

Теоретическое количество воздуха V_g^0 , необходимого для сжигания 1 м^3 сухого газообразного топлива при $\alpha = 1$, определяем по формуле:

$$V_g^0 = 0,0476 \left[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right] \quad (4.1)$$

Теоретические объёмы продуктов сгорания, полученные при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха ($\alpha = 1$), определяются по следующим формулам:

– теоретический объём азота:

$$V_{N_2}^0 = 0,79V_6^0 + \frac{N_2}{100}, \quad (4.2)$$

– объём трехатомных газов:

$$V_{RO_2}^0 = 0,01(CO_2 + CO + H_2S + \sum mC_mH_n), \quad (4.3)$$

– теоретический объём водяных паров:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01(H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2}C_mH_n) + 0,0161V_6^0 \quad (4.4)$$

Теоретический объём продуктов сгорания:

$$V_2^0 = V_{N_2}^0 + V_{RO_2}^0 + V_{H_2O}^0 \quad (4.5)$$

Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки для камерной топки принимаем по таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Расчётные коэффициенты избытка воздуха на выходе из топки

Топка	Топливо	Коэффициент α_T
Камерная с твёрдым удалением шлака	Антрацит, тощий уголь	1,20–1,25*
	Остальное топливо	1,15–1,20
Камерная с жидким удалением шлака	Антрацит, тощий уголь	1,20–1,25
	Каменный и бурый угли	1,15–1,20
Камерная	Природный газ	1,05–1,1**
	Мазут	1,02–1,05***

*Большие значения – при транспортировке пыли горячим воздухом и наличии отдельных сбросных горелок.

**При наличии газоплотной топочной камеры принимают $\alpha_T = 1,05$.

***В топках с газоплотными экранами и в уплотнённых топках при $\Delta\alpha_T \leq 0,05$ принимают $\alpha_T = 1,02–1,03$.

Значения величины присосов воздуха в газоходах котла ДЕ-ХХ-14ГМ определяются из таблицы 4.3.

Таблица 4.3 – Присосы воздуха по газовому тракту

Элементы газового тракта котла		Величина присосов $\Delta\alpha$
Топочные камеры пылеугольных и газомазутных котлов	Газоплотные	0,02
	С металлической обшивкой труб экрана	0,05
	С обмуровкой и металлической обшивкой	0,07
	С обмуровкой и без обшивки	0,1
Газоходы конвективных поверхностей нагрева	Газоплотный газоход от топки до воздухоподогревателя	0,02
	Фестон, ширмовый пароперегреватель	0
	Первый конвективный пучок котла	0,05
	Второй конвективный пучок котла	0,1
	Экономайзер котла стальной	0,08
	Экономайзер котла чугунный с обшивкой	0,1
	Экономайзер котла чугунный без обшивки	0,2

С использованием таблиц 4.2, 4.3 и формул (4.1–4.5) заполняется таблица 4.4.

Таблица 4.4 – Объёмы газов, объемные доли трехатомных газов

Величина	Газоход			
	Топка	1 КП	2 КП	Экономайзер
Коэффициент избытка воздуха за поверхностью нагрева	α_T	$\alpha_i = \alpha_{i-1} + \Delta\alpha_i$		
Средний коэффициент избытка воздуха в поверхности нагрева	$\alpha_{срi} = \frac{(\alpha_{i-1} + \alpha_i)}{2}$			
Объём водяных паров, $\text{м}^3/\text{м}^3$	$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha_{срi} - 1) \cdot V_{г}^0$			
Полный объём газов, $\text{м}^3/\text{м}^3$	$V_2 = V_2^0 + (\alpha_{срi} - 1) \cdot V_{г}^0$			
Объёмная доля водяных паров	$r_{H_2O} = V_{H_2O} / V_2$			
Объёмная доля трехатомных газов	$r_{RO_2} = V_{RO_2}^0 / V_2$			
Доля трехатомных газов и доля водяных паров	$r_n = r_{RO_2} + r_{H_2O}$			

Из чертежа котла-аналога и технического описания выписываем основные характеристики поверхностей нагрева котла:

– размеры топочной камеры по осям труб (глубина, ширина, высота);

- объём топки с камерой догорания;
- лучевоспринимающая поверхность нагрева;
- конвективная поверхность нагрева;
- наружный диаметр и толщина труб экрана;
- наружный диаметр и толщина труб конвективного пучка;
- наружный диаметр и толщина труб экономайзера;
- шаг труб экранов;
- продольный шаг труб конвективного пучка;
- поперечный шаг труб конвективного пучка.

Энтальпия теоретически необходимого количества воздуха определяется по формуле:

$$I_{\epsilon}^0 = C_{\epsilon} \cdot t_{\epsilon} \cdot V_{\epsilon}^0, \quad (4.6)$$

где C_{ϵ} – теплоёмкость воздуха при соответствующей температуре, определяется по таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Средние теплоёмкости воздуха, газов, водяных паров

$\vartheta, ^\circ\text{C}$	$C_{RO_2}, \text{кДж/м}^3$	$C_{H_2O}, \text{кДж/м}^3$	$C_{N_2}, \text{кДж/м}^3$	$C_{\epsilon}, \text{кДж/м}^3$
100	1,70	1,49	1,30	1,32
300	1,86	1,54	1,31	1,34
500	1,98	1,59	1,33	1,37
700	2,08	1,64	1,35	1,40
900	2,17	1,69	1,38	1,43
1100	2,23	1,74	1,41	1,46
1300	2,28	1,80	1,43	1,47
1500	2,33	1,85	1,44	1,49
1700	2,37	1,90	1,46	1,50
1900	2,41	1,94	1,47	1,52
2100	2,44	1,98	1,48	1,54
2300	2,46	2,02	1,50	1,55

Энтальпию теоретического объёма продуктов сгорания I_z^0 определяем по формуле:

$$I_z^0 = (V_{RO_2}^0 \cdot C_{RO_2} + V_{H_2O}^0 \cdot C_{H_2O} + V_{N_2}^0 \cdot C_{N_2}) \cdot \vartheta, \quad (4.7)$$

где $V_{RO_2}^0, V_{H_2O}^0, V_{N_2}^0$ – объёмы продуктов сгорания; $C_{RO_2}, C_{H_2O}, C_{N_2}$ – теплоёмкости соответственно трехатомных газов, водяных паров и азота при постоянном давлении, кДж/(м³К), выбирается из таблицы 4.5.

Энтальпию продуктов сгорания I_z , кДж/м³, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha > 1$ определяем по формуле:

$$I_z = I_z^0 + (\alpha - 1)I_g^0 \quad (4.8)$$

Результаты расчёта энтальпий продуктов сгорания при действительных избытках воздуха в газоходах приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Энтальпии продуктов сгорания, кДж/м³.

Поверхность нагрева	ϑ , °C	I_z^0	I_g^0	ΔI_g^0	I_z	ΔI_z
Топочная камера α_T	2200					
	2000					
	1800					
	1600					
	1400					
	1200					
	1000					
1-й конвективный пучок $\alpha_{1КП}$	800					
	1000					
	800					
	600					
	400					
2-й конвективный пучок $\alpha_{2КП}$	200					
	800					
	600					
	400					
Водяной экономайзер $\alpha_{ВЭ}$	200					
	600					
	400					
	100					

4.3 Тепловой баланс котельного агрегата и определение расхода топлива

Составление теплового баланса котельного агрегата заключается в установлении равенства между поступившим в агрегат количеством тепла, называемым располагаемым теплом, и суммой полезно использованного тепла и тепловых потерь. На основании теплового баланса вычисляются КПД котла и необходимый расход топлива.

Располагаемое тепло Q_p^p на 1 м³ газообразного топлива определяется по формуле:

$$Q_p^p = Q_n^c \cdot 10^3 \quad (4.9)$$

Потери тепла с уходящими газами $q_2, \%$, определяются по формуле:

$$q_2 = \frac{(I_{yx} - \alpha_{yx} I_{x6}^0)(100 - q_4)}{Q_p^p} \quad (4.10)$$

где I_{yx} – энтальпия уходящих газов, кДж/м³, при соответствующем коэффициенте избытка воздуха α_{yx} определяется из таблицы 4.6; q_4 – потери тепла от механического недожога при сжигании газообразного топлива принимается равной 0.

Температуру уходящих газов принимаем равной t_{yx} из диапазона 120–130 °С для природного газа.

Энтальпия теоретически необходимого количества холодного воздуха ($t_{x.в.} = 30^\circ\text{C}$), принимаем равной 388,97 кДж/м³.

Для газообразного топлива потеря теплоты от химической неполноты сгорания $q_3, \%$, принимаем по таблице 4.7

Таблица 4.7 – Расчётные характеристики камерных топок газомазутных котлов

Топливо	Коэффициент избытка воздуха	Суммарный недожег % при нагрузках котла в процентах от номинальной		
		D = 100	70 ≤ D < 100	D < 70
Природный газ	1,03–1,05	0,15–0,20	0,20–0,25	0,40–0,50

Потерю теплоты от наружного охлаждения $q_5, \%$ для номинальной нагрузки котла определяем по рисунку 4.1.

Коэффициент полезного действия котла определяется по формуле:

$$\eta_k = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad (4.11)$$

Коэффициент сохранения тепла находится по формуле:

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{q_5 + \eta_k} \quad (4.12)$$

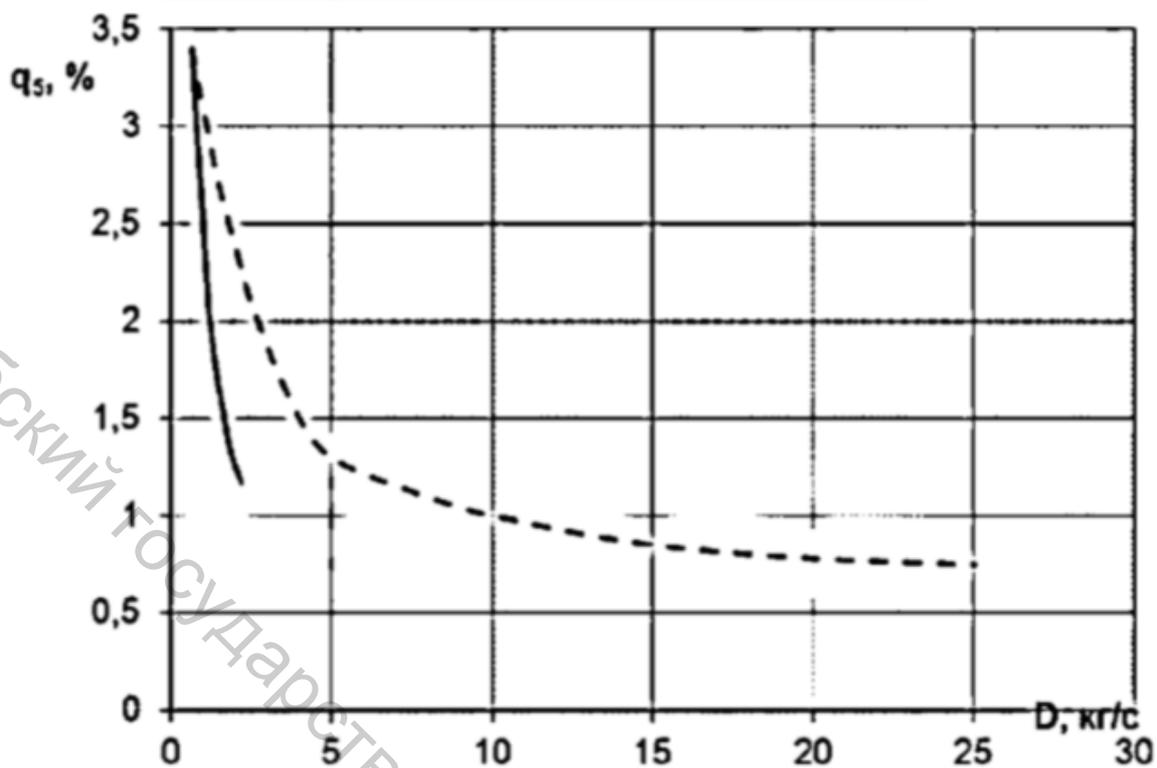


Рисунок 4.1 – Потери тепла от наружного охлаждения q_5

Расход топлива, кг/с, подаваемого в топочную камеру парового котла, определяем по формуле:

$$B = \frac{D_{нп} (i_{нп} - i_{нв}) + D_{пр} (i_{кун} - i_{нв})}{Q_p^p \cdot \eta_k} \quad (4.13)$$

где $D_{нп} = D_{ном}$ – количество выработанного насыщенного пара, отданного помимо пароперегревателя с энтальпией $i_{нп}$; $i_{нп}$ – энтальпия насыщенного пара, определяемая по давлению в барабане котла по таблице 4.8; $i_{нв}$ – энтальпия питательной воды на входе в водяной экономайзер, определяется по таблице 4.9 при температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$; $i_{кун}$ – энтальпия котловой воды, определяется по таблице 4.8 по давлению в барабане котла; $D_{пр}$ – расход воды на продувку котла, определяется по формуле (4.14).

$$D_{пр} = 0,01 \cdot p \cdot D_{нп} \quad (4.14)$$

где p – непрерывная продувка котла.

Таблица 4.8 – Удельные энтальпии сухого насыщенного пара и воды на кривой насыщения

$p, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$i_{\text{кит}}, \text{кДж / кг}$	$i_{\text{нт}}, \text{кДж / кг}$	$r, \text{кДж / кг}$
1	179,88	762,6	2777,0	2014,4
1,1	184,06	781,1	2780,4	1999,3
1,2	187,96	798,4	2783,4	1985,0
1,3	191,60	814,7	2786,0	1971,3
1,4	195,04	830,1	2788,4	1958,3
1,5	198,28	844,7	2790,4	1945,7
1,6	201,37	858,6	2792,2	1933,6
1,7	204,30	871,8	2793,8	1922,0
1,8	207,10	884,6	2795,1	1910,5
1,9	209,79	896,8	2796,4	1899,6
2,0	212,37	908,6	2797,4	1888,8

Таблица 4.9 – Удельная энтальпия воды

$t, ^\circ\text{C}$	$i_{\text{нг}}, \text{кДж / кг}$	$i_{\text{нг}}, \text{кДж / кг}$	$i_{\text{нг}}, \text{кДж / кг}$
	$p = 1,0 \text{ МПа}$	$p = 1,5 \text{ МПа}$	$p = 2,0 \text{ МПа}$
50	210,1	210,6	211,0
60	251,9	252,3	252,7
70	293,8	294,2	294,6
80	335,7	336,1	336,5
90	377,7	378,0	378,4
100	419,7	420,1	420,5
110	461,9	462,3	462,7
120	504,3	504,6	505,0
130	546,8	547,1	547,5
140	589,5	589,8	590,2
150	632,5	632,8	633,1

4.4 Расчёт теплообмена в топке

Проводим поверочный тепловой расчёт топки, заключающийся в определении температуры газов на выходе из топки для существующей конструкции топки котла.

Из чертежа котла-аналога и технического описания принимаем характеристики топочной камеры.

Температура газов на выходе из топки определяется по формуле:

$$g_T'' = \frac{T_a}{M \left[\frac{5,67 \cdot \psi_{cp} \cdot F_T \cdot \xi_T \cdot (T_a)^3}{10^{11} \cdot \varphi \cdot B_p \cdot V \cdot c_{cp}} \right]^{0,6} + 1} - 273 \quad (4.15)$$

Рассчитываем параметры, входящие в формулу для расчёта температуры на выходе из топки. Некоторые из этих параметров зависят от температуры на выходе из топки. Поэтому в начале расчёта задаёмся температурой продуктов сгорания на выходе из топки g_T'' , а затем рассчитываем её значение. Принятое и расчётное значение g_T'' не должны отличаться более чем на ± 100 °С.

Адиабатическая температура горения g_a , °С, определяется по полезному тепловыделению в топке Q_T , кДж/м³, при избытке воздуха на выходе из топки α_T .

Полезное тепловыделение в топке (для расчёта g_a и $V \cdot c_{cp}$) складывается из располагаемой теплоты топлива за вычетом топочных потерь и теплоты воздуха:

$$Q_T = Q_p \cdot \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_B, \quad (4.16)$$

где q_4, q_6 – потери тепла от физической неполноты сгорания топлива и с теплом шлака; Q_B – теплота, вносимая воздухом в топку, кДж/м³, определяется по соотношению:

$$Q_B = I_{xв}^0 \alpha_T. \quad (4.17)$$

При сжигании газа потери тепла от физической неполноты сгорания топлива и с теплом шлака равны 0.

По вычисленному значению Q_T по таблице 4.6 линейной интерполяцией определяется g_a .

Адиабатическая температура горения определяется по формуле:

$$T_a = g_a + 273. \quad (4.18)$$

Предварительно принимает температуру газов на выходе из топки $g_T'' = 1100 - 1200$ °С.

Среднюю суммарную теплоёмкость продуктов сгорания $V \cdot c_{cp}$ определяем по формуле:

$$V \cdot c_{cp} = \frac{Q_T - I''_T}{g_a - g''_T} \quad (4.19)$$

где g_a – адиабатическая температура горения, соответствует условию, что всё полезное тепловыделение воспринимается продуктами сгорания (отсутствуют тепловые потери топки); I''_T – энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки, соответствующая принятой выше температуре, равной g''_T , определяется из таблицы 4.6.

Определение параметра M

Параметр M определяется в зависимости от относительного положения максимума температуры пламени по высоте топки X_T . Он зависит от вида топлива и способа его сжигания. Для случая сжигания газа параметр M определяется по формуле:

$$M = 0,54 - 0,2X_T, \quad (4.20)$$

где X_T – отношение высоты расположения осей горелок (от пола топки) к общей высоте (от пола топки до середины выходного окна из топки).

Коэффициент теплового излучения топочной камеры

Коэффициент теплового излучения топочной камеры ξ_T введен вместо применявшейся ранее степени черноты топки ε_T . Он является радиационной характеристикой излучающего тела и зависит только от его физических свойств и температуры.

Для определения температуры газов на выходе из топки g''_T рассчитывают коэффициент теплового излучения топки ξ_T , который определяется коэффициентом излучения газового факела ξ_ϕ , заполняющего топочный объём, и тепловой эффективностью экранных поверхностей ψ_{cp} .

Поглощательная способность рассчитывается по формуле:

$$\xi_T = \frac{\xi_\phi}{\xi_\phi + (1 - \xi_\phi) \cdot \psi_{cp}} \quad (4.21)$$

Коэффициент излучения газового факела ξ_ϕ зависит от температуры g''_T газов на выходе из топки (от абсолютной температуры газов на выходе из топки). Коэффициент теплового излучения газового факела определяется по формуле:

$$\xi_\phi = m\xi_{св} + (1 - m)\xi_T, \quad (4.22)$$

где $\xi_{св}, \xi_T$ – коэффициенты теплового излучения светящейся части факела и

несветящихся газов; m – коэффициент, определяющий долю топочного объёма, заполненного светящимся пламенем, для газа $m = 0,1$; для мазута $m = 0,55$.

Коэффициент ξ_{Γ} находим по соотношению:

$$\xi_{\Gamma} = 1 - e^{-kpS}, \quad (4.23)$$

где kpS – оптическая толщина поглощения топочной среды; $k = k_{\Gamma}r_{\Pi}$ – коэффициент ослабления (поглощения) лучей топочной средой; p – давление газов в топочной камере, для топок, работающих под разрежением и с наддувом не более 5 кПа, принимают $p = 0,1$ МПа; S – эффективная толщина излучающего слоя продуктов сгорания, рассчитывается по формуле:

$$S = 3,6 \frac{V_{\Gamma}}{F_{\text{ст}}}, \quad (4.24)$$

где $F_{\text{ст}}$ – полная поверхность окружающих стен топки, определяется по конструктивным данным котла.

Определяется коэффициент ослабления лучей трехатомными газами по формуле:

$$k = k_{\Gamma}k_{\Pi} = \left(\frac{7,8 + 16r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_{\Pi}S}} + 1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T''_{\Gamma}}{1000} \right) r_{\Pi}, \quad (4.25)$$

где T''_{Γ} – абсолютная температура газов на выходе из топки; $r_{\Pi} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}$ – объёмная доля трехатомных газов.

В формуле (4.23) полагается, что:

$$k = k_{\Gamma}k_{\Pi} + k_{\text{C}}, \quad (4.26)$$

где k_{C} – коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами, образующимися в ядре факела при сжигании газа, который определяется по соотношению:

$$k_{\text{C}} = 0,3(2 - \alpha''_{\Gamma})(1,6 \cdot 10^{-3} \cdot T''_{\Gamma} - 0,5) \frac{C^{\text{P}}}{H^{\text{P}}}, \quad (4.27)$$

где $C^{\text{P}}/H^{\text{P}}$ – соотношение между содержанием углерода и водорода в рабочей массе топлива, определяется по соотношению:

$$\frac{C^P}{H^P} = 0,12 \sum \frac{m}{n} C_m H_n \quad (4.28)$$

Коэффициент тепловой эффективности экранов топки определяется как произведение условного коэффициента загрязнения на угловой коэффициент экрана:

$$\psi = \xi x, \quad (4.29)$$

где ξ – угловой коэффициент загрязнения поверхности нагрева (для природного газа – 0,65; для мазута – 0,55; для твердого топлива, сжигаемого в слое, – 0,6); x – угловой коэффициент экрана, принимается равным 1.

После проведения расчётов полученное значение ϑ_T'' сравниваем с предварительно принятым значением $\vartheta_T'' = 1100 - 1200^\circ\text{C}$. Расхождение не должно превышать $\pm 100^\circ\text{C}$. Если проверка расхождения не сходится, требуется произвести перерасчёт температуры.

Рассчитываем энтальпию газов на выходе из топки по полученной температуре из таблицы 4.6.

Количество тепла, воспринятого в топке, определяем по формуле:

$$Q_l^T = \varphi(Q_T - I_T'') \quad (4.30)$$

Средняя тепловая нагрузка лучевоспринимающей поверхности нагрева определяется по формуле:

$$q_l = \frac{B_p \cdot Q_l^T}{F_{\text{луч}}} \quad (4.31)$$

где $F_{\text{луч}}$ – лучевоспринимающая поверхность нагрева.

Расчётное тепловое напряжение топочного объёма рассчитываем по формуле:

$$q_V^p = \frac{B_p \cdot Q_p^p}{V_T} \quad (4.32)$$

Тепловой расчёт топки завершен.

4.5 Тепловой расчёт 1-го конвективного пучка

Поверочный тепловой расчёт конвективного пучка сводится к определению количества тепла, воспринимаемого пучком. Количество теплоты, воспринимаемое конвективным пучком, рассчитывается по уравнению теплового баланса и по уравнению теплопередачи. Результаты расчётов сравниваются, если расхождение результатов расчётов по уравнению теплового баланса и по уравнению теплопередачи не превышает $\pm 5\%$, то расчёт считается выполненным.

Из справочной литературы и с чертежа котла-аналога в таблицу 4.10 заносятся основные конструктивные характеристики газохода.

Таблица 4.10 – Основные характеристики конвективных пучков котла

Параметры	Для котлов ДЕ-ХХ-14ГМ	
	Первый КП	Второй КП
Поверхность нагрева первого газохода, м ²	F_1	F_2
Число труб по ходу газов, шт.	n_1	n_2
Живое сечение для прохода газов, м ²	f_{z1}	f_{z2}
Наружный диаметр труб, мм	d_1	d_2
Продольный шаг труб КП, мм	$S_{1.1}$	$S_{1.2}$
Поперечный шаг труб КП, мм	$S_{2.1}$	$S_{2.2}$
Расположение труб	–	–

Из расчёта топки известными являются температура ϑ_T и энтальпия газов I_T перед первым конвективным пучком.

Температура обогреваемой среды постоянна и равна температуре кипения при давлении в барабане котла.

При расчёте конвективной поверхности котла предварительно принимают два значения температуры на выходе из газохода. При расчёте первого конвективного пучка принимаем для газохода температуру газов на выходе из него – $\vartheta_{КП1}'' = 600...800^\circ\text{C}$ и $\vartheta_{КП2}'' = 300...500^\circ\text{C}$. При расчёте единственного конвективного пучка принимаем для газохода температуру газов на выходе из него – $\vartheta_{КП1}'' = 200...300^\circ\text{C}$ и $\vartheta_{КП2}'' = 150...250^\circ\text{C}$.

После выбора предварительных температур два варианта расчёта ведем параллельно. После проведения расчётов действительную температуру продуктов сгорания за газоходом определяем по уравнению теплового баланса и теплопередачи при двух ранее принятых температурах или по формуле.

По таблице 4.6 определяем энтальпии, соответствующие принятым ранее температурам.

Теплота, отданная дымовыми газами в 1-м конвективном пучке, определяется по соотношению:

$$Q_{\delta 1} = \varphi \left(I'_T - I''_{КП1} + \frac{\Delta\alpha}{2} I_{ПРС}^0 \right) \quad (4.33)$$

$$Q_{\delta 2} = \varphi \left(I'_T - I''_{КП2} + \frac{\Delta\alpha}{2} I_{ПРС}^0 \right),$$

где φ – коэффициент сохранения теплоты; $\Delta\alpha$ – присосы воздуха в поверхности; $I_{ПРС}^0$ – энтальпия присасываемого воздуха, определяется при температуре холодного воздуха, равного 30 °С. $I_{ПРС}^0 = 388,97 \text{ кДж} / \text{м}^3$.

Температура насыщения воды при давлении в барабане котла определяется по таблице 4.8.

Температурный напор в пароперегревателе определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{м}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{м}}}; \quad (4.34)$$

$$\Delta t_{\delta} = g_T'' - t_n; \quad \Delta t_{м1} = g''_{КП1} - t_n; \quad \Delta t_{м2} = g''_{КП2} - t_n;$$

Средняя температура газов рассчитывается по формуле:

$$g_{cp1} = \frac{g_T'' + g''_{КП1}}{2}; \quad g_{cp2} = \frac{g_T'' + g''_{КП2}}{2}; \quad (4.35)$$

Скорость газов определяется по формуле:

$$\omega_{Г1} = \frac{B_p \cdot V_{Г} \cdot (g_{cp1} + 273)}{f_{z1} \cdot 273}; \quad \omega_{Г2} = \frac{B_p \cdot V_{Г} \cdot (g_{cp2} + 273)}{f_{z1} \cdot 273}; \quad (4.36)$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией от дымовых газов к стенке для коридорных гладкотрубных пучков определяется по рисункам 4.2–4.3 и формуле:

$$\alpha_k = \alpha_n \cdot C_z \cdot C_s \cdot C_{\phi}, \quad (4.37)$$

где α_n – коэффициент теплоотдачи конвекцией, определяется по рисунку 4.3.

Определяем относительные продольные и поперечные шаги по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{d_n}; \sigma_2 = \frac{S_2}{d_n}; \quad (4.38)$$

По этим значениям определяем следующие поправки:

C_z – поправка на число поперечных рядов труб по ходу газов, принимаем равным 1.

C_s – поправка на компоновку пучка, принимаем равным 1.

Поправка на влияние физических параметров среды C_ϕ определяется по доле водяных паров и средней температуре газов по рисунку 4.2.

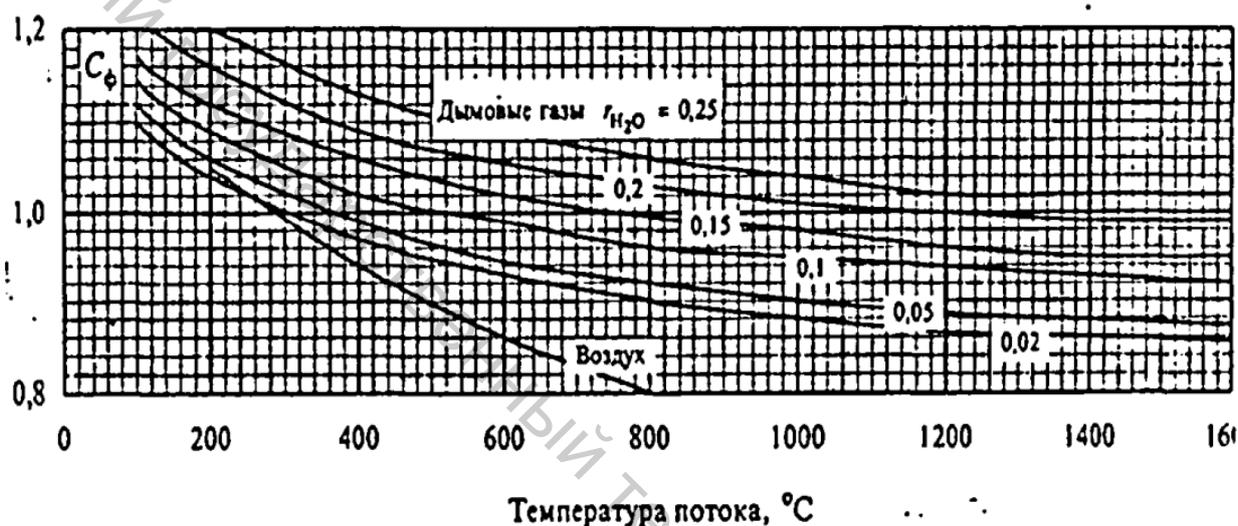


Рисунок 4.2 – Номограмма для определения поправки на влияние физических параметров среды C_ϕ

Определяем эффективную толщину излучающего слоя по формуле:

$$S = 0,9d_n \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 S_2}{d_n^2} - 1 \right) \quad (4.39)$$

Коэффициент ослабления лучей трехатомными газами.

Для нахождения этого коэффициента рассчитывается величина:

$$p_n S = r_n p S \quad (4.40)$$

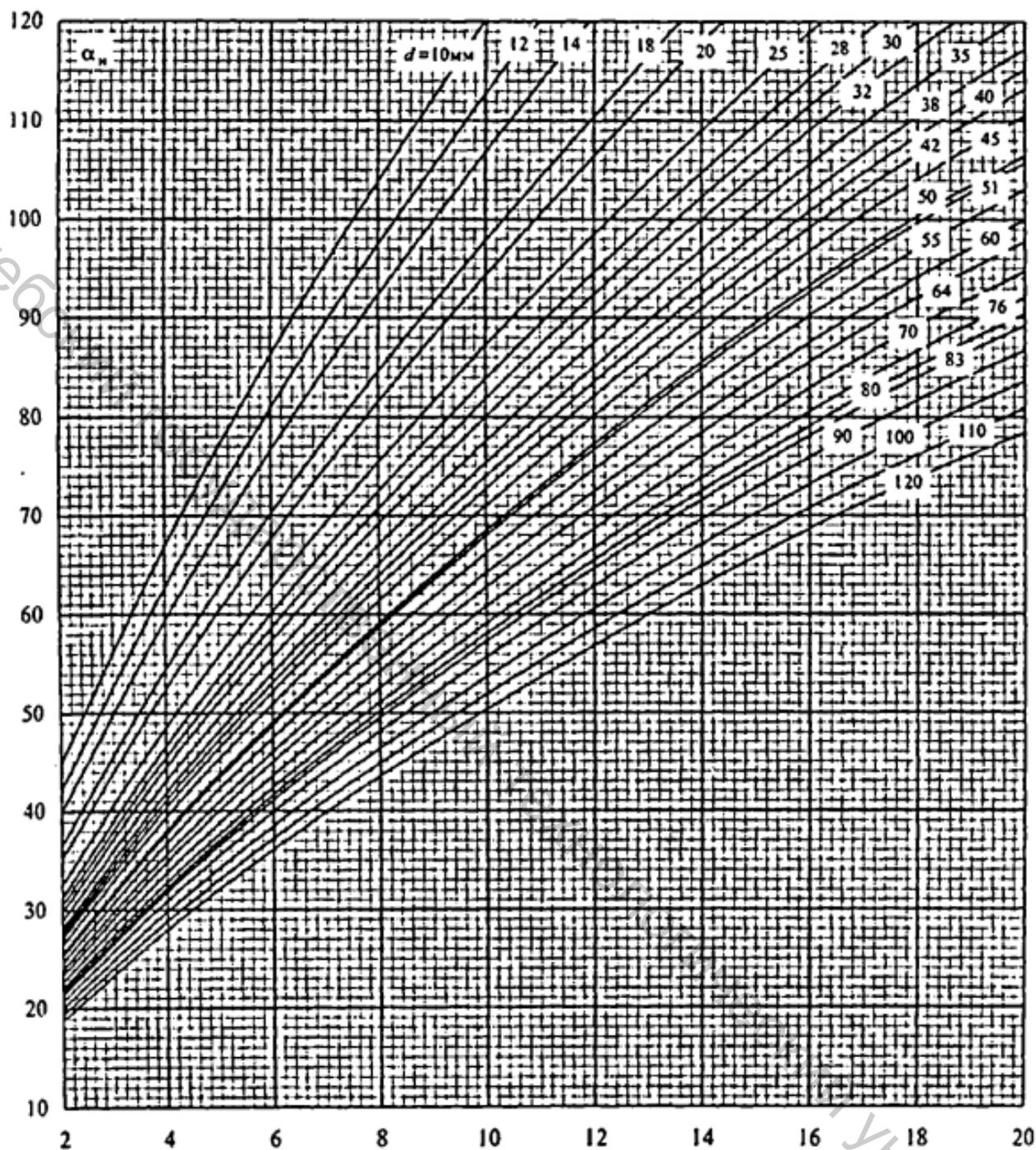


Рисунок 4.3 – Номограмма для коэффициента теплоотдачи конвекцией при поперечном омывании коридорных гладкотрубных пучков и ширм

По рисунку 4.4 определяется коэффициент ослабления лучей трехатомными газами при температуре среды на выходе из поверхности нагрева.

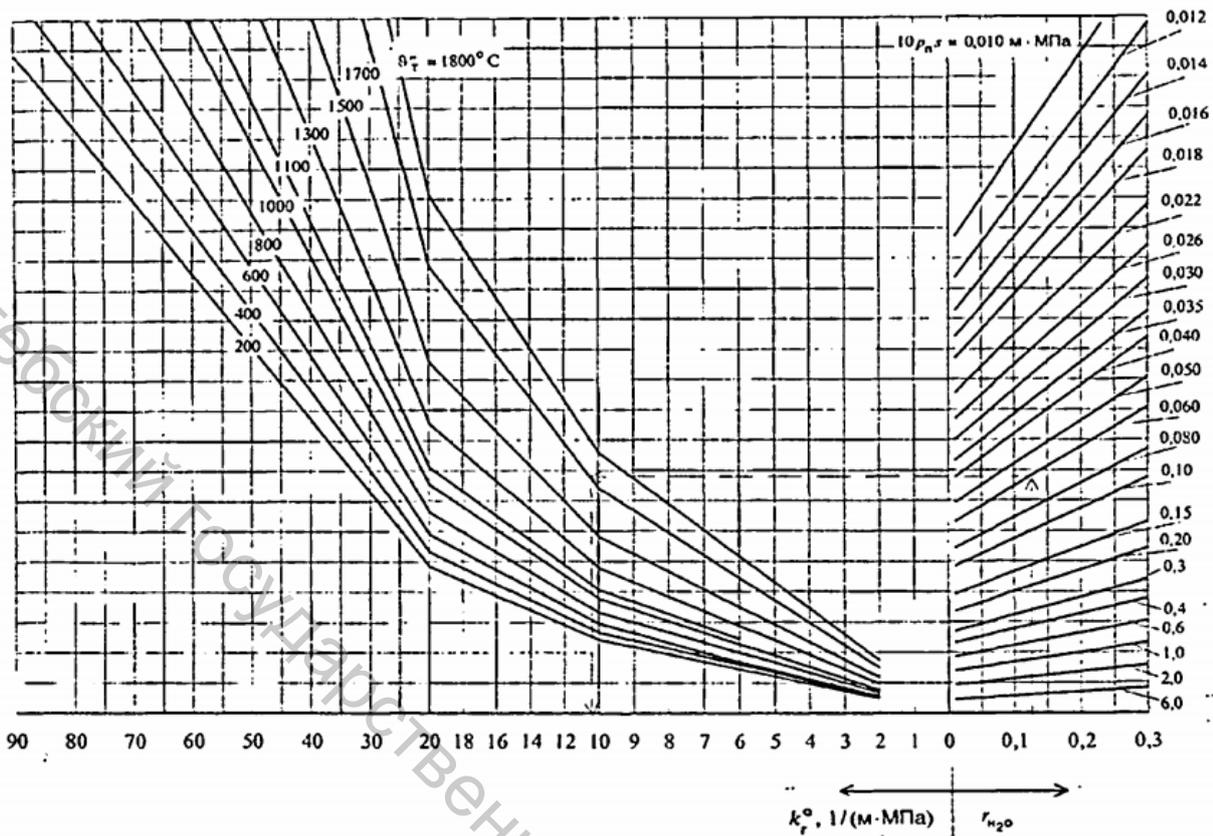


Рисунок 4.4 – Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания

Коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания определяется по формуле:

$$\alpha_l = \alpha_n \cdot \xi, \quad (4.42)$$

где α_n – коэффициент теплоотдачи излучением, находится по рисунку 4.5.

Определяем коэффициент теплопередачи по формуле:

$$k = 0,85 \cdot (\alpha_k + \alpha_l). \quad (4.43)$$

Тепло, воспринятое первым конвективным пучком, по условию теплопередачи определяется по формуле:

$$Q_T = \frac{k \cdot F \cdot \Delta t}{B_p \cdot 10^3} \quad (4.44)$$

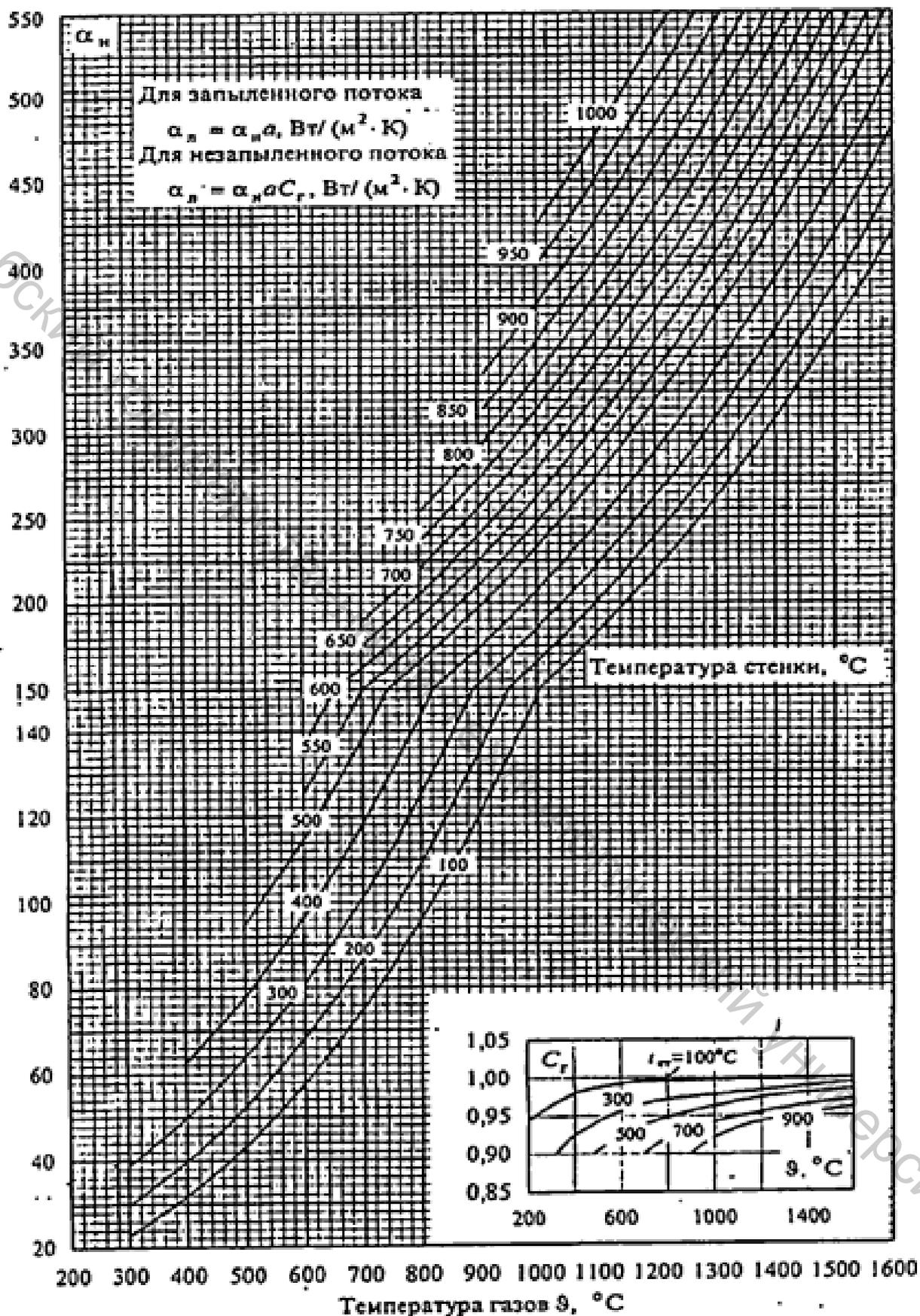


Рисунок 4.5 – Коэффициент теплоотдачи излучением

Расчётное значение искомой конечной температуры определяется по соотношению:

$$g''_p = \frac{g''_{кп2} + (g''_{кп2} - g''_{кп1})(Q_6 - Q_T)_2}{(Q_6 - Q_T)_1 - (Q_6 - Q_T)_2} \quad (4.45)$$

Эту температуру принимаем за температуру газов на выходе из первого конвективного пучка.

Энтальпия продуктов сгорания на выходе из первого конвективного пучка рассчитывается по температуре g''_p из таблицы 4.6.

Тепловосприятие первого конвективного пучка по балансу рассчитывается по формуле (4.33) для расчётной температуры и энтальпии продуктов сгорания на выходе из первого конвективного пучка.

4.6 Тепловой расчёт 2-го конвективного пучка

Для второго конвективного пучка аналогично предыдущему расчёту принимаем на выходе из него температуру $g''_{кп1} = 200...300^\circ\text{C}$ и $g''_{кп2} = 150...250^\circ\text{C}$. При расчёте единственного конвективного пучка принимаем для газохода температуру газов на выходе из него – $g''_{кп1} = 200...300^\circ\text{C}$ и $g''_{кп2} = 150...250^\circ\text{C}$.

После выбора предварительных температур два варианта расчёта ведем параллельно.

По таблице 4.6 определяем энтальпии, соответствующие принятым ранее температурам.

Теплота, отданная дымовыми газами в 2-м конвективном пучке, определяется по соотношению:

$$\begin{aligned} Q_{61} &= \varphi \left(I'_{кп1} - I''_{кп1} + \frac{\Delta\alpha}{2} I_{прс}^0 \right) \\ Q_{62} &= \varphi \left(I'_{кп1} - I''_{кп2} + \frac{\Delta\alpha}{2} I_{прс}^0 \right), \end{aligned} \quad (4.46)$$

где φ – коэффициент сохранения теплоты; $\Delta\alpha$ – присосы воздуха в поверхности; $I_{прс}^0$ – энтальпия присасываемого воздуха, определяется при температуре холодного воздуха, равного 30°C . $I_{прс}^0 = 388,97 \text{ кДж} / \text{м}^3$.

Температура насыщения воды при давлении в барабане котла определяется по таблице 4.8.

Температурный напор определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_{\bar{m}}}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{o}}}{\Delta t_{\bar{m}}}}; \quad (4.47)$$

$$\Delta t_{\bar{o}} = g_{\text{КП1}}' - t_n; \quad \Delta t_{\bar{m1}} = g_{\text{КП1}}'' - t_n; \quad \Delta t_{\bar{m2}} = g_{\text{КП2}}'' - t_n;$$

Средняя температура газов рассчитывается по формуле:

$$g_{\text{cp1}} = \frac{g_{\text{КП1}}' + g_{\text{КП1}}''}{2}; \quad g_{\text{cp2}} = \frac{g_{\text{КП1}}' + g_{\text{КП2}}''}{2}; \quad (4.48)$$

Скорость газов определяется по формуле:

$$\omega_{\Gamma1} = \frac{B_p \cdot V_{\Gamma} \cdot (g_{\text{cp1}} + 273)}{f_{\varepsilon1} \cdot 273}; \quad \omega_{\Gamma2} = \frac{B_p \cdot V_{\Gamma} \cdot (g_{\text{cp2}} + 273)}{f_{\varepsilon1} \cdot 273}; \quad (4.49)$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией от дымовых газов к стенке для коридорных гладкотрубных пучков определяется по рисункам 4.2–4.3 и формуле (4.37).

Определяем относительные продольные и поперечные шаги по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{d_n}; \quad \sigma_2 = \frac{S_2}{d_n}; \quad (4.50)$$

По этим значениям определяем следующие поправки:

C_z – поправка на число поперечных рядов труб по ходу газов, принимаем равным 1.

C_s – поправка на компоновку пучка, принимаем равным 1.

Поправка на влияние физических параметров среды C_{Φ} определяется по доле водяных паров и средней температуре газов по рисунку 4.2.

Определяем коэффициент теплопередачи по формуле:

$$k = 0,85 \cdot (\alpha_{\kappa} + \alpha_{\lambda}). \quad (4.51)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением, для трубного пучка, расположенного за пучком, равен нулю.

Тепло, воспринятое первым конвективным пучком, по условию теплопередачи определяется по формуле:

$$Q_{\Gamma} = \frac{k \cdot F \cdot \Delta t}{B_p \cdot 10^3} \quad (4.52)$$

Расчётное значение искомой конечной температуры определяется по соотношению:

$$g''_p = \frac{g''_{кп2} + (g''_{кп2} - g''_{кп1})(Q_6 - Q_T)_2}{(Q_6 - Q_T)_1 - (Q_6 - Q_T)_2} \quad (4.53)$$

Эту температуру принимаем за температуру газов на выходе из второго конвективного пучка.

Энтальпия продуктов сгорания на выходе из второго конвективного пучка рассчитывается по температуре g''_p из таблицы 4.6.

Тепловосприятие второго конвективного пучка по балансу рассчитывается по формуле (4.46) для расчётной температуры и энтальпии продуктов сгорания на выходе из второго конвективного пучка.

4.7 Тепловой расчёт водяного экономайзера

При поверочном расчёте чугунного водяного экономайзера температура газов и энтальпия продуктов сгорания на входе принимается из теплового расчёта второго конвективного пучка (если конвективный пучок один, то данные выбираются из расчёта первого конвективного пучка).

Температура газов и энтальпия на выходе из водяного экономайзера равна температуре уходящих газов, которой мы задались при расчёте баланса котла.

Цель расчёта – определение поверхности нагрева экономайзера F_g . Экономайзер komponуется из отдельных ребристых чугунных труб ВТИ длиной 2 метра, с поверхностью нагрева с газовой стороны $f_{эз} = 2,95 м^2$ и живым сечением для прохода газов $f_{эпр} = 0,12 м^2$.

Проходное сечение для газового потока можно определить по формуле:

$$F_{эж} = n f_{эпр}, \quad (4.54)$$

где n – число труб в ряду экономайзера

Принимаем температуру питательной воды на входе в водяной экономайзер – $100^{\circ}C$ и энтальпия питательной воды $i_{нг} = 420$ кДж/кг.

Теплота, воспринятая водой в водяном экономайзере, определяется по формуле:

$$Q_6 = \varphi \cdot (I'_{кп2} - I_{yx} + \frac{\Delta\alpha_{эж}}{2} \cdot I_{прс}^0) \quad (4.55)$$

Энтальпия на выходе из экономайзера:

$$h''_{\text{вз}} = i_{\text{нв}} + \frac{Q_{\text{б}} \cdot B_p}{D_{\text{пр}} + D_{\text{нп}}} \quad (4.56)$$

По энтальпии определяем температуру воды на выходе из экономайзера по таблице 4.9.

На рисунке 4.6 приведена схема водяного экономайзера.

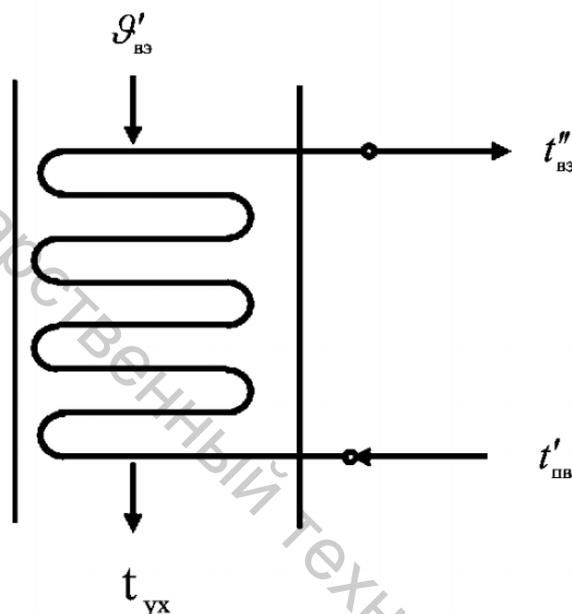


Рисунок 4.6 – Расчётная схема водяного экономайзера второй ступени

Температурный напор в водяном экономайзере определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}; \quad (4.57)$$

$$\Delta t_{\text{б}} = g'_{\text{вз}2} - t''_{\text{вз}}; \quad \Delta t_{\text{м}} = t_{\text{yx}} - t'_{\text{нв}};$$

Средняя температура воды рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{ср.в}} = (t'_{\text{нв}} + t''_{\text{вз}}) / 2 \quad (4.58)$$

Средняя температура поверхности стенки определяется по формуле:

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{ср.в}} + 25 \quad (4.59)$$

Средняя температура продуктов сгорания рассчитывается по формуле:

$$g_{cp} = \frac{g'_{вз} + t_{yx}}{2} \quad (4.60)$$

Скорость газов определяется по формуле:

$$\omega_{Г} = \frac{B_p \cdot V_{Г} \cdot (g_{cp} + 273)}{f_2 \cdot 273}; \quad (4.61)$$

Коэффициент теплопередачи определяется по рисунку 4.7. Коэффициент теплопередачи конвекцией равен 20,5 Вт/(м²К). Коэффициент теплоотдачи для газа равен 1. Переменная $C_T = 1,05$.

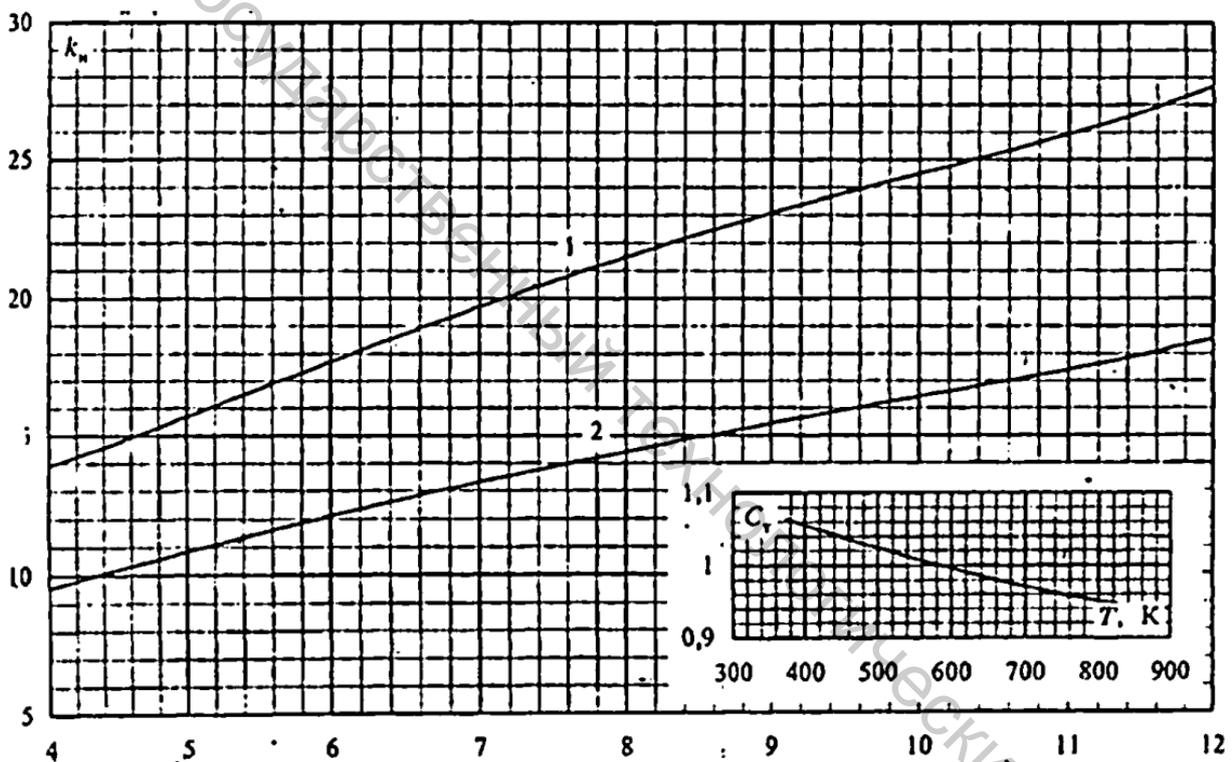


Рисунок 4.7 – Коэффициент теплоотдачи чугунных ребристых экономайзеров: 1 – экономайзер ВТИ и экономайзер из труб с дополнительным продольным оребрением; 2 – экономайзер ЦККБ

Тепло, воспринятое водяным экономайзером, по условию теплопередачи определяется по формуле:

$$Q_B = Q_T = \frac{k \cdot F \cdot \Delta t}{B_p \cdot 10^3} \quad (4.62)$$

Определим площадь поверхности водяного экономайзера:

$$F = \frac{Q_{\delta} \cdot 10^3 \cdot B_p}{k \cdot \Delta t} \quad (4.63)$$

Число труб водяного экономайзера рассчитывается как отношение площади поверхности к площади поверхности нагрева с газовой стороны. Это отношение принимается кратным пяти. Количество вертикальных рядов находится как количество труб, разделенное на пять.

4.8 Компоновка водяного экономайзера

Водяной экономайзер проектируем двухколонный в блочной облицовке. Первая колонка по ходу газов включает в себя три пакета. Первый пакет состоит из четырёх рядов труб, второй – из восьми, третий – четырёх рядов труб. Между пакетами устанавливаются обдувочные аппараты.

Вторая колонка включает два пакета: первый пакет из четырёх рядов труб и второй – из трёх рядов труб. Во второй колонке устанавливается один обдувочный аппарат между пакетами. Продукты сгорания после первой колонки перебрасываются в верхнюю часть второй колонки. По второй колонке они также движутся сверху вниз.

4.9 Расчёт невязки баланса котла

Невязка баланса котла рассчитывается по формуле:

$$\Delta Q = Q_p^p \cdot \eta_{к.а.} - (Q_T + Q_{КП1} + Q_{КП2} + Q_{ВЭ}), \quad (4.64)$$

где $Q_T, Q_{КП1}, Q_{КП2}, Q_{ВЭ}$ – количество тепла, воспринятое лучевоспринимающими поверхностями топки, котельными пучками, водяным экономайзером. В формулу подставляются значения, определенные из уравнений теплового баланса.

Невязка теплового баланса котла определяется по соотношению:

$$\delta Q = \frac{\Delta Q}{Q_p^p} \cdot 100 < 0,5\% \quad (4.65)$$

Невязка теплового баланса котла не должна превышать 0,5 %, иначе расчёт котельного агрегата считается неверным. Если невязка не превышает 0,5 %, тепловой расчёт котельного агрегата считается законченным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное издание предназначено для самостоятельного изучения конструктивных особенностей парового котла типа ДЕ при выполнении курсового проекта по курсу «Котельные установки промышленных предприятий».

Приведена методика теплового расчёта котельного агрегата, работающего на газообразном и жидком топливах.

Тепловой расчёт котельного агрегата заканчивается расчётом невязки баланса, которая не должна превышать 0,5 %.

В результате теплового расчёта должны быть определены температуры продуктов сгорания на выходе из топки и за каждой конвективной поверхностью нагрева, определена поверхность нагрева водяного экономайзера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. – 472 с.
2. Мокшарин, А. В. Анализ перспектив развития отечественной теплоэнергетики / А. В. Мокшарин [и др.]. – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2002. – 260 с.
3. Кудинов, А. А. Энергосбережение в теплотехнике и теплотехнологиях / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина. – Москва : Машиностроение, 2011. – 374 с.
4. Делягин, Т. Н. Теплогенерирующие установки / Т. Н. Делягин [и др.]. – Москва : Бастет, 2010. – 425 с.
5. Ковалёв, А. П. Парогенераторы / А. П. Ковалёв [и др.]. – Москва : Энергия, 1966. – 448 с.
6. Новопашина, Н. А. Газопотребление и газораспределение: Ч. 1. Использование газов / Н. А. Новопашина, Е. Б. Филатова. – Самара : Самар. гос. арх.-строит. ун-т, 2011. – 178 с.
7. Новопашина, Н. А. Газопотребление и газораспределение: Ч. 2. Надёжность систем газоснабжения / Н. А. Новопашина, Е. Б. Филатова. – Самара : Самар. гос. арх.-строит. ун-т, 2011. – 152 с.
8. Роддатис, К. Ф. Справочник по котельным установкам малой производительности / К. Ф. Роддатис, А. Н. Полторецкий. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.
9. Трухний, А. Д. Основы современной энергетики. Ч. 1. Современная теплоэнергетика / А. Д. Трухний, А. А. Макаров, В. В. Клименко. – Москва : Издательство МЭИ, 2002. – 368 с.
10. Сидельский, Л. И. Котельные установки промышленных предприятий / Л. И. Сидельский. – Москва : Бастет, 2009. – 527 с.
11. Зыков, А. К. Паровые и водогрейные котлы / А. К. Зыков. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 128 с.
12. Липов, Ю. М. Компонировка и тепловой расчет парового котла / Ю. М. Липов, Ю. Ф. Самойлов, Т. В. Виленский. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
13. Копылов, А. С. Водоподготовка в энергетике / А. С. Копылов, В. М. Лавыгин, В. Ф. Очков. – Москва : Изд. МЭИ, 2006. – 310 с.
14. Копылов, А. С. Процессы и аппараты передовых технологий водоподготовки и их проектировочные расчёты / А. С. Копылов, В. Ф. Очков, Ю. В. Чудова. – Москва : Изд. МЭИ, 2009. – 221 с.
15. Минкина, С. А. Водоподготовка котельных установок. Расчёт и проектирование оборудования / С. А. Минкина, А. В. Евграфов. – Самара : Самар. гос. арх.-строит. ун-т, 2010. – 126 с.
16. Копылов, А. С. Водоподготовка в энергетике / А. С. Копылов, В. М. Лавыгин, В. Ф. Очков. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2006. – 309 с.
17. Ахмедов, Р. Б. Рациональное использование газа в энергетических установках / Р. Б. Ахмедов [и др.]. – Ленинград : Недра, 1990. – 423 с.

18. Белосельский, Б. С. Технология топлива и энергетических масел / Б. С. Белосельский. – Москва : Издательство МЭИ, 2006. – 348 с.
19. Кудинов, А. А. Краткий курс теории горения органических топлив / А. А. Кудинов. – Самара : Самар. гос. техн., ун-т, 2004. – 108 с.
20. Кудинов, А. А. Горение органического топлива / А. А. Кудинов. – Самара Самар. гос. Техн., ун-т, 2013. – 250 с.
21. Александров, В. Г. Паровые котлы средней и малой мощности / В. Г. Александров. – Ленинградское отделение : Энергия, 1972. – 200 с.
22. Липов, Ю. М. Котельные установки и парогенераторы / Ю. М. Липов, Ю. М. Третьяков. – Москва : Регулярная и хаотическая динамика, 2003. – 592 с.
23. Резников, М. И. Котельные установки электростанций / М. И. Резников, Ю. М. Липов. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.
24. Соколов, Б. А. Котельные установки и их эксплуатация / Б. А. Соколов. – Москва : Издательский центр «Академия», 2007. – 432 с.
25. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание третье, перераб. и доп. – Санкт-Петербург : НПО ЦКТИ, 1998. – 257 с.
26. Салов, А. Г. Компоновка и тепловой расчёт поверхности нагрева барабанного котла ТП-230 / А. Г. Салов. – Самара : Самар., гос. техн, ун-т, 2012. – 71 с.
27. Тепловой расчёт котельных агрегатов (Нормативный метод). Издание второе, перераб. – Москва : Энергия, 1973. – 295 с.
28. Быстрицкий, Г. Ф. Энергосиловое оборудование промышленных предприятий / Г. Ф. Быстрицкий. – Москва : Издательский центр «Академия», 2003. – 304 с.

ИНФОРМАЦИЯ О ДОСТУПЕ К ВИРТУАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ УО «ВГТУ» И ЭЛЕКТРОННЫМ РЕСУРСАМ КАФЕДРЫ ТИОМП

Для удобства работы и развития навыков в работе с удаленными ресурсами студентам рекомендуется использовать материалы по учебной дисциплине, размещенные в виртуальной образовательной среде УО «ВГТУ» (sdo.vstu.by) и на сайте кафедры ТиОМП.

Учебное издание

Котельные установки промышленных предприятий

Методические указания по выполнению курсового проекта

Составители:

Жерносек Сергей Васильевич
Марущак Алексей Сергеевич
Мовсесян Владимир Юрьевич

Редактор *Т. А. Осипова*

Корректор *Т.А. Осипова*

Компьютерная верстка *О.С. Герасимова*

Подписано к печати 05.05.2021. Формат 60x90^{1/16}. Усл. печ. листов 3,8.
Уч.-изд. листов 4,8. Тираж 60 экз. Заказ № 108.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.