

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ «БЕЛЭНЕРГО»  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «МИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ»

СОГЛАСОВАНО



Директор УО «МГЭК»

Новиков А.А.

2024 г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
КУРСОВОГО ПРОЕКТА  
ПО УЧЕБНОМУ ПРЕДМЕТУ  
«КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СТАНЦИЙ»**

Для обучающихся дневного и заочного отделений.

Специальность:

5-04-0712-05 «Техническая эксплуатация оборудования тепловых  
электрических станций»

2-43 01 04 «Тепловые электрические станции»

Минск 2024 год

Разработал:

 / А.Л. Клячин /

Рассмотрено и рекомендовано к утверждению на заседании предметной (цикловой) комиссии специальных теплотехнических предметов:

Протокол № 7 «15» февраля 2024 года.

Председатель предметной (цикловой) комиссии специальных теплотехнических предметов \_\_\_\_\_ / Ю.П. Плеско /

УО "МГЭК"

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Данные методические рекомендации для выполнения курсового проекта по учебным предметам «Котельные установки ТЭС» и «Котельные установки тепловых электрических станций» разработаны для обучающихся дневной и заочной формы обучения специальности 2-43 01 04 «Тепловые электрические станции» и 5-04-0712-05 «Техническая эксплуатация оборудования тепловых электрических станций».

Целью курсового проекта по учебному предмету «Котельные установки тепловых электрических станций» является практическое закрепление знаний по тепловому расчёту котлоагрегатов тепловых электрических станций, приобретение навыков выбора оптимальных параметров, компоновки поверхностей нагрева, определение необходимых расчётных параметров каждой поверхности нагрева для заданного вида топлива и исходных условий, включая тип и марку котельной установки.

Задачей курсового проекта является выполнение теплового расчёта котлоагрегата в соответствии с заданием на курсовое проектирование.

Тип котла для курсового проектирования обучающийся получает в индивидуальном бланке задания у преподавателя. Руководитель проекта выдаёт обучающемуся бланк задания с исходными данными, чертежи и описание котла (в электронном и/или бумажном виде). При проектировании рекомендуется использовать заводские копии чертежей, атласы и имеющиеся в литературе описания и примеры компоновок котлов.

Все расчеты в курсовом проекте необходимо выполнять в единицах СИ (ГОСТ 8.417-81). Поскольку существующие нормативные материалы по расчету, проектированию и эксплуатации паровых котлов пока еще базируются на системе единиц МКГСС и тепловых единицах, основанных на калории.

Оформление пояснительной записки и графической части курсового проекта должно осуществляться в соответствии с действующими «Методическими указаниями для оформления дипломного и курсового проектирования на момент выполнения проекта».

Пояснительная записка курсового проекта выполняется в виде пояснительной записки с расчётами на стандартной канцелярской бумаге формата А4 с рамкой («штампиком») в соответствии с ГОСТ 2.104-68 «Основные надписи». Все формулы в пояснительной записке нумеруются сквозной нумерацией с правой стороны листа, номер формулы берётся в скобки, либо если расчёт проводится в таблице – снизу формулы.

Построение Н-Θ диаграммы осуществляется на миллиметровке формата А3 или А2 в зависимости от выбранного масштаба так же с использованием оформления в соответствии с ГОСТ 2.104-68.

Графическая часть проекта выполняется на формате А1 и включает в себя чертёж поперечного разреза котлоагрегата. Условные обозначения должны соответствовать ГОСТ 21.403-80.

Для курсового проектирования обучающимся предлагаются котлы барабанные различной производительности на докритические параметры, работающие на твердом, жидком и газообразном топливе. Это может быть любой котел, установленный на электростанции, однако предпочтение отдается тем типам котлов, которые эксплуатируются в Республике Беларусь.

В данных рекомендациях рассматриваются распространённые расчёты котлоагрегатов на различных видах топлив и компоновок поверхностей нагрева. В случае затруднения или возникающих сомнениях при определении каких-либо параметров как расчётных, так и геометрических (на чертежах котла) для исключения разночтений рекомендуется обратиться к руководителю проекта.

Рекомендуемые учебные пособия приведены в списке используемых источников.

УО «МГЭК»

# СОДЕРЖАНИЕ

## 1 ОПИСАНИЕ КОТЛОАГРЕГАТА

2 Характеристики топлива, коэффициенты избытка воздуха по расчетным участкам, теоретические объемы воздуха и продуктов сгорания

2.1 Характеристики топлива

2.2 Определение низшей теплоты сгорания, теоретических объемов воздуха и продуктов сгорания

2.3 Определение коэффициента избытка воздуха по газходам

3 ОБЪЕМЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ, ОБЪЕМНЫЕ ДОЛИ ТРЕХАТОМНЫХ ГАЗОВ И КОНЦЕНТРАЦИЯ ЗОЛОВЫХ ЧАСТИЦ

4 ЭНТАЛЬПИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

4.1 H- $\theta$  таблица

4.2 H- $\theta$  диаграмма

5 ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

6 РАСЧЕТ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ

6.1 Конструктивные характеристики топочной камеры

6.2 Тепловой расчет топочной камеры

7 РАСЧЕТ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЬНОГО ТРАКТА

7.1 Расчет радиационного пароперегревателя

7.2 Расчет ширмового пароперегревателя

7.2.1 Конструктивные характеристики ширмового пароперегревателя

7.2.2 Тепловой расчет ширмового пароперегревателя

7.3 Расчет конвективного пароперегревателя первой ступени

7.3.1 Конструктивные характеристики конвективного пароперегревателя первой ступени

7.3.2 Тепловой расчет конвективного пароперегревателя первой ступени

7.3.3 Реконструкция КП1 (при необходимости)

7.4 Расчет конвективного пароперегревателя второй ступени

7.4.1 Конструктивные характеристики конвективного пароперегревателя второй ступени

7.4.2 Тепловой расчет конвективного пароперегревателя второй ступени

7.4.3 Реконструкция КП2 (при необходимости)

8 РАСЧЕТ ЭКОНОМАЙЗЕРА ВТОРОЙ СТУПЕНИ

8.1 Конструктивные характеристики экономайзера второй ступени

8.2 Тепловой расчет экономайзера второй ступени

8.3. Реконструкция ступени экономайзера (при необходимости)

9 УТОЧНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА

10 СВОДНАЯ ТАБЛИЦА ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА

11 СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

## 1 ОПИСАНИЕ КОТЛОАГРЕГАТА

Описание котлоагрегата находится в соответствующей литературе в бумажном или электронном виде – непосредственно у руководителя проекта. Для нахождения необходимого описания котлоагрегата необходимо в соответствии с заданием определить марку, тип котла и вид используемого топлива. Далее – находим требуемый котлоагрегат, набираем или копируем исходное его описание в этот раздел.

При использовании в рассчитываемом котле топлива, указанного в задании на курсовое проектирование, и определив, что оно не является исходным топливом для этого котлоагрегата, на использование которого он проектировался заводом-изготовителем согласно описания, то необходимо отметить этот факт: отдельным абзацем в начале описания, самостоятельно добавить соответствующее пояснение. Например, что котлоагрегат переводится на заданное согласно курсовому проекту топливо, и все расчёты проводятся по этому топливу и его характеристикам.

## 2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВА, КОЭФФИЦИЕНТЫ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА ПО РАСЧЕТНЫМ УЧАСТКАМ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОБЪЕМЫ ВОЗДУХА И ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

### 2.1 Характеристики топлива (для твёрдого и жидкого видов топлив)

Заданное топливо принимается согласно задания на курсовой проект по таблице I (твёрдое топливо) или III (мазут) литературы [3]. Зная вид топлива по этой же методике определяется его тип, месторождение и класс, соответственно записывается в строки, приведенные ниже:

Вид/тип – \_\_\_\_\_

Месторождение – \_\_\_\_\_

Класс – \_\_\_\_\_

Если какая-либо позиция отсутствует, то необходимо так и написать – отсутствует в соответствующей строке (например, «класс» в таблице I [3] не указан и стоит прочерк, следовательно, указывается класс данного топлива – «отсутствует»).

При жидком шлакоудалении по таблице II литературы [3] определяется температура жидкоплавкого состояния золы –  $t_3$  ( $t_c$ ).

Далее – выписывается по таблице I или III литературы [3] **элементарный химический состав на рабочую массу:**

$W^P =$  \_\_\_ %

$A^P =$  \_\_\_ %

$S^P =$  \_\_\_ % или в зависимости от метода определения  $S^P = S_k^P + S_{op}^P =$  \_\_\_ %

$C^P =$  \_\_\_ %

$H^P =$  \_\_\_ %

$N^P =$  \_\_\_ %

$O^P =$  \_\_\_ %

Сумма всех элементов химсостава должна быть = 100 %.

### 2.2 Определение низшей теплоты сгорания, теоретических объемов воздуха и продуктов сгорания

Величина содержания компонентов в топливе подставляется без перевода, как есть!

Низшая теплота сгорания:

$$Q_H^P = 0,339 \cdot C^P + 1,03 \cdot H^P - 0,109 \cdot (O^P - S^P) - 0,025 \cdot W^P, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \quad (1)$$

Теоретический объём воздуха:

$$V_B^0 = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p, \frac{M^3}{KG} \quad (2)$$

Объём трёхатомных газов:

$$V_{RO_2} = 0,0186 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) \frac{M^3}{KG} \quad (3)$$

Теоретический объём водяных паров:

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot V_B^0, \frac{M^3}{KG} \quad (4)$$

Теоретический объём азота:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_B^0 + 0,008 \cdot N^p, \frac{M^3}{KG} \quad (5)$$

Теоретический объём дымовых газов:

$$V_{\Gamma}^0 = V_{RO_2} + V_{H_2O}^0 + V_{N_2}^0, \frac{M^3}{KG} \quad (6)$$

УО «МГЭК»



## 2.1 Характеристики топлива (для газообразного топлива)

Заданное топливо принимается согласно задания на курсовое проектирование по таблице IV литературы [3].

Недостающие элементы топлива, которые не указаны ниже в примере, дописываются самостоятельно, а элементы, которые отсутствуют в топливе – равны нулю. Соответственно, получаем:

$$\text{CH}_4 = \text{_____} \%$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 = \text{_____} \%$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 = \text{_____} \%$$

$$\text{C}_4\text{H}_{10} = \text{_____} \%$$

$$\text{H}_2\text{S} = \text{_____} \%$$

$$\text{N}_2 = \text{_____} \%$$

$$\text{CO}_2 = \text{_____} \%$$

Сумма всех элементов химсостава должна быть = 100 %.

## 2.2 Определение низшей теплоты сгорания, теоретических объемов воздуха и продуктов сгорания

Величина содержания компонентов в топливе подставляется без перевода, как есть!

Низшая теплота сгорания

$$Q_{\text{H}}^{\text{P(C)}} = 0,01 \cdot (Q_{\text{CH}_4} \cdot \text{CH}_4 + Q_{\text{CO}} \cdot \text{CO} + Q_{\text{H}_2} \cdot \text{H}_2 + Q_{\text{H}_2\text{S}} \cdot \text{H}_2\text{S} + \sum Q_{\text{C}_m\text{H}_n} \cdot \text{C}_m\text{H}_n), \text{ МДж/м}^3 \quad (7)$$

Теоретический объём воздуха

$$V_{\text{B}}^0 = 0,0476 \cdot \left[ 0,5 \cdot \text{CO} + 0,5 \cdot \text{H}_2 + 1,5 \cdot \text{H}_2\text{S} + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) \cdot \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2 \right], \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (8)$$

В сумме сложных углеводородов  $\sum \left( m + \frac{n}{4} \right) \cdot \text{C}_m\text{H}_n$  вида  $\text{C}_m\text{H}_n$ , которые определяются по химическому составу заданного топлива вычисление производят следующим образом: для пропана  $\text{C}_3\text{H}_8$   $n=3$  и  $m=8$ . Для этана  $\text{C}_2\text{H}_6$  –  $n=2$  и  $m=6$  соответственно. Далее – все значения сложных углеводородов подставляются в формулу, суммируются с учётом их концентрации в данном топливе. Например,  $\text{C}_3\text{H}_8 = 55,3 \%$  и  $\text{C}_2\text{H}_6 = 11,1 \%$ , следовательно, получаем следующую сумму:

$$\left( 3 + \frac{8}{4} \right) \cdot 55,3 + \left( 2 + \frac{6}{4} \right) \cdot 11,1.$$

Объём трёхатомных газов:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01 \cdot (\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S} + \text{CH}_4 + \sum m \cdot \text{C}_m\text{H}_n), \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3} \quad (9)$$

Вычисления  $\sum m \cdot \text{C}_m\text{H}_n$  проводится аналогично примеру, приведенному выше.

Теоретический объём азота:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_B^0 + 0,01 \cdot N^p, \frac{M^3}{M^3} \quad (10)$$

Теоретический объём водяных паров:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \cdot (H_2 + H_2S + 2 \cdot CH_4 + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + 0,124 \cdot d_r + 1,61 \cdot V_B^0), \frac{M^3}{M^3} \quad (11)$$

Теоретический объём дымовых газов:

$$V_{\Gamma}^0 = V_{RO_2} + V_{H_2O}^0 + V_{N_2}^0, \frac{M^3}{M^3} \quad (12)$$

УО «МГЭК»

### 2.3 Определение коэффициента избытка воздуха по газоходам (для всех видов топлив)

Определение коэффициента избытка воздуха по газоходам котла производится по виду заданного топлива согласно конспекта лекций и литературы [2] таблиц 1.7 и 1.8 с соответствующим заполнением требуемых для расчётов позиций.

**Наличие нескольких ступеней экономайзера (далее – ЭК), типа (трубчатый или регенеративный) и количество ступеней воздухоподогревателя (далее – ВП) определяются по описанию котла и его чертежам (продольный и поперечный разрезы). В дальнейшем этот важный момент будет определять весь дальнейший тепловой расчёт котлоагрегата, поэтому рекомендуется после определения количества ступеней ЭК, типа и количества ступеней ВП проконсультироваться у руководителя проекта. Это исключить необходимость проводить дополнительные расчёты или пересчёт уже имеющихся данных вследствие некорректно определенных исходных данных по ЭК и ВП.**

По заданному топливу, типу котла, виду топочной камеры, виду парообразующих поверхностей коэффициент избытка топлива определится согласно литературы [2] таблица 1.7:

$$\alpha_T =$$

Присосы воздуха по газоходам котла в зависимости от его конструктивных особенностей и паропроизводительности (см. описание котла и задание на КП), определяются по литературе [2] таблица 1.8:

$$\Delta\alpha_T =$$

$$\Delta\alpha_{ПП} =$$

$$\Delta\alpha_{ЭК} =$$

$$\Delta\alpha_{ВП} = \text{или } \Delta\alpha_{РВП} =$$

Тогда, коэффициенты избытка воздуха по поверхностям нагрева котла, согласно движения дымовых газов определяются следующим образом:

$$\alpha_{ПП} = \alpha_T + \Delta\alpha_{ПП} = \tag{13}$$

$$\alpha_{ЭК2} = \alpha_{ПП} + \Delta\alpha_{ЭК} = \tag{14}$$

$$\alpha_{ВП2} = \alpha_{ЭК2} + \Delta\alpha_{ВП} = \tag{15}$$

$$\alpha_{ЭК1} = \alpha_{ВП2} + \Delta\alpha_{ЭК} = \tag{16}$$

$$\alpha_{ВП1} = \alpha_{ЭК1} + \Delta\alpha_{ВП} = \tag{17}$$

Либо, при наличии РВП:

$$\alpha_{ПП} = \alpha_T + \Delta\alpha_{ПП} = \tag{18}$$

$$\alpha_{ЭК2} = \alpha_{ПП} + \Delta\alpha_{ЭК} = \tag{19}$$

$$\alpha_{ЭК1} = \alpha_{ЭК2} + \Delta\alpha_{ЭК} = \tag{20}$$

$$\alpha_{РВП} = \alpha_{ЭК1} + \Delta\alpha_{РВП} = \tag{21}$$

### 3 ОБЪЕМЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ, ОБЪЕМНЫЕ ДОЛИ ТРЕХАТОМНЫХ ГАЗОВ И КОНЦЕНТРАЦИЯ ЗОЛОВЫХ ЧАСТИЦ

Расчётные величины по газоходам котла, начиная с топки, сводятся в таблицу 3.1 без внесения в них расчётов – записывается только итоговый результат с округлением до четвёртого знака после запятой.

Таблица 3.1 – Расчётные данные по действительным объёмам продуктов сгорания топлива (пример таблицы для котлов с ТВП)

Величина и расчетная формула	Газоход					
	$\alpha_T =$	$\alpha_{ПП} =$	$\alpha_{ЭК2} =$	$\alpha_{ВП2} =$	$\alpha_{ЭК1} =$	$\alpha_{ВП1} =$
Объем водяных паров, м <sup>3</sup> /кг (м <sup>3</sup> ) $V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_B^0$ (22)	ячейка №1					
Полный объем газов, м <sup>3</sup> /кг (м <sup>3</sup> ) $V_T = V_T^0 + 1,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_B^0$ (23)						
Объемная доля трехатомных газов $r_{RO_2} = V_{RO_2} / V_T$ (24)						
Объемная доля водяных паров $r_{HO_2} = V_{H_2O} / V_T$ (25)						
Доля трехатомных газов и водяных паров $r_{П} = r_{RO_2} + r_{HO_2}$ (26)						
Безразмерная концентрация золовых частиц, кг/кг (только для твёрдого топлива) $\mu_{ЗЛ} = \frac{A^P \cdot a_{ун}}{100 \cdot G_T}$ (27)						

Таблица 3.1 – Расчётные данные по действительным объёмам продуктов сгорания топлива (пример таблицы для котлов с РВП)

Величина и расчетная формула	Газоход					
	$\alpha_T =$	$\alpha_{ПП} =$	$\alpha_{ЭК2} =$	$\alpha_{ВП2} =$	$\alpha_{ЭК1} =$	$\alpha_{ВП1} =$
Объем водяных паров, м <sup>3</sup> /кг (м <sup>3</sup> ) $V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_B^0$ (28)	ячейка №1					
Полный объем газов, м <sup>3</sup> /кг (м <sup>3</sup> ) $V_{Г} = V_{Г}^0 + 1,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_B^0$ (29)						
Объемная доля трехатомных газов $r_{RO_2} = V_{RO_2} / V_{Г}$ (30)						
Объемная доля водяных паров $r_{HO_2} = V_{H_2O} / V_{Г}$ (31)						
Доля трехатомных газов и водяных паров $r_{П} = r_{RO_2} + r_{HO_2}$ (32)						

Расчёт значений в таблице 3.1 для всех видов топлив проводится следующим образом: для определения объема водяных паров при значении  $\alpha_T$  (ячейка №1) необходимо выполнить расчётные действия согласно указанной формуле для определения объема водяных паров  $V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_B^0$ . Значение  $V_{H_2O}^0$  и  $V_B^0$  принимаются из раздела 2.2. Значение  $\alpha$  принимается равным значению столбца, соответствующего ячейке № 1, т.е. будет равно  $\alpha_T$ . Значение объема водяных паров для столбца значений соответствующих  $\alpha_{ПП}$  будет проводится аналогично, по вышеуказанной формуле. В этом случае подставляться будут всё те же значения  $V_{H_2O}^0$  и  $V_B^0$ , однако  $\alpha = \alpha_{ПП}$ .

Все проведение расчётов всех остальных значений таблицы 2.1 вне зависимости от вида топлива – аналогичен приведенному примеру и не представляет сложности.

В случае использования для сжигания в рассчитываемом котле твёрдого топлива, то формула для определения безразмерной концентрации золовых частиц  $\mu_{зл} = \frac{A^P \cdot a_{ун}}{100 \cdot G_{Г}}$  (27) содержит следующие компоненты:

$A^P$  – зольность топлива – см. раздел 2.1;

$a_{ун}$  – доля золы, уносимой потоком дымовых газов. Определяется свойствами используемого топлива и видом шлакоудаления (твёрдое или жидкое) – см. таблицу 4.6 [2].

$G_{Г}$  – масса дымовых газов на килограмм сожжённого топлива. Определяется следующим образом:  $G_{Г} = 1 - 0,01 \cdot A^P + 1,306 \cdot \alpha \cdot V_B^0$ , кг/кг (33). Расчёт указанной выше величины проводится для каждого столбца с соответствующим значением  $\alpha$  и последующим проставлением в формулу для определения  $\mu_{зл}$ .

## 4 ЭНТАЛЬПИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

### 4.1 Н- $\theta$ таблица

Заполнение и расчёт таблицы 4.1/4.2/4.3 – сводной таблицы энтальпий воздуха и продуктов сгорания.

Заполнение таблицы 4.1/4.2/4.3 (в зависимости от принятого для расчёта вида топлива и конструктивных особенностей котла) – сводной таблицы энтальпий воздуха и продуктов сгорания производится следующим образом для всех видов топлив (твёрдое топливо/газ/мазут/):

1. Для каждого значения коэффициентов избытка воздуха по поверхностям нагрева котла в соответствующую строку записываются значения  $\alpha_T, \alpha_{пп}, \alpha_{эк2}, \alpha_{вп2}, \alpha_{эк1}, \alpha_{вп1}$  и/или,  $\alpha_{рвп}$  при его наличии (зависит от схемы компоновки поверхностей нагрева и вида сжигаемого топлива).

2. По заданной марке топлива (для твёрдого и жидкого), выписывается из таблицы XV [3], а для газообразного – XVI [3] величина  $H_T^0$  – энтальпия теоретического объёма продуктов сгорания, значение которой заносится в столбец таблицы 4.1/4.2/4.3 с таким же названием. Заполнение столбца производится соответствующим внесением значения  $H_T^0$  в каждую ячейку столбца для всего указанного интервала температур. В таблице XV и XVI [3] величина  $H_T^0$  обозначена, как  $I_T^0$ .

3. Таким же образом производится заполнение столбца для  $H_B^0$  – энтальпия теоретического объёма горячего воздуха. В таблице XV и XVI [3] величина  $H_B^0$  обозначена, как  $I_B^0$ .

4. При использовании [3] 1973 года издания обязательно необходимо выполнить перевод единиц измерения МКГСС в систему СИ.

5. Заполнение столбца  $(C\theta)_{зл}$  – теплоёмкость золы, которая заполняется только для твёрдого топлива. Значение  $(C\theta)_{зл}$  выписывается из таблицы XIV [3].

6. Производится расчёт энтальпии золы  $H_{зл}$  и запись полученных результатов в соответствующие ячейки столбца  $H_{зл}$  для каждой из указанных температур. Расчёт ведётся по следующей формуле:

$H_{зл} = 0,01 \cdot a_{ун} \cdot A^P \cdot (C\theta)_{зл}$  (34), где  $a_{ун}$  – доля золы, уносимой, потоком дымовых газов, принимается по таблице 4.6 [2];

$A^P$  – зольность топлива на рабочую массу, принимается согласно элементарного химического состава заданного топлива;

$(C\theta)_{зл}$  - теплоёмкость золы, смотри выше.

7. Величина  $H_{зл}$  так же рассчитывается только для твёрдого топлива.

8. Производится расчёт энтальпии продуктов сгорания  $H_T$  с заполнением соответствующих столбцов по расчётным поверхностям нагрева (ячейки в таблице, для которых необходимо выполнить расчёт, обозначены – \*\*\*\*\*).

9. Для твёрдого топлива диапазон температур составляет 2000 °С

10. Для жидкого и газообразного топлива – 2500 °С.

11. Расчёт ведется по следующей формуле:  $H_r = H_r^0 + (\alpha - 1) \cdot H_B^0 + H_{зл}$   
(35) следующим образом: для определения  $H_r$  в столбце  $\alpha_T$  рассчитываемая ячейка начинается с температуры 1100 °С. Значит, при температуре 1100 °С из таблицы 4.1/4.2/4.3 в вышеуказанную формулу подставляются значения  $H_r^0$ ,  $H_B^0$  и  $H_{зл}$ , и зная величину  $\alpha_T$  производим определение  $H_r$  для температуры 1100 °С. С помощью такого алгоритма расчёта производим вычисление всех отмеченных ячеек (\*\*\*\*), путём подстановки в формулу  $H_r = H_r^0 + (\alpha - 1) \cdot H_B^0 + H_{зл}$  соответствующих значений  $H_r^0$ ,  $H_B^0$  и  $H_{зл}$  и  $\alpha$ .

**Для газа и мазута величина  $H_{зл}$  не требуется, т.е. её расчёт не производится!!!**

УО «МГЭК»

Таблица 4.1 – Сводная таблица энтальпий воздуха и продуктов сгорания для твёрдого топлива

θ, °С	Н <sub>Г</sub> <sup>0</sup> КДж/ кг	Н <sub>В</sub> <sup>0</sup> КДж/ кг	(Сθ) <sub>ЗЛ</sub> КДж /кг	Н <sub>ЗЛ</sub> КДж /кг	Н <sub>Г</sub> = Н <sub>Г</sub> <sup>0</sup> + (α - 1) · Н <sub>В</sub> <sup>0</sup> + Н <sub>ЗЛ</sub>					
					α <sub>Т</sub>	α <sub>ПП</sub>	α <sub>ЭК2</sub>	α <sub>ВП2</sub>	α <sub>ЭК1</sub>	α <sub>ВП1</sub>
100										*****
200									*****	*****
300								*****	*****	*****
400								*****	*****	
500								*****	*****	
600							*****	*****		
700							*****	*****		
800							*****	*****		
900							*****			
1000							*****			
1100					*****	*****				
1200					*****	*****				
1300					*****	*****				
1400					*****					
1500					*****					
1600					*****					
1700					*****					
1800					*****					
1900					*****					
2000					*****					
2100					*****					
2200					*****					



Таблица 4.2 – Сводная таблица энтальпий воздуха и продуктов сгорания для жидкого и газообразного топлива с ТВП

θ, °C	H <sub>Г</sub> <sup>0</sup> КДж/ кг	H <sub>В</sub> <sup>0</sup> КДж/ кг	(Сθ) <sub>зл</sub> КДж /кг	H <sub>зл</sub> КДж /кг	H <sub>Г</sub> = H <sub>Г</sub> <sup>0</sup> + (α - 1) · H <sub>В</sub> <sup>0</sup>					
					α <sub>Т</sub> =	α <sub>ПП</sub> =	α <sub>ЭК2</sub> =	α <sub>ВП2</sub> =	α <sub>ЭК1</sub> =	α <sub>ВП1</sub> =
100										*****
200										*****
300									*****	*****
400								*****	*****	*****
500								*****	*****	
600							*****	*****		
700							*****	*****		
800							*****	*****		
900							*****	*****		
1000							*****	*****		
1100					*****	*****				
1200					*****	*****				
1300					*****	*****				
1400					*****	*****				
1500					*****	*****				
1600					*****	*****				
1700					*****	*****				
1800					*****	*****				
1900					*****	*****				
2000					*****	*****				
2100					*****	*****				
2200					*****	*****				
2300					*****	*****				
2400					*****	*****				
2500					*****	*****				

Таблица 4.3 – Сводная таблица энтальпий воздуха и продуктов сгорания для жидкого и газообразного топлива с РВП

θ, °C	H <sub>Г</sub> <sup>0</sup> КДж/ кг	H <sub>В</sub> <sup>0</sup> КДж/ кг	H <sub>Г</sub> = H <sub>Г</sub> <sup>0</sup> + (α - 1) · H <sub>В</sub> <sup>0</sup>				
			α <sub>Т</sub> =	α <sub>ПП</sub> =	α <sub>ЭК2</sub> =	α <sub>ЭК1</sub> =	α <sub>РВП</sub> =
100							*****
200							*****
300						*****	*****
400					*****	*****	
500					*****	*****	
600				*****	*****		
700				*****	*****		
800				*****	*****		
900				*****	*****		
1000				*****	*****		
1100			*****	*****			
1200			*****	*****			
1300			*****	*****			
1400			*****	*****			
1500			*****	*****			
1600			*****	*****			
1700			*****	*****			
1800			*****	*****			
1900			*****	*****			
2000			*****	*****			
2100			*****	*****			
2200			*****	*****			
2300			*****	*****			
2400			*****	*****			
2500			*****	*****			

## 4.2 Н-Θ диаграмма

Построение Н-Θ диаграммы производится на миллиметровке формата А3 или А2, в зависимости от масштаба размещения графиков.

По оси  $x$  – наносится разметка в соответствующем масштабе температуры (Θ) в °С от 0 до 2000 °С при твёрдом топливе либо до 2500 °С при газе/мазуте.

По оси  $y$  – наносится разметка Н, кДж/кг. Затем строится зависимость  $H_T$  от Θ для каждого столбца  $\alpha$ . Например для столбца  $\alpha_T$  на оси  $x$  отмечаются точки пересечения по температуре (Θ) и энтальпии газов ( $H_T$ ) в диапазоне отмеченном (\*\*\*\*\*), т.е. от температуры 1100 °С до 2500 °С. В итоге, получим пятнадцать точек, образующую прямую линию. Аналогично – производим построение для остальных столбцов  $\alpha$ .

По итогу должно получиться от пяти до шести графиков зависимостей (для каждой поверхности нагрева, т.е. для каждого столбца, начиная с  $\alpha_T$ ).

## 5 ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

В данном разделе производим определение располагаемой теплоты топлива, тепловых потерь и КПД котельного агрегата.

Расчёт теплового баланса проводится в табличном виде с соответствующими пояснениями расчётов по ходу их выполнения.

Таблица 5.1 – тепловой баланс котельного агрегата

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула	Расчет
Располагаемое тепло топлива (по заданию для расчёта):				
Для <u>твёрдого топлива</u>	$Q_P^P$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$Q_H^P = Q_P^P$ См. раздел 2.2	
Для <u>жидкого топлива (мазут)</u>	$Q_P^P$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$Q_P^P = Q_H^P + Q_{\text{вн.н}} + Q_{\text{тл}} + Q_{\text{ф}}$ (36) $Q_H^P$ – см. раздел 2.2 $Q_{\text{вн.н}}$ – см. 1*. $Q_{\text{тл}}$ – см. 2*. $Q_{\text{ф}}$ – см. 3*.	
Для <u>газообразного топлива</u>	$Q_P^P$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$Q_H^{P(C)} = Q_P^P$ См. раздел 2.2	
Температура холодного воздуха	$t_{\text{х.в}}^0$	$^{\circ}\text{C}$	Задана предварительно – см. задание на КП	
Энтальпия холодного воздуха	$H_{\text{х.в}}^0$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$H_{\text{х.в}}^0 = V_{\text{в}}^0 \cdot c_{\text{в}} \cdot t_{\text{х.в}}^0$ (37) $c_{\text{в}} = 1,32 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}}$ $V_{\text{в}}^0$ – см. раздел 2.2	
Приведенная влажность топлива (для твёрдого или жидкого топлива)	$W^P$	$\frac{\% \text{ кг}}{\text{МДж}}$	$W^P = \frac{W^P}{Q_H^P}$ (38) $W^P$ – см. раздел 2.1 $Q_H^P$ см. раздел 2.2	
Температура уходящих газов	$\Theta_{\text{ух}}$	$^{\circ}\text{C}$	Задана предварительно – см. задание на КП	
Энтальпия уходящих газов	$H_{\text{ух}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	по H- $\Theta$ табл. 4.1 – см. 4*	
Потери теплоты котлоагрегата				

продолжение таблицы 5.1

от химического недожога	$q_3$	%	по табл. XVIII, XIX, XX [3] в зависимости от вида топлива и типа котла	
от механического недожога	$q_4$	%	по табл. XVIII, XIX, XX [3] в зависимости от вида топлива и типа котла	
с уходящими газами	$q_2$	%	$q_2 = \frac{(H_{yx} - \alpha_{yx} \cdot H_{x.в.}^0) \cdot (100 - q_4)}{Q_p^p}$ (39) $\alpha_{yx}$ – см. 5*.	
в окружающую среду	$q_5$	%	$q_5 = \frac{\left(\frac{60}{D_{ном}}\right)^{0,5}}{\log D_{ном}}$ (40) где, $D_{ном} = D_{пп}$ подставляется в формулу в кг/с	
Доля золы в шлаке (ТОЛЬКО для твёрдого топлива)	$\alpha_{шл}$	%	$\alpha_{шл} = 1 - \alpha_{ун}$ (41) $\alpha_{ун}$ – см. табл. 4.6 [2] по виду шлакоудаления.	
Температура шлака (ТОЛЬКО для твёрдого топлива)	$\theta_{шл}$	°С	Принимается по [2] стр. 28 в зависимости от вида шлакоудаления	
Энтальпия шлака (ТОЛЬКО для твёрдого топлива)	$(C\theta)_{зл}$	$\frac{кДж}{кг}$	По $H-\theta$ табл. (табл. 4.1) по столбцу – $(C\theta)_{зл}$ и температуре для данного вида шлакоудаления.	
с физически теплом шлаков (ТОЛЬКО для твёрдого топлива)	$q_6$	%	$q_6 = \frac{\alpha_{шл} \cdot (C\theta)_{зл} \cdot A^p}{Q_p^p}$ (42)	
Сумма тепловых потерь	$\sum q_i$	%	$q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$ (43)	
КПД котлоагрегата брутто	$\eta_{КА}$	%	$\eta_{КА} = 100 - \sum q_i$ (44)	
Давление перегретого пара за котлом	$P_{пп}$	МПа	См. задание на КП – маркировка котла	

окончание таблицы 5.1

Давление в барабане	$P_б$	МПа	$P_{пп} + 0,05 \cdot P_{пп}$ (45)	
Давление в экономайзере	$P_{эк}$	МПа	$P_б + 0,1 \cdot P_б$ (46)	
Температура перегретого пара	$t_{пп}$	°С	Задано предварительно – см. задание на КП	
Энтальпия перегретого пара	$h_{пп}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	[3], табл. XXV по $P_{пп}$ и $t_{пп}$	
Температура питательной воды	$t_{пв}$	°С	Задано предварительно – см. задание на КП	
Энтальпия питательной воды	$h_{пв}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	[3], табл. XXIV по $P_{эк}$ и $t_{пв}$	
Энтальпия воды на линии насыщения	$h_{кип}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	[3], табл. XXIII по $P_б$ для воды ( $i'$ )	
Паропроизводительность	$D_{пп}$	кг/с	См. задание на КП- маркировка котла	
Величина продувки	$D_{пр}$	кг/с	Задано в % от $D_{пп}$ – см. задание на КП. $\frac{D_{пр}}{100} \cdot D_{пп}$ (47)	
Тепло, полезно использованное в котельном агрегате	$Q_{ка}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$Q_{ка} = D_{пп} \cdot (h_{пп} - h_{пв}) +$ $+ D_{пр} \cdot (h_{кип} - h_{пв})$ (48)	
Полный расход топлива	$B$	кг/с	$B = \frac{Q_{ка} \cdot 100}{\eta_{КА} \cdot Q_P^P}$ (49)	
Расчетный расход топлива	$B_p$	кг/с	$B_p = B \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)$ (50)	
Коэффициент сохранения тепла	$\varphi$	---	$\varphi = 1 - \frac{q_5}{q_5 + \eta_{КА}}$ (51)	

Примечания

1\*.

$Q_{вн.н}$  – теплота, вносимая в топку с подогретым воздухом, но не в ВП, а в калориферной установке, которая установлена до ВП.

Определяется по выражению:  $Q_{ВН.Н} = (\beta + \Delta\alpha_{ВП}) \cdot (H'_B - H^0_{ХВ}), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  (52), где

$$\beta = \alpha_T - \Delta\alpha_{ТП} - \Delta\alpha_{ПЛ},$$

где

$\Delta\alpha_{ПЛ}$  – присосы воздуха в системе пылеприготовления в зависимости от самой пылесистемы и мелющих агрегатов; описание входящих компонентов формулы – см. стр. 27, ф-ла 3.8 [2].

$H'_B$  – энтальпия подогретого в калорифере воздуха,  $H'_B = V_B^0 \cdot c_B \cdot t_B, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  (53), где

$t_B$  – температура воздуха на выходе из калорифера. Принимается в соответствии с видом сжигаемого топлива, конструкцией ВП (по табличным данным), и может составлять от 50 до 110 °С;

$H^0_{ХВ}$  – энтальпия холодного воздуха, определяется по:

$$H^0_{ХВ} = V_B^0 \cdot c_B \cdot t_{ХВ}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$
 (54), где  $t_{ХВ}$  – см. задание на КП.

Величина  $Q_{ВН.Н}$  обычно учитывается, когда сжигается мазут при установленных калориферах.

## 2\*.

$Q_{ТЛ}$  – теплота, вносимая в топку вместе с подогретым топливом и в основном учитывается при сжигании мазутов, которые перед вводом в горелки подогревают до температуры  $t_{ТЛ}^M = 90 \div 140$  °С, т.е. до температуры вспышки.

При сжигании других видов топлив этой величиной пренебрегают.

Определяется по выражению:  $Q_{ТЛ} = c_{ТЛ} \cdot t_{ТЛ}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  (55), где,

$c_{ТЛ}$  – теплоёмкость топлива, которая для мазута определяется по следующей формуле:  $c_{ТЛ} = 1,74 + 0,025 \cdot t_{ТЛ}^M$ .

## 3\*.

$Q_{Ф}$  – теплота, вносимая в топку вместе с паром, затрачиваемым на распыл мазута через паровые или паромеханические форсунки и определяется:

$$Q_{Ф} = d_{п} \cdot (h_{п} - 2380), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$
 (56), где

$d_{п}$  – расход пара на распыл мазута на форсунки, обычно составляет 0,03÷0,05 кг/кг, т.е. 30÷50 грамм пара на 1 кг. мазута;

$h_{п}$  – энтальпия этого пара при следующих параметрах:  $P_{п} = 0,3 \div 0,6$  МПа и  $t_{п} = 250 \div 350$  °С;

2380 кДж/кг – скрытая теплота парообразования при данных условиях.

Величины  $d_{п}$ ,  $P_{п}$ ,  $t_{п}$  принимаются самостоятельно в указанном выше диапазоне величин. Энтальпия пара, идущего на распыл мазута определяется по таблице XXV [3] по  $P_{п}$ ,  $t_{п}$ .

## 4\*.

Энтальпия уходящих газов за котлом  $H_{УХ}$ ,  $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$  или  $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}\right)$  определяется по последней поверхности нагрева в котле по ходу газов. Т.е. если последняя поверхность нагрева в котле по ходу дымовых (уходящих газов) – воздухоподогреватель первой ступени, то соответственно, по столбцу  $\alpha_{ВП1}$

определяют энтальпию уходящих газов ( $H_{yx}$ ) либо сразу, либо с использованием итерации/аппроксимации.

Если же последняя поверхность нагрева будет РВП, то проводят определение  $H_{yx}$  по столбцу  $\alpha_{РВП}$ .

### 5\*.

$\alpha_{yx}$  – коэффициент избытка воздуха за последней поверхностью нагрева в котле. Принимается в зависимости от компоновки «хвостовых» поверхностей нагрева котла, либо по описанию котла, либо по чертежу котельного агрегата, определяется последняя поверхность нагрева по ходу дымовых газов, которая и будет равна величине  $\alpha_{yx}$ .

То есть, в результате просмотра и анализа чертежа заданного котла, было определено, что последней поверхностью нагрева в котле является первая ступень ТВП, тогда принимаем, что  $\alpha_{yx} = \alpha_{ВП_1}$ , значение которого принимаем из раздела 2.3.

Если же на котле установлен РВП, то тогда получим, что РВП будет являться последней поверхностью нагрева, и соответственно,  $\alpha_{yx} = \alpha_{РВП}$ .



## 6 РАСЧЕТ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ

### 6.1 Конструктивные характеристики топочной камеры

Построение эскиза топочной камеры и определение её геометрических характеристик.

По чертежам котельного агрегата (выдаётся комплект чертежей каждому обучающемуся индивидуально) – продольному и поперечному разрезам определяется общий вид эскиза, выполняется его построение в произвольном масштабе с соблюдением основных пропорций и форм поверхностей нагрева (например, ШП).

Далее – производится измерение размеров в миллиметрах. Каждый размер обозначен соответствующей буквой. В случае отсутствия измеряемой величины (размера) на чертеже в силу конструктивных особенностей – размер не учитывается как на эскизе, так в и последующих расчётах. Этот факт необходимо отметить на листе с изображением эскиза топки, что данный размер не используется, т.к. конструкция топки не предусматривает его.

Масштаб на всех чертежах, если нет отдельных пояснений – 1:50. Например, измерив высоту топки (буква **h** на эскизе), получаем значение 245 мм. для перевода полученного значения в реальный размер необходимо умножить на масштаб, который в нашем случае, как отмечалось выше, составляет 1:50. Тогда получаем:  $245 \cdot 50 = 12550$  мм. или 12,25 м. Далее – записываем это значение с соответствующим пояснением на эскизе:  $h=12,25$  м. Остальные значения определяются, вычисляются и записываются аналогичным образом.

Обратите внимание, что при определении размера **a** – ширины фронта топки, измеренный размер необходимо дополнительно умножить на два, т.к. на чертеже изображена только  $\frac{1}{2}$  топочной камеры для экономии места. Размеры, обозначенные буквами **c**, **t**, **b** (глубина топки) – должны быть равны между собой.

**Стандартные и распространённые образцы эскизов топок приведены в конце данного раздела.**

После измерения и записи всех необходимых размеров производится расчёты площадей стен топки, определение необходимых площадей и вычисление объёма топочной камеры. Алгоритм и формулы приведены ниже.

**Допускается отклонение от стандартного расчёта по приведенным формулам. Обучающийся может использовать базовые геометрические формулы для определения площадей стен топочной камеры по своему усмотрению. С соответствующим обоснованием и пояснением каждого выполненного действия.**

Расчёты записываются после приведённой формулы в полном виде, без сокращений на всех этапах расчёта данного раздела.

Построение эскиза топочной камеры

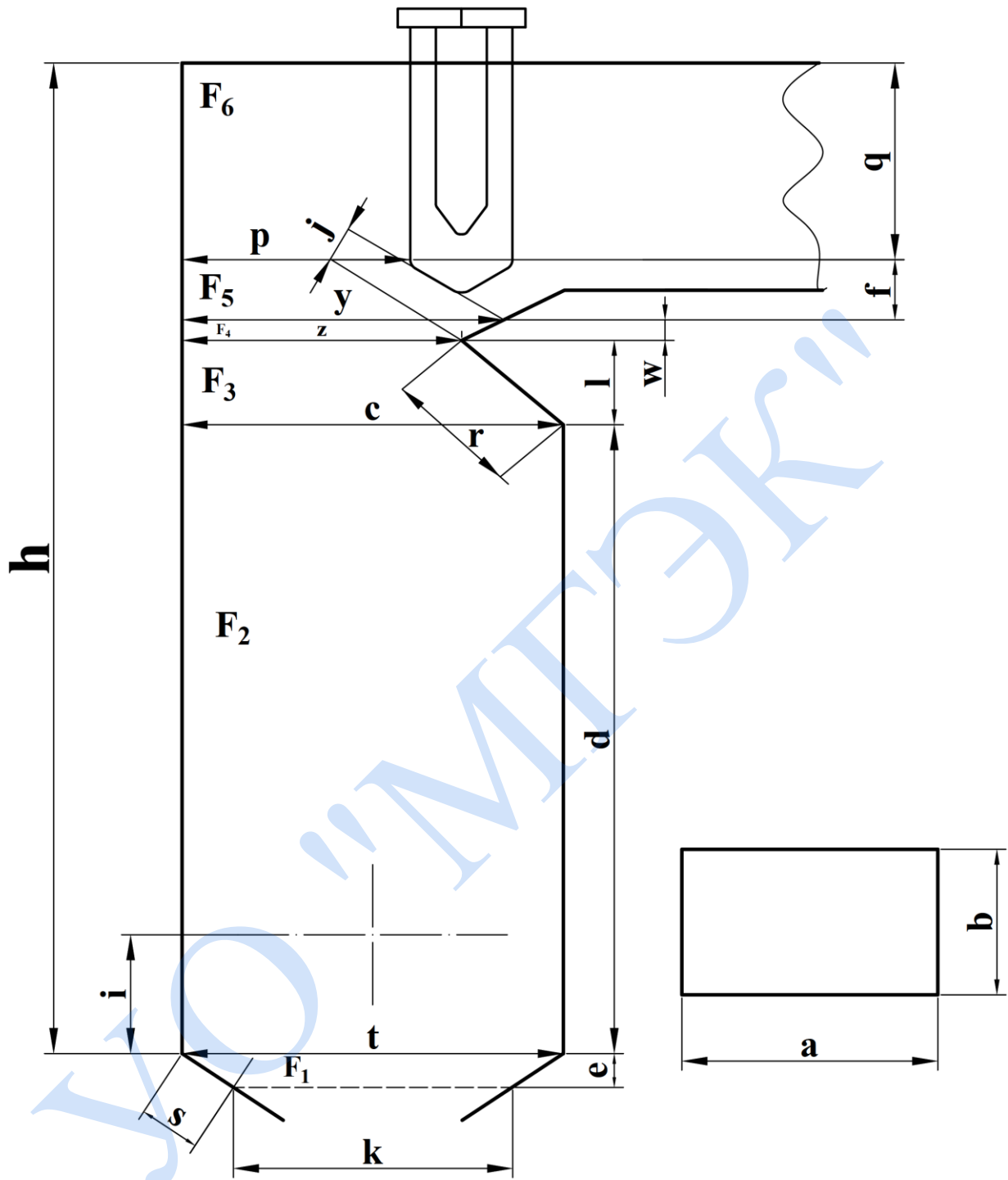


Рисунок 6.1 – эскиз топочной камеры

## Конструктивные характеристики топки

Площадь фронтальной стенки:

$$F_{\phi} = (h - f + e) \cdot a, \text{ м}^2 \quad (57)$$

Площадь задней стенки:

$$F_{\text{задней}} = (j + f + d + e) \cdot a, \text{ м}^2 \quad (58)$$

Площадь боковых стенок:

$$F_6 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6, \text{ м}^2 \quad (59)$$

$$F_1 = \frac{(t+k)}{2} \cdot c, \text{ м}^2 \quad (60)$$

$$F_2 = d \cdot t, \text{ м}^2 \quad (61)$$

$$F_3 = \frac{z+c}{2} \cdot e, \text{ м}^2 \quad (62)$$

$$F_4 = \frac{z+y}{2} \cdot w, \text{ м}^2 \quad (63)$$

$$F_5 = \frac{p+y}{2} \cdot f, \text{ м}^2 \quad (64)$$

$$F_6 = p \cdot q, \text{ м}^2 \quad (65)$$

Площадь потолка:

$$F_{\text{пот}} = p \cdot a, \text{ м}^2 \quad (66)$$

Площадь выходного окна:

$$F_{\text{окн}} = (c + f) \cdot a, \text{ м}^2 \quad (67)$$

Площадь стен топки:

$$F_{\text{ст}} = F_{\phi} + F_{\text{задней}} + 2 \cdot F_6 + F_{\text{пот}} + F_{\text{окн}}, \text{ м}^2 \quad (68)$$

Площадь горелок:

$$F_{\text{гор}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n, \text{ м}^2 \quad (69)$$

### **Важно!**

В формуле (69)  $F_{\text{гор}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n, \text{ м}^2$ , величина  $d$  – является диаметром горелки, который определяется по чертежу. Величина  $n$  – количество горелок, которое может определяться, либо по чертежу, либо по описанию котла.

Площадь стен топки, закрытых экранами:

$$F_{\text{экр}} = F_{\phi} + F_3 + 2 \cdot F_6 - F_{\text{гор}}, \text{ м}^2 \quad (70)$$

Диаметр, толщины стен труб и шаг между трубами определяются по описанию котельной установки, либо непосредственно по чертежу с выполнением необходимых расчётов для вычисления реального размера с учётом масштаба чертежа.

При использовании данных, взятых из описания котлоагрегата дополнительных расчётов не требуется – там указаны действительные данные не требующие уточнения по масштабу.

Обозначения:

$d$  – диаметр соответствующего трубного элемента котла, мм.

$\delta_{\text{экр}}$  – толщина стенки трубного элемента котла, мм.

$S$  – шаг между трубными поверхностями котла, мм.

Полученные значения (из описания либо по чертежу) записываются в формате  $d \times \delta = 77 \times 8$  мм

Диаметр толщины стен труб:

- экранов

$$d \times \delta_{\text{экр}} = \quad \times \quad \text{мм}$$

- потолочных труб

$$d \times \delta_{\text{пот}} = \quad \times \quad \text{мм}$$

Угловой коэффициент:

- экранов

$$X_{\text{экр}} = 1 - 0,2 \cdot \left( \frac{s}{d} - 1 \right) \quad (71)$$

потолочных труб

$$X_{\text{пот}} = 1 - 0,2 \cdot \left( \frac{s}{d} - 1 \right) \quad (72)$$

- труб, расположенных в выходном окне – ширм

$$X_{\text{окн}} = 1$$

Далее – производится расчёт по нижеприведённым формулам, с соответствующим проставлением требуемых значений.

Лучевоспринимающие поверхности:

-экранов

$$H_{\text{экр}}^{\text{л}} = F_{\text{экр}} \cdot X_{\text{экр}}, \text{ м}^2 \quad (73)$$

-ПОТОЛОЧНОЙ ЧАСТИ

$$H_{\text{пот}}^{\text{л}} = F_{\text{пот}} \cdot X_{\text{пот}}, \text{ м}^2 \quad (74)$$

- В ВЫХОДНОМ ОКНЕ

$$H_{\text{окн}}^{\text{л}} = F_{\text{окн}} \cdot X_{\text{окн}}, \text{ м}^2 \quad (75)$$

- ТОПКИ

$$H_{\text{т}}^{\text{л}} = H_{\text{экр}} + H_{\text{окн}} + H_{\text{пот}}, \text{ м}^2 \quad (76)$$

Объем топки:

$$V_{\text{т}} = F_{\text{г}} \cdot a, \text{ м}^3 \quad (77)$$

Эффективная толщина излучающего слоя в топке:

$$S = \frac{3,6 \cdot V_{\text{т}}}{F_{\text{ст}}}, \text{ м} \quad (78)$$

Эскизы топочных камер.

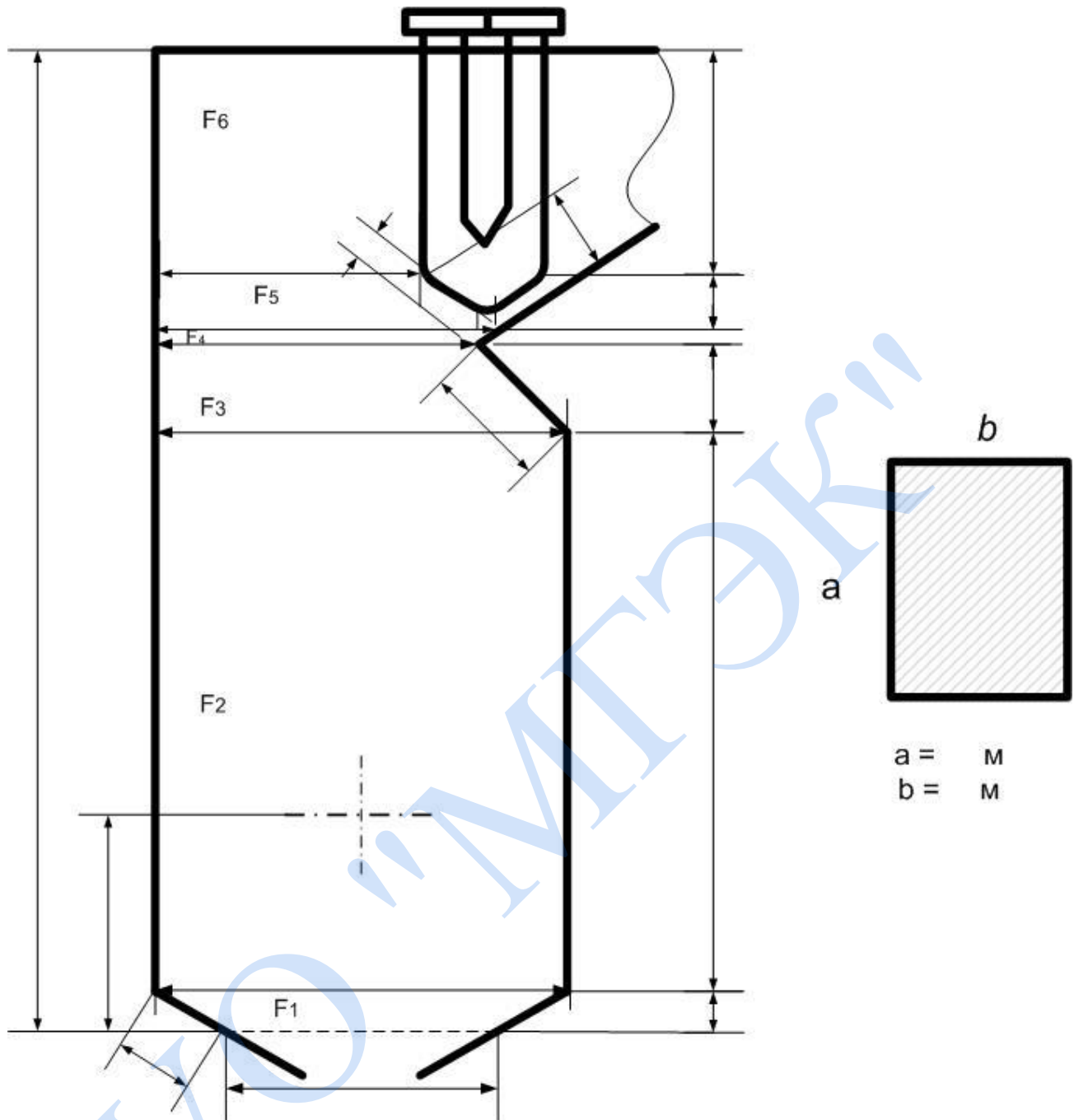


Рисунок 6.2– эскиз топочной камеры

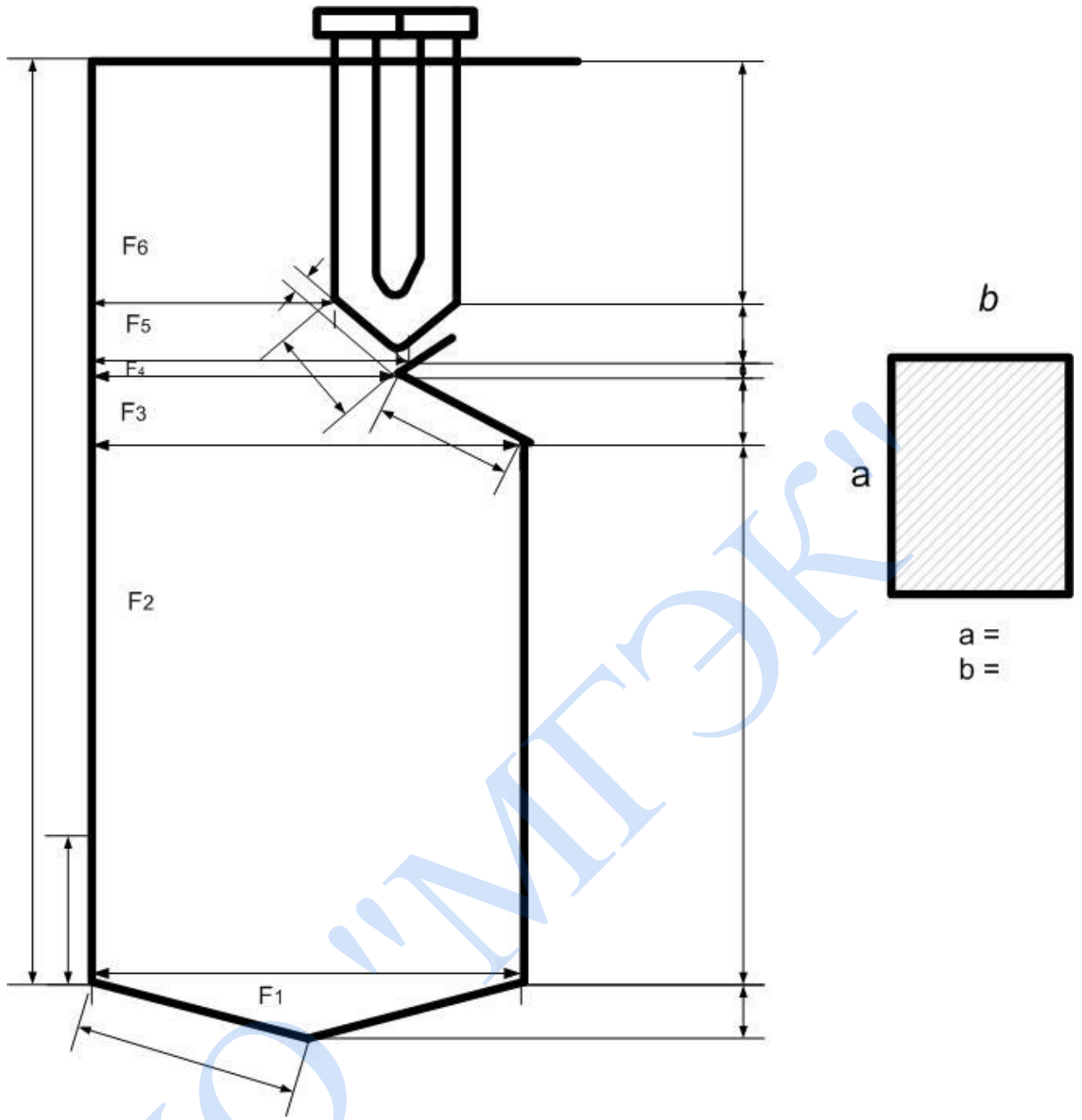


Рисунок 6.3 – эскиз топочной камеры

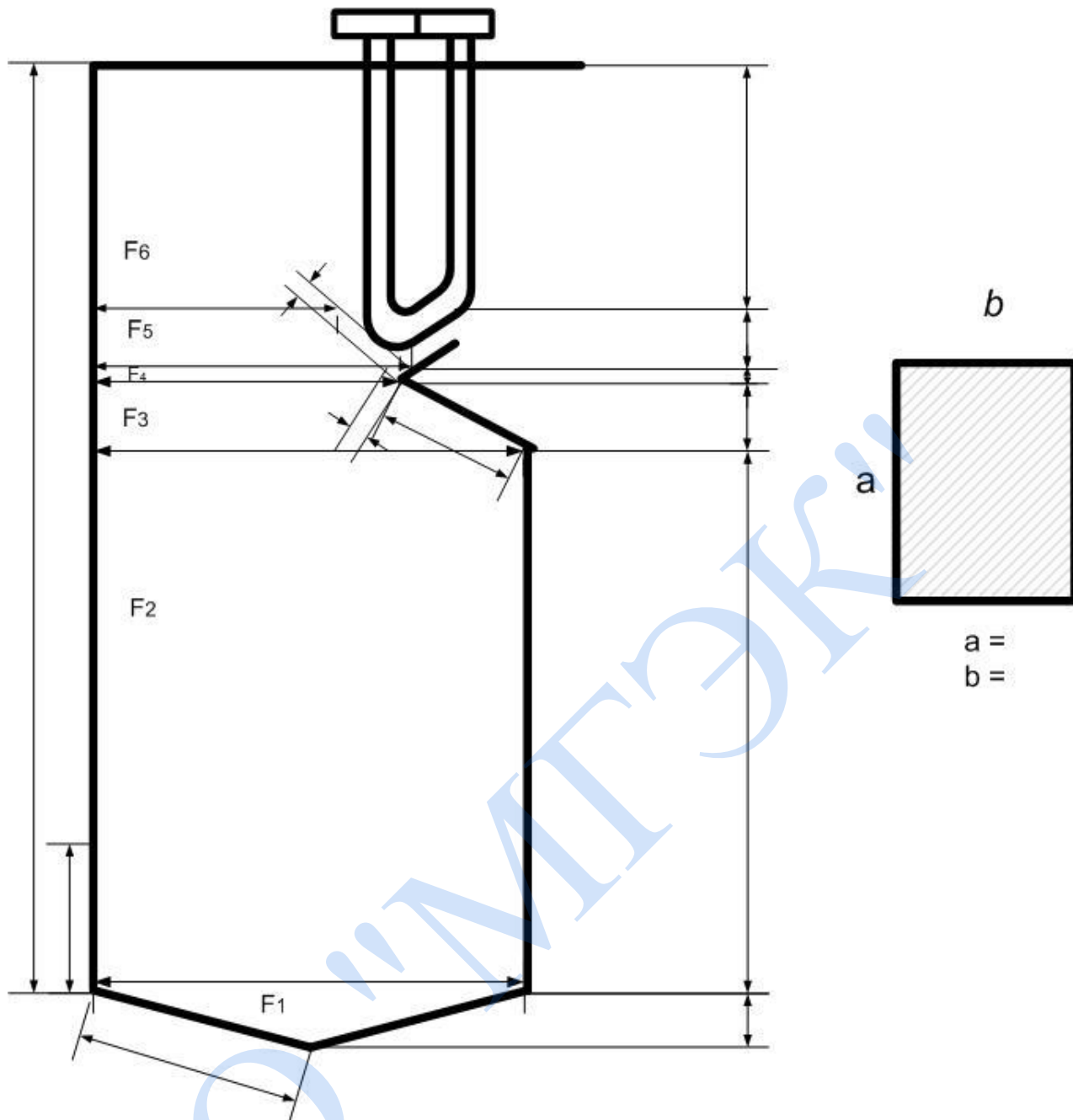


Рисунок 6.4 – эскиз топочной камеры

## 6.2 Тепловой расчет топочной камеры

Тепловой расчет топочной камеры проводится в табличном виде с использованием данных, полученных в результате расчетов как предыдущих разделов, так и в ходе выполнения текущего

Таблица 6.1 – тепловой расчет топочной камеры

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула или обоснование	Расчет
Коэффициент избытка воздуха в топке	$\alpha_T$	---	см. раздел 2.3	
Присос воздуха в систему пылеприготовления	$\Delta\alpha_{пл}$	---	Принимается по [2] стр. 18 в зависимости от вида топлива.	
Температура горячего воздуха	$t_{ГВ}$	°С	Задана предварительно – см. задание на КП	
Энтальпия горячего воздуха	$H_{ГВ}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По Н-Θ таблице, по $t_{ГВ}$ столбце $H_B^0$ с помощью итерации	
Тепло, вносимое воздухом в топку	$Q_B$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$(\alpha_T - \Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{пл}) \cdot H_{ГВ} + (\Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{пл}) \cdot H_{ХВ}^0$ (79)	
Полезное тепловыделение в топке	$Q_T$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$Q_p \cdot \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_B$ (80)	
Теоретическая (адиабатная) температура в топке	$\Theta_A$	°С	По Н-Θ таблице, по $Q_T$ в столбце $\alpha_T$ при расчете топки с помощью обратной итерации/аппроксимации	
Относительное положение максимума температур по высоте топки	$x_T$	---	$x_T = \frac{h_T}{H_T}$ (81) см. рис. 4.2 [2]	
Коэффициент	$M$	---	Принимается одна из формул 4.26 а,б,в стр. 39-40 [2] в зависимости от вида топлива и расположения горелок, либо сразу значение $M$	



продолжение таблицы 6.1

Температура газов на выходе из топки	$\Theta_T''$	$^{\circ}\text{C}$	Принимается предварительно по табл. 4.7 [2] в зависимости от вида топлива и котла	
Энтальпия газов на выходе из топки	$H_T''$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По Н- $\Theta$ таблице по $\Theta_T''$ в соотв. столбце при расчёте топки	
Средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания	$VC_{cp}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг } ^{\circ}\text{C}}$	$\frac{Q_T - H_T''}{\Theta_A - \Theta_T''}$ (82)	
Коэффициенты ослабления лучей: -трехатомными газами	$k_{\Gamma}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$\left( \frac{7,8+16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_T''}{1000} \right)$ (83) <b>См. 1*</b>	
-ЗОЛОВЫМИ частицами (только при сжигании твёрдого топлива)	$k_{\text{зл}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$\frac{43 \cdot \rho_{\Gamma}}{(T_T'' \cdot d_{\text{зл}})^{0,67}}$ (84) <b>См. 2*</b>	
-КОКСОВЫМИ частицами (только при сжигании твёрдого топлива)	$k_{\text{к}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	Принимается по стр. 43 [2]	
сажистыми частицами, образующимися в ядре факела (только при сжигании газа/мазута)	$k_{\text{с}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$0,3 \cdot (0,2 - \alpha_{\Gamma}) \cdot (1,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_T'' - 0,5) \cdot \frac{c^p}{H^p}$ (85) ф-ла 4.43 стр. 43 [2] с пояснениями	
-ТОПОЧНОЙ средой (только при сжигании твёрдого топлива)	$k$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$k_{\Gamma} \cdot r_{\text{п}} + k_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{зл}} + k_{\text{к}}$ (86)	
-ТОПОЧНОЙ средой (только при сжигании ГМ)	$k$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$k_{\Gamma} \cdot r_{\text{п}} + k_{\text{с}}$ (87)	
Оптическая толщина излучающего слоя	$kPS$	—	$k \cdot P \cdot S$ (88) $P = 0,1 \text{ МПа}$ $S$ – см. конструктивные характеристики ШП	

продолжение таблицы 6.1

Степень черноты факела	$\xi_{\phi}$	—	$1 - e^{-kPS}$ (89)	
Условный коэффициент загрязнения	$\xi$	—	По табл.4.8 [2]	
Коэф. тепловой эффективности гладк. экран.	$\psi_{\text{экр}}$	—	$\xi \cdot X_{\text{экр}}$ (90)	
-потолочных труб	$\psi_{\text{пот}}$	—	$\xi \cdot X_{\text{пот}}$ (91)	
-труб в выходном окне(ширм)	$\psi_{\text{окн}}$	—	$\xi \cdot X_{\text{окн}}$ (92)	
Коэффициент	$\beta$	—	$\frac{A}{\theta''_T}$ (93) A –см. стр. 42 [2] в зависимости от вида топлива	
Условный коэффициент загрязнения ширм	$\xi_{\text{ш}}$	—	$\xi \cdot \beta$ (94)	
Средний коэффициент тепловой эффективности	$\psi_{\text{ср}}$	—	$\frac{\psi_{\text{экр}} \cdot F_{\text{экр}} + \psi_{\text{пот}} \cdot F_{\text{пот}} + \psi_{\text{окн}} \cdot F_{\text{окн}}}{F_{\text{ст}}}$ (95)	
Степень черноты топочной камеры	$\xi_T$	—	$\frac{\xi_{\phi}}{\xi_{\phi} + (1 - \xi_{\phi}) \cdot \psi_{\text{ср}}}$ (96)	
Температура газов на выходе из топки	$\theta''_T$	°С	<b>По формуле *(97) см. в конце раздела</b>	
Энтальпия газов на выходе из топки	$H''_T$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По Н-θ таблице, столбцу $\alpha_T$ по величине $\theta''_T$	
Количество тепла, воспринятого в топке	$\theta^L_T$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\varphi \cdot (Q_T - H''_T)$ (98)	

окончание таблицы 6.1

Средняя тепловая нагрузка лучевоспринимающей поверхности	$q_l$	$\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$	$\frac{B \cdot \Theta_T^L}{H_T^L}$ (99) B – см. главу 5; $H_T^L$ – см. раздел 6.1	
Теплонапряжение топочного объема	$q_v$	$\frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}$	$\frac{B \cdot Q_H^p}{V_T}$ (100) B – см. главу 5; $Q_H^p$ – см. раздел 2.1; $V_T$ – см. раздел 6.1.	

\* - формула (97)

$$\Theta_T'' = \frac{T_a}{M \cdot \left( \frac{5,67 \cdot \Psi_{cp} \cdot F_{ст} \cdot \xi_T \cdot T_a^3}{10^{11} \cdot \varphi \cdot B_p \cdot V_{Ccp}} \right)^{0,6} + 1} - 273, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Согласно вышеприведенной формулы, должен получиться следующий результат:

**температура газов на выходе из топки**, которой Вы задавались в начале расчёта  $\Theta_T''$  должна отличаться от полученной при расчёте по формуле (97) \* не более чем на 100 °С.

То есть, если изначально была принята температура 1200 °С, а затем, в результате расчёта по формуле (97), получили значение, равное 1280 °С, то расчёт считается верным, т.к. для принятой температуры 1200 °С интервал допуска в 100 °С составляет от 1100 до 1300 °С, и, следовательно, полученное значение как раз и находится в этом интервале.

В противном – если разница между температурами составляет более 100 °С следует перезадаваться значением  $\Theta_T''$  и провести повторный расчёт. Причём для достижения требуемого условия (разница между принятой и рассчитанной температурой газов на выходе из топки) может понадобиться несколько раз проводить выбор исходной температуры, и соответственно, проводить расчёты. В таком случае рекомендуется изначально принять две-три температуры и вести расчёты параллельно. Это ускорит и упростит расчёт  $\Theta_T''$ , а так же позволит найти логическую связь в производимых вычислениях для оптимального подбора искомого значения температуры.

Примечания

1\*.

$$k_T = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{r_H \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_T''}{1000} \right), \text{ (83) где}$$

$r_{H_2O}$  - значение объёмной доли водяных паров, значение находится в главе

3, таблице 3.1 для соответствующей поверхности нагрева;

$\gamma_{\text{п}}$  - значение доли трехатомных газов и водяных паров, значение находится в главе 3, таблице 3.1 для соответствующей поверхности нагрева;

$T_{\text{т}}''$  - температура газов на выходе из топки, К. Определяется как  $T_{\text{т}}'' = \Theta_{\text{т}}'' + 273,15$ , К. (101)

$S$  – толщина излучающего слоя, м. Определяется в разделе 6.1.

**См. 2\***

$$k_{\text{зл}} = \frac{43 \cdot \rho_{\text{г}}}{(T_{\text{т}}'' \cdot d_{\text{зл}})^{0,67}}, \quad (84) \text{ где}$$

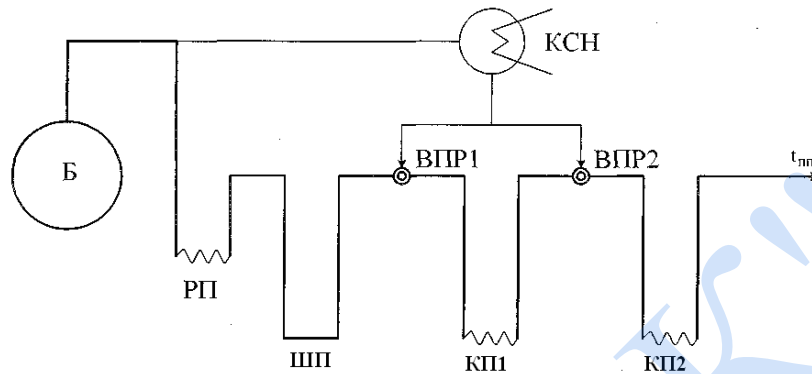
$\rho_{\text{г}}$  – плотность дымовых газов при атмосферном давлении, г/м<sup>3</sup>. Значение определяется по [2], стр. 43 по виду применяемого топлива.

$d_{\text{зл}}$  – эффективный диаметр золовых частиц, мкм. Определяется в зависимости от вида сжигаемого топлива по [2], стр. 43.

## 7 РАСЧЕТ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЬНОГО ТРАКТА

Рисунок 7.1 и 7.2 приведены как пример оформления работы.

Непосредственно для каждого котлоагрегата по его описанию и чертежам принимается схема впрыска и выполняется эскиз пароперегревательного тракта.



Б – Барабан котла; РП – радиационный потолочный пароперегреватель; ШП – ширмовый пароперегреватель; КП1 и КП2 – конвективные пароперегреватели первой и второй ступени; КСН – конденсатор собственных нужд котла; ВПР1 и ВПР2 – первый и второй впрыскивающие парохладители.

Рисунок 7.1 Принципиальная тепловая схема пароперегревательного тракта

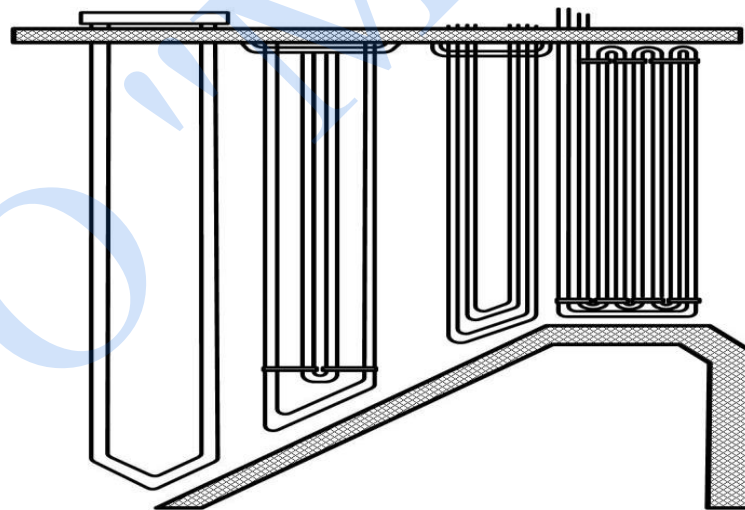


Рисунок 7.2 Эскиз пароперегревательного тракта

Расчёт пароперегревательного тракта осуществляется по ранее полученным данным расчётов, используя описание котлоагрегата и чертежи (продольный и поперечный разрезы). Расчёты ведутся в табличной форме.

## 7.1 Расчет радиационного пароперегревателя

Таблица 7.1 – расчёт радиационного пароперегревателя

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула или обоснование	Расчет
Диаметр и толщина стен труб	$d \times \delta$	мм	По чертежу или описанию котла для данной поверхности нагрева	$d$ – диаметр $\delta$ – толщина стенки
Лучевоспринимающая поверхность РП	$H_{рп}^л$	$m^2$	$H_{рп}^л = H_{пот}^л$	
Коэффициент распределения тепла по высоте топки	$\beta$	—	По табл.4.10 [2] для рассчитываемой поверхности нагрева в зависимости от расположения по высоте.	
Тепловосприятие РП из топки	$Q_{рп}^л$	$\frac{кДж}{кг}$	$\frac{Q_T^л}{H_T^л} \cdot H_{рп}^л \cdot \beta$ (102) $Q_T^л$ – см. раздел 6.2 $H_T^л$ – см. раздел 6.1	
Температура пара на входе в РП	$t'_{рп}$	$^{\circ}C$	По табл. XXII [3] по $R_b$ для влажного насыщенного пара $i''$	
Энтальпия пара на входе в РП	$h'_{рп}$	$\frac{кДж}{кг}$	По табл. XXII [3] по $R_b$ для влажного насыщенного пара $i''$	
Величина впрысков	$D_{впр}$	$\frac{кг}{с}$	$0,07 \cdot D_{пп}$ (103)	
Величина первого впрыска	$D_{впр1}$	$\frac{кг}{с}$	$0,5 \cdot D_{впр}$ (104)	
Величина второго впрыска	$D_{впр2}$	$\frac{кг}{с}$	$D_{впр} - D_{впр1}$ (105)	
Приращение энтальпии пара в РП	$\Delta h_{рп}$	$\frac{кДж}{кг}$	$\frac{Q_{рп}^л \cdot B}{D_{пп} - D_{впр}}$ (106)	
Энтальпия пара на выходе из РП	$h''_{рп}$	$\frac{кДж}{кг}$	$h'_{рп} + \Delta h_{рп}$ (107)	
Температура пара на выходе из РП	$t''_{рп}$	$^{\circ}C$	По табл. XXV [3] по $P_{пп}$ и $h''_{рп}$ с помощью обратной аппроксимации/итерации/экстраполяции по температуре и давлению.	

## 7.2 Расчет ширмового пароперегревателя

### 7.2.1 Конструктивные характеристики ширмового пароперегревателя

Таблица 7.2.1 – конструктивные характеристики ширмового пароперегревателя

Рассчитываемая величина	Обозн.	Разм.	Формула или обоснование	Расчет
Высота ширмы	$h_{\text{шп}}$	м	По чертежу	
Ширина ширмы	$c$	м	По чертежу	
Диаметр и толщина стен труб	$d \times \delta$	мм	По чертежу или описанию котла	$d$ – диаметр наружный $\delta$ – толщина стенки
Шаги:				
-поперечный (между ширмами)	$S_1$	м	По чертежу или описанию котла	
-продольный (между трубами в ширме)	$S_2$	м	По чертежу или описанию котла	
Количество ширм поперек газохода	$n_{\text{шп}}$	шт	$\frac{a}{S_1} - 1$ (108)	
Количество труб в ширме	$n_{\text{тр}}$	шт	$\frac{c}{2 \cdot S_2}$ (109)	
Число параллельно включенных ширм	$n$	шт	$n_{\text{шп}} \cdot n_{\text{тр}}$ (110)	
Полная поверхность нагрева	$H_{\text{шп}}$	м <sup>2</sup>	$2 \cdot h_{\text{шп}} \cdot c \cdot n_{\text{тр}}$ (111)	
Лучевоспринимающая поверхность ШП	$H_{\text{шп}}^{\text{л}}$	м <sup>2</sup>	$H_{\text{шп}}^{\text{л}} = H_{\text{окн}}^{\text{л}}$	
Расчетная поверхность нагрева ШП	$H_{\text{шп}}^{\text{р}}$	м <sup>2</sup>	$H_{\text{шп}} - H_{\text{шп}}^{\text{л}}$	
Живое сечение для прохода газов	$F_{\text{г}}$	м <sup>2</sup>	$F_{\text{окн}} - (h_{\text{шп}} \cdot d \cdot n_{\text{шп}})$ (112) $F_{\text{окн}}$ – см. раздел 6.1	
Живое сечение для прохода пара	$f_{\text{п}}$	м <sup>2</sup>	$\frac{\pi \cdot d_{\text{внутр}}^2 \cdot n}{4}$ (113)	
Толщина излучающего слоя	$S$	м	$\frac{1,8}{\frac{1}{h_{\text{шп}}} + \frac{1}{c} + \frac{1}{S_1}}$ (114)	

## 7.2.2 Тепловой расчёт ширмового пароперегревателя

Таблица 7.2.2 – тепловой расчёт ширмового пароперегревателя

Рассчитываемая величина	Обозн.	Разм.	Формула или обоснование	Расчет
Температура газа на входе в ШП	$\theta'_{\text{шп}}$	°С	$\theta'_{\text{шп}} = \theta''_{\text{т}}$	
Энтальпия газа на входе в ШП	$H'_{\text{шп}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По Н- $\theta$ таблице по $\theta'_{\text{шп}}$ столбце $\alpha_{\text{шп}}$	
Температура пара на входе в ШП	$t'_{\text{шп}}$	°С	$t'_{\text{шп}} = t''_{\text{рп}}$	
Энтальпия пара на входе в ШП	$h'_{\text{шп}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$h'_{\text{шп}} = h''_{\text{рп}}$	
Температура пара на выходе из ШП	$t''_{\text{шп}}$	°С	Принимаем по согласованию с руководителем и рекомендациями [2] в зависимости от вида топлива и конструктивных особенностей котла	
Энтальпия пара на выходе из ШП	$h''_{\text{шп}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По табл. XXV [3] по $P_{\text{шп}}$ и $t''_{\text{шп}}$ с помощью аппроксимации/итерации /экстраполяции по температуре и давлению.	
Коэффициент распределения тепла по высоте топки	$\beta$		По табл. 4.10 [2] для рассчитываемой поверхности нагрева в зависимости от расположения по высоте.	
Лучистое тепло, воспринятое из топки ШП	$Q_{\text{шп}}^{\text{л}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{Q_{\text{т}}^{\text{л}}}{H_{\text{т}}^{\text{л}}} \cdot H_{\text{шп}}^{\text{л}} \cdot \beta$ (115)	
Тепло, воспринятое ШП по уравнению теплового баланса	$Q_{\text{шп}}^{\text{б}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{D_{\text{пп}} - D_{\text{впр}}}{B} \cdot (h''_{\text{шп}} - h'_{\text{шп}}) - Q_{\text{шп}}^{\text{л}}$ (116)	
Энтальпия газов на выходе из ШП	$H''_{\text{шп}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$H'_{\text{шп}} - \frac{Q_{\text{шп}}^{\text{б}}}{\varphi}$ (117)	
Температура газов на выходе из ШП	$\theta''_{\text{шп}}$	°С	По Н- $\theta$ таблице по $H''_{\text{шп}}$ в столбце $\alpha_{\text{шп}}$ с помощью аппроксимации/итерации/экстраполяции	



продолжение таблицы 7.2.2

Средняя температура газов в ШП	$\Theta_{\text{ср}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{\theta'_{\text{шп}} + \theta''_{\text{шп}}}{2}$ (118)	
Средняя температура пара в ШП	$t_{\text{ср}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{t'_{\text{шп}} + t''_{\text{шп}}}{2}$ (119)	
Скорость газов в ШП	$\omega_{\text{г}}$	м/с	$\frac{V_{\text{р}} \cdot V_{\text{г}} \cdot (\Theta_{\text{ср}} + 273)}{273 \cdot F_{\text{г}}}$ (120) см. 1*	
Удельный объем пара	$\nu$	$\text{м}^3/\text{кг}$	По табл. XXV [3] по $P_{\text{шп}}$ и $t_{\text{ср}}$	
Скорость пара в ШП	$\omega_{\text{п}}$	м/с	$\frac{(D_{\text{шп}} - D_{\text{впр}}) \cdot \nu}{f_{\text{п}}}$ (121)	
Коэффициенты ослабления лучей:				
- трехатомными газами	$K_{\text{г}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$\left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_{\text{п}} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{ср}}}{1000} \right)$ (122) см. 3*	
- золовыми частицами (только при сжигании твёрдого топлива)	$K_{\text{зл}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$\frac{43 \cdot \rho_{\text{г}}}{(T_{\text{ср}} \cdot d_{\text{зл}})^{0,67}}$ (123) см. 4*	
- коксовыми частицами (только при сжигании твёрдого топлива)	$K_{\text{к}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	Принимается по стр. 43 [2]	
- сажистыми частицами, образующимися в ядре факела (только при сжигании газа/мазута)	$k_{\text{с}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$0,3 \cdot (0,2 - \alpha_{\text{т}}) \cdot (1,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{г}}'' - 0,5) \cdot \frac{c^{\text{п}}}{H^{\text{п}}}$ (124) ф-ла 4.43 стр. 43 [2] с пояснениями	
- продуктами сгорания (только при сжигании твёрдого топлива)	$k$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$k_{\text{г}} \cdot r_{\text{п}} + k_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{зл}} + k_{\text{к}}$ (125) $r_{\text{п}}$ и $\mu_{\text{зл}}$ – см. раздел 3, табл. 3.1	

продолжение таблицы 7.2.2

- продуктами сгорания (только при сжигании ГМ)	$k$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$k_r \cdot r_{\text{п}} + k_c$ (126) $r_{\text{п}}$ – см. раздел 3, табл. 3.1	
Оптическая толщина излучающего слоя	$k_{\text{PS}}$	—	$k \cdot P \cdot S$ (127) $P = 0,1 \text{ МПа}$ $S$ – см. конструктивные характеристики ШП	
Коэффициент ослабления лучей	$\xi_{\text{ф}}$	—	$1 - e^{-k_{\text{PS}}}$ (128)	
Коэффициент теплоотдачи:				
- конвекцией от поверхности к обогреваемой среде конвекцией от поверхности к обогреваемой среде	$\alpha_2$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\alpha_2 = \alpha_{\text{н}} \cdot c_d$ (129) см. табл. 6.1 [2] для ШП согласно вида топлива и конструктивных характеристик ШП в столбце с названием определяемого коэффициента теплоотдачи	
- излучением продуктов сгорания	$\alpha_{\text{л}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\alpha_{\text{л}} = \alpha_{\text{н}} \cdot \xi$ (130) см. табл. 6.1 [2] для ШП согласно вида топлива и конструктивных характеристик ШП в столбце с названием определяемого коэффициента теплоотдачи	
- конвекцией от газов к поверхности	$\alpha_{\text{к}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\alpha_{\text{к}} = \alpha_{\text{н}} \cdot c_z \cdot c_s \cdot c_{\text{ф}}$ (131) см. табл. 6.1 [2] для ШП согласно вида топлива и конструктивных характеристик ШП в столбце с названием определяемого коэффициента теплоотдачи	
Коэффициент загрязнения	$\varepsilon$	$\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$	В зависимости от вида топлива принимаем по рис.6.15 [2] или по разделу 6.3 (стр. 142) [2]	

окончание таблицы 7.2.2

Коэффициент использования	$\xi$	—	Принимаем по рис.6.17 [2]	
от газов к стенке	$\alpha_1$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\xi \cdot \left( \alpha_k \cdot \frac{\pi \cdot d}{2 \cdot S_2} + \alpha_k \right)$ (132) $x_{\text{III}}$ – рис.5.19, а- кр. 1 [2]	
Коэффициент теплопередачи	$k$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\frac{\alpha_1}{1 + \left( 1 + \frac{Q_{\text{III}}^{\text{л}}}{Q_{\text{III}}^{\text{б}}} \right) \cdot \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \alpha_1}$ (133)	
Температурный напор в ШП	$\Delta t$	$^{\circ}\text{C}$	$\Theta_{\text{ср}} - t_{\text{ср}}$ (134)	
Тепловосприятие ШП по уравнению теплопередачи	$Q_{\text{III}}^{\text{т}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{k \cdot N_{\text{III}}^{\text{п}} \cdot \Delta t}{V_{\text{p}} \cdot 10^3}$ (135) см. 2*	
Отношение величин тепло-восприятий	$\frac{Q_{\text{III}}^{\text{т}}}{Q_{\text{III}}^{\text{б}}}$	%	$\frac{Q_{\text{III}}^{\text{т}}}{Q_{\text{III}}^{\text{б}}} \cdot 100$ (136)	

**Отношение  $\frac{Q_{\text{III}}^{\text{т}}}{Q_{\text{III}}^{\text{б}}} \cdot 100$  должно находиться в пределах 98 - 102 %.**

Если данная величина не попадает в этот интервал допуска – следует провести анализ расчёта, дополнительную проверку математических вычислений, правильность определения всех коэффициентов.

После проведения вышеуказанных рекомендаций производится повторный расчёт.

Примечания

**1\*.**

В данной формуле  $\frac{V_{\text{p}} \cdot V_{\text{Г}} \cdot (\Theta_{\text{ср}} + 273)}{273 \cdot F_{\text{Г}}}$  (120) её составляющие компоненты определяются:

$V_{\text{p}}$  – расчётный расход топлива, кг/с. См. главу 5, таблицу 5.1.

$V_{\text{Г}}$  – полный объем газов, м<sup>3</sup>/кг. Определяется по таблице 3.1 главы 3 для рассчитываемой поверхности нагрева.

Остальные величины из вышеуказанной формулы находятся и определяются в данном разделе, и их нахождение не составляет трудностей.

**2\*.**

В данной формуле (135)  $\frac{k \cdot N_{\text{III}}^{\text{п}} \cdot \Delta t}{V_{\text{p}} \cdot 10^3}$  её составляющие компоненты определяются:

$V_{\text{p}}$  – расчётный расход топлива, кг/с. См. главу 5, таблицу 5.1.

$N_{\text{III}}^{\text{п}}$  - расчетная поверхность нагрева ШП, м<sup>2</sup>. Находится в таблице 7.2 – конструктивные характеристики ШП данного курсового проекта.

Остальные величины из вышеуказанной формулы находятся и определяются в данном разделе, и их нахождение не составляет трудностей.

**3\*.**

Значения в формуле (122)  $\left(\frac{7,8+16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot S}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{cp}}}{1000}\right)$ :

$r_{\text{H}_2\text{O}}$  - значение объёмной доли водяных паров, значение находится в таблице 3.1 главы 3 для рассчитываемой поверхности нагрева (т.е. для столбца  $\alpha_{\text{ПП}}$ );

$r_{\text{H}_2\text{O}}$  - значение объёмной доли водяных паров, значение находится в таблице 3.1 главы 3 для рассчитываемой поверхности нагрева (т.е. для столбца  $\alpha_{\text{ПП}}$ );

$T_{\text{cp}}$  - средняя температура газов в данной поверхности нагрева, К. Определяется как  $T_{\text{cp}} = \Theta_{\text{cp}} + 273,15$ , К. (137)

$S$  - толщина излучающего слоя, м. Определяется в таблице 7.2 – конструктивные характеристики ШП (таблица 7.2.1) главы 7, раздела 7.2.1.

**4\*.**

Значения в формуле  $\frac{43 \cdot \rho_{\text{г}}}{(T_{\text{cp}} \cdot d_{\text{зл}})^{0,67}}$  (123):

$\rho_{\text{г}}$  – плотность дымовых газов при атмосферном давлении, г/м<sup>3</sup>. Значение определяется по [2], стр. 43 по виду топлива.

$d_{\text{зл}}$  – эффективный диаметр золовых частиц, мкм. Определяется в зависимости от вида сжигаемого топлива по [2], стр. 43.

## 7.3 Расчет конвективного пароперегревателя первой ступени

### 7.3.1 Конструктивные характеристики конвективного пароперегревателя первой ступени

Таблица 7.3.1 – Конструктивные характеристики КП1

Рассчитываемая величина	Обозн.	Разм.	Формула или обоснование	Расчет
Диаметр и толщина стен труб	$d \times \delta$	мм	По чертежу или описанию котла для данной поверхности нагрева	$d$ – диаметр наружный $\delta$ – толщина стенки
Шаги:				
- поперечный	$S_1$	м	По чертежу или описанию котла	
- продольный	$S_2$	м	По чертежу или описанию котла	
Количество змеевиков поперек газохода	$n$	шт	$\frac{a}{S_1} - 1$ (138), где $a$ – ширина фронта котла, см. раздел 6.1	
Длина змеевика	$l$	м	По чертежу для данной поверхности нагрева с помощью линейки, нитки или курвиметра	
Полная поверхность нагрева КП1	$H_{КП1}$	м <sup>2</sup>	$\pi \cdot d \cdot n \cdot l \cdot 2$ (139)	
Относительные шаги:				
- поперечный	$\sigma_1$	—	$S_1/d$ (140)	
- продольный	$\sigma_2$	—	$S_2/d$ (141)	
Живое сечение для прохода газов	$F_r$	м <sup>2</sup>	$a \cdot h_r - h_{тр} \cdot n \cdot d$ , (142), где $h_r$ – высота газохода, в месте расположения поверхности нагрева – измерить по чертежу $h_{тр}$ – высота/длина прямого участка поверхности нагрева – измерить по чертежу $a$ – ширина фронта котла, см. раздел 6.1	

окончание таблицы 7.3.1

Живое сечение для прохода пара	$f_{\Pi}$	$\text{м}^2$	$\frac{\pi \cdot d_{\text{внутр}}^2}{4} \cdot n \cdot 2$ (143)	
Толщина излучающего слоя	$S$	$\text{м}$	$0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{d^2} - 1 \right)$ (144)	

УО «МГЭК»

### 7.3.2 Тепловой расчет конвективного пароперегревателя первой ступени

Таблица 7.3.2 – Тепловой расчет КП1

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула или обоснование	Расчет
Температура пара на входе в КП1	$t'_{\text{ВПР1}}$	°С	$t'_{\text{ВПР1}} = t''_{\text{ШП}}$	
Энтальпия пара на входе в КП1	$h'_{\text{ВПР1}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По табл. XXV [3] по $t'_{\text{ВПР1}}$ и $R_{\text{ПП}}$	
Падение энтальпии пара в ВПР1	$\Delta h_{\text{ВПР1}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Задаёмся по согласованию с руководителем	
Энтальпия пара на входе в КП1	$h'_{\text{КП1}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$h'_{\text{ВПР1}} - \Delta h_{\text{ВПР1}}$	
Температура пара на входе в КП1	$t'_{\text{КП1}}$	°С	По табл. XXV [3] по $R_{\text{ПП}}$ и $h'_{\text{КП1}}$	
Температура пара на выходе из КП1	$t''_{\text{КП1}}$	°С	Принимаем по согласованию с руководителем	
Энтальпия пара на выходе из КП1	$h''_{\text{КП1}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По табл. XXV [3] по $R_{\text{ПП}}$ и $t''_{\text{КП1}}$	
Тепловосприятие КП1 по уравнению теплового баланса	$\Theta_{\text{КП1}}^{\text{Б}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{D_{\text{ПП}} - D_{\text{ВПР}}}{V_p} \cdot (h''_{\text{КП1}} - h'_{\text{КП1}})$ (145) $V_p$ – см. раздел 5; $D_{\text{ПП}}$ – см. раздел 5. $D_{\text{ВПР}}$ – см. раздел 7.1	
Температура газа на входе в КП1	$\Theta'_{\text{КП1}}$	°С	$\Theta'_{\text{КП1}} = \Theta''_{\text{ШП}}$	
Энтальпия газа на входе в КП1	$H'_{\text{КП1}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По H- $\Theta$ таблице по $\Theta'_{\text{КП1}}$ в соотв. столбце с помощью итерации/аппроксимации	
Энтальпия газов на вы-ходе из КП1	$H''_{\text{КП1}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$H'_{\text{КП1}} - \frac{\Theta_{\text{КП1}}^{\text{Б}}}{\varphi}$ (146)	
Температура газов на выходе из КП1	$\Theta''_{\text{КП1}}$	°С	По H- $\Theta$ таблице путём обратной аппроксимации/ итерации по $H''_{\text{КП1}}$ в соответствующем столбце	
Средняя температура газов в КП1	$\Theta_{\text{ср}}$	°С	$\frac{\Theta'_{\text{КП1}} + \Theta''_{\text{КП1}}}{2}$ (147)	
Средняя температура пара в КП1	$t_{\text{ср}}$	°С	$\frac{t'_{\text{КП1}} + t''_{\text{КП1}}}{2}$ (148)	
Удельный объем пара	$v$	м <sup>3</sup> /кг	По табл. 25 [3] по $R_{\text{ПП}}$ и $t_{\text{ср}}$	

продолжение таблицы 7.3.2

Скорость газов в КПИ	$\omega_{\Gamma}$	м/с	$\frac{V_p \cdot V_{\Gamma} \cdot (\Theta_{\text{ср}} + 273)}{273 \cdot F_{\Gamma}}$ (149) $V_{\Gamma}$ – см. раздел 3 для рассчитываемой поверхности нагрева $V_p$ – см. раздел 5
Скорость пара в КПИ	$\omega_{\text{п}}$	м/с	$\frac{(D_{\text{ПП}} - D_{\text{ВПП2}}) \cdot v}{f_{\text{п}}}$ (150)
Коэффициенты ослабления лучей:			
- трехатомными газами	$K_{\Gamma}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$\left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_{\text{п}} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{ср}}}{1000} \right)$ (151) см 2*
- золовыми частицами (только при сжигании твёрдого топлива)	$K_{\text{зл}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$\frac{43 \cdot \rho_{\Gamma}}{(T_{\text{ср}} \cdot d_{\text{зл}})^{0,67}}$ (152) см 3*
- коксовыми частицами (только при сжигании твёрдого топлива)	$K_{\text{к}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	Принимается по стр. 43 [2]
сажистыми частицами, образующимися в ядре факела (только при сжигании газа/мазута)	$k_{\text{с}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$0,3 \cdot (0,2 - \alpha_{\text{пп}}) \cdot (1,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{ср}} - 0,5) \cdot \frac{c^{\text{п}}}{H^{\text{п}}}$ (153) ф-ла 4.43 стр. 43 [2] с пояснениями
- продуктами сгорания (только при сжигании твёрдого топлива)	$k$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$k_{\Gamma} \cdot r_{\text{п}} + k_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{зл}} + k_{\text{к}}$ (154)



продолжение таблицы 7.3.2

-продуктами сгорания (только при сжигании ГМ)	$k$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$k_{\Gamma} \cdot r_{\Pi} + k_c$ (155)	
Оптическая толщина излучающего слоя	$kPS$	—	$k \cdot P \cdot S$ (156) $P = 0,1 \text{ МПа}$ $S$ – см. конструктивные характеристики КП1	
Коэффициент ослабления лучей	$\xi_{\Phi}$	—	$1 - e^{-kPS}$ (157)	
-конвекцией от поверхности к обогреваемой среде	$\alpha_2$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\alpha_n \cdot c_d$ (158) см табл. 6.1 [2] для КП1	
-излучен. продуктов сгорания	$\alpha_l$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\alpha_n \cdot \xi$ (159) см табл. 6.1 [2] для КП1	
-конвекцией от газов к поверхности	$\alpha_k$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\alpha_n \cdot c_z \cdot c_s \cdot c_{\Phi}$ (160) см табл. 6.1 [2] для КП1	
Коэффициент загрязнения	$\varepsilon$	$\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$	В зависимости от вида топлива принимаем по рис.6.15 [2] или по разделу 6.3 (стр. 142) [2]	
Коэффициент использования	$\xi$	—	Принимаем по рис.6.17 [2]	
Коэффициент тепловой эффективности	$\psi$	—	Принимаем по табл. 6.4 или 6.5 [2] по виду топлива	
- от газов к стенке	$\alpha_1$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\xi \cdot (\alpha_k + \alpha_l)$ (161)	
Коэффициент теплопередачи	$k$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\psi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$ (162)	
Температурный напор в КП1	$\Delta t$	$^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{ср}} - t_{\text{ср}}$ (163)	
Тепловосприятие КП1 по уравнению теплопередачи	$Q_{\text{КП1}}^T$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{k \cdot N_{\text{КП1}} \cdot \Delta t}{B_p \cdot 10^3}$ (164) см. 1*	

окончание таблицы 7.3.2

Отношение величин тепловосприятий	$\frac{Q_{\text{КП1}}^{\text{T}}}{Q_{\text{КП1}}^{\text{б}}}$	%	$\frac{Q_{\text{КП1}}^{\text{T}}}{Q_{\text{КП1}}^{\text{б}}} \cdot 100$ (165)	
-----------------------------------------	---------------------------------------------------------------	---	----------------------------------------------------------------------------------	--

**Отношение  $\frac{Q_{\text{КП1}}^{\text{T}}}{Q_{\text{КП1}}^{\text{б}}} \cdot 100$ , т.е. находится в пределах 98-102%.**

При расхождении заданной величины более чем  $\pm 2$  % проводится реконструкция с последующим уточнением величин тепловосприятий.

УО «МГЭК»

### 7.3.3 Реконструкция КП 1.

Таблица 7.3.3 – Реконструкция КП1

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула или обоснование	Расчет
Новая площадь поверхности КП1	$H_{\text{КП1}}^{P'}$	$\text{м}^2$	$\frac{Q_{\text{КП1}}^B \cdot B_p \cdot 10^3}{k \cdot \Delta t}$ (166)	
Новая длина змеевика	$l'$	$\text{м}$	$\frac{H_{\text{КП1}}^{P'}}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot d}$ (167)	
Разность длин змеевиков	$\Delta l$	$\text{м}$	$l' - l$ (168)	

По результату расчёта реконструированной поверхности нагрева КП1 необходимо увеличить/уменьшить длину петель змеевика на \_\_\_\_\_ метра.

Примечания.

**1\*.**

В данной формуле (164)  $\frac{k \cdot H_{\text{КП1}} \cdot \Delta t}{B_p \cdot 10^3}$  её составляющие компоненты определяются:

$B_p$  – расчётный расход топлива, кг/с. См. раздел 5.

$H_{\text{КП1}}$  - полная поверхность нагрева КП1,  $\text{м}^2$ . Находится в таблице конструктивные характеристики КП1 (таблица 7.3.1).

Остальные величины из вышеуказанной формулы находятся и определяются в данном разделе, и их нахождение не составляет трудностей.

**2\*.**

Значения в формуле (151)  $\left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_{\text{п}} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{ср}}}{1000} \right)$ :

$r_{\text{H}_2\text{O}}$  - значение объёмной доли водяных паров, значение находится в разделе 3, таблица 3.1 для рассчитываемой поверхности нагрева (для столбца  $\alpha_{\text{ПП}}$ );

$r_{\text{п}}$  - значение доли трехатомных газов и водяных паров, значение находится в разделе 3, таблица 3.1 для рассчитываемой поверхности нагрева (для столбца  $\alpha_{\text{ПП}}$ );

$T_{\text{ср}}$  - средняя температура газов в данной поверхности нагрева, К.

Определяется как  $T_{\text{ср}} = \Theta_{\text{ср}} + 273,15$ , К (169).

$S$  – толщина излучающего слоя, м. Определяется в таблице конструктивных характеристик КП1, т.е. в таблице 7.3.1.

**3\*.**

Значения в формуле (152)  $\frac{43 \cdot \rho_{\text{г}}}{(T_{\text{ср}} \cdot d_{\text{зл}})^{0,67}}$ :

$\rho_{\text{г}}$  – плотность дымовых газов при атмосферном давлении,  $\text{г}/\text{м}^3$ . Значение определяется по [2], стр. 43.

$d_{\text{зл}}$  – эффективный диаметр золовых частиц, мкм. Определяется в зависимости от вида сжигаемого топлива по [2], стр. 43.

## 7.4 Расчет конвективного пароперегревателя второй ступени

### 7.4.1 Конструктивные характеристики конвективного пароперегревателя второй ступени

Таблица 7.4.1 – Конструктивные характеристики КП2

Рассчитываемая величина	Обозн.	Разм.	Формула или обоснование	Расчет
Диаметр и толщина стен труб	$d \times \delta$	мм	По чертежу или описанию котла для данной поверхности нагрева	$d$ – диаметр наружный $\delta$ – толщина стенки
Шаги:				
-поперечный	$S_1$	м	По чертежу или описанию котла	
-продольный	$S_2$	м	По чертежу или описанию котла	
Количество змеевиков поперек газохода	$n$	шт	$\frac{a}{S_1} - 1$ , (170) где $a$ – ширина фронта котла, см. раздел 6	
Длина змеевика	$l$	м	По чертежу для данной поверхности нагрева с помощью линейки, нитки или курвиметра в	
Полная поверхность нагрева КП2	$H_{кп2}$	$m^2$	$\pi \cdot d \cdot n \cdot l \cdot 2$ (180)	
Относительные шаги:				
-поперечный	$\sigma_1$	—	$\frac{S_1}{d}$ (183)	
-продольный	$\sigma_2$	—	$\frac{S_2}{d}$ (182)	
Живое сечение для прохода газов	$F_{г}$	$m^2$	$a \cdot h_{г} - h_{тр} \cdot n \cdot d$ , (184) где $h_{г}$ – высота газохода данной поверхности нагрева $h_{тр}$ – высота/длина прямого участка поверхности нагрева	
Живое сечение для прохода пара	$f_{п}$	$m^2$	$\frac{\pi \cdot d_{внутр}^2}{4} \cdot n \cdot 2$ (185)	
Толщина излучающего слоя	$S$	м	$0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{d^2} - 1 \right)$ (186)	

## 7.4.2 Тепловой расчет конвективного пароперегревателя второй ступени

Таблица 7.4.2 – Тепловой расчет КП2

Рассчитываемая величина	Обозн.	Разм	Формула или обоснование	Расчет
Температура пара на входе в ВПР2	$t'_{впр2}$	°С	$t'_{впр2} = t''_{кп1}$	
Энтальпия пара на входе в ВПР2	$h'_{впр2}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По табл. XXV [3] по $t'_{впр2}$ и $P_{пп}$	
Падение энтальпии пара в ВПР2	$\Delta h_{впр2}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Задаем по согласованию с руководителем	
Энтальпия пара на входе в КП2	$h'_{кп2}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$h'_{впр2} - \Delta h_{впр2}$ (187)	
Температура пара на входе в КП2	$t'_{кп2}$	°С	По табл. XXV [3] по $h'_{кп2}$ и $P_{пп}$	
Температура пара на выходе из КП2	$t''_{кп2}$	°С	При условии, что КП2 является последней поверхностью нагрева перед выходом перегретого пара из котла, то $t''_{кп2} = t_{пп}$ , если после КП2 следует КП3 – то $t''_{кп2}$ принимается по согласованию с руководителем. Данное условие определяется по чертежу и/или описанию котла.	
Энтальпия пара на выходе из КП2	$h''_{кп2}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По табл. XXV [3] по $t''_{кп2}$ и $P_{пп}$	
Тепловосприятие КП2 по уравнению теплового баланса	$\Theta_{кп2}^Б$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{D_{пп}}{V_p} \cdot (h''_{кп2} - h'_{кп1})$ (188) $V_p$ – см. раздел 5; $D_{пп}$ – см. раздел 5	
Температура газа на входе в КП2	$\Theta'_{кп2}$	°С	$\Theta'_{кп2} = \Theta''_{кп1}$	
Энтальпия газа на входе в КП2	$H'_{кп2}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По H- $\Theta$ таблице, по величине $\Theta'_{кп2}$ в соотв. столбце с помощью итерации/аппроксимации.	
Энтальпия газов на выходе из КП2	$H''_{кп2}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$H'_{кп2} - \frac{\Theta_{кп2}^Б}{\varphi}$ (189)	

продолжение таблицы 7.4.2

Температура газов на выходе из КП2	$\theta''_{\text{КП2}}$	°С	По Н- $\theta$ таблице путём обратной аппроксимации/ итерации по $\theta''_{\text{КП2}}$ в соответствующем столбце.
Средняя температура газов в КП2	$\theta_{\text{ср}}$	°С	$\frac{\theta'_{\text{КП2}} + \theta''_{\text{КП2}}}{2}$ (190)
Средняя температура пара в КП2	$t_{\text{ср}}$	°С	$\frac{t'_{\text{КП2}} + t''_{\text{КП2}}}{2}$ (191)
Скорость газов в КП2	$\omega_{\text{Г}}$	м/с	$\frac{V_{\text{р}} \cdot V_{\text{Г}} \cdot (\theta_{\text{ср}} + 273)}{273 \cdot F_{\text{Г}}}$ (192) <small><math>V_{\text{Г}}</math> – см. раздел 3 для рассчитываемой поверхности нагрева <math>V_{\text{р}}</math> – см. раздел 5</small>
Удельный объем пара	$\nu$	м <sup>3</sup> /кг	По табл.25 [3] по $P_{\text{ПП}}$ и $t_{\text{ср}}$
Скорость пара в КП2	$\omega_{\text{П}}$	м/с	$\frac{D_{\text{ПП}} \cdot \nu}{f_{\text{П}}}$ (193)
Коэффициенты ослабления лучей:			
- трехатомными газами	$K_{\text{Г}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$\left( \frac{7,8+16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_{\text{П}} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{ср}}}{1000} \right)$ (194) см. 2*
-ЗОЛОВЫМИ частицами (только при сжигании твёрдого топлива)	$K_{\text{ЗЛ}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$\frac{43 \cdot \rho_{\text{Г}}}{(T_{\text{ср}} \cdot d_{\text{ЗЛ}})^{0,67}}$ (195) см 3*
-КОКСОВЫМИ частицами (только при сжигании твёрдого топлива)	$K_{\text{К}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	Принимается по стр. 43 [2]
сажистыми частицами, образующимися в ядре факела (только при сжигании газа/мазута)	$k_{\text{С}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$0,3 \cdot (0,2 - \alpha_{\text{ПП}}) \cdot (1,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{ср}} - 0,5) \cdot \frac{C_{\text{П}}}{H_{\text{П}}}$ (196) ф-ла 4.43 стр. 43 [2] с пояснениями
-продуктами сгорания (только при сжигании твёрдого топлива)	$k$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$k_{\text{Г}} \cdot r_{\text{П}} + k_{\text{ЗЛ}} \cdot \mu_{\text{ЗЛ}} + k_{\text{К}}$ (197)

окончание таблицы 7.4.2

Коэффициент ослабления лучей	$\xi_{\phi}$	—	$1 - e^{-kPS}$ (198)	
Коэффициенты теплоотдачи:				
-конвекцией от поверхности к обогреваемой среде	$\alpha_2$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\alpha_H \cdot C_d$ (199) см табл. 6.1 [2] для КП2	
-излучен. продуктов сгорания	$\alpha_L$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\alpha_H \cdot \xi$ (200) см табл. 6.1 [2] для КП2	
-конвекцией от газов к поверхности	$\alpha_K$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\alpha_H \cdot C_z \cdot C_s \cdot C_{\phi}$ (201) см табл. 6.1 [2] для КП2	
Коэффициент загрязнения	$\varepsilon$	$\frac{м^2 \cdot К}{Вт}$	В зависимости от вида топлива принимаем по рис.6.15 [2] или по разделу 6.3 (стр. 142) [2]	
Коэффициент использования	$\xi$	—	Принимаем по рис.6.17 [2]	
Коэффициент тепловой эффективности	$\psi$	—	Принимаем по табл. 6.4 или 6.5 [2] по виду топлива	
- от газов к стенке	$\alpha_1$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\xi \cdot (\alpha_K + \alpha_L)$ (202)	
Коэффициент теплопередачи	$k$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\psi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$ (203)	
Температурный напор в КП2	$\Delta t$	$^{\circ}C$	$\theta_{cp} - t_{cp}$ (204)	
Тепловосприятие КП2 по уравнению теплопередачи	$Q_{КП2}^T$	$\frac{кДж}{кг}$	$\frac{k \cdot H_{КП2} \cdot \Delta t}{B_p \cdot 10^3}$ (205) см. 1*	
Отношение величин тепловосприятий	$\frac{Q_{КП2}^T}{Q_{КП2}^6}$	%	$\frac{Q_{КП2}^T}{Q_{КП2}^6} \cdot 100$ (206)	

**Отношение  $\frac{Q_{КП2}^T}{Q_{КП2}^6} \cdot 100$ , т.е. находится в пределах 98-102%.**

При расхождении заданной величины более чем  $\pm 2\%$  проводится реконструкция с последующим уточнением величин тепловосприятий.

### 7.4.3 Реконструкция КП2 (при необходимости)

Таблица 7.4.3 – Реконструкция КП2

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула или обоснование	Расчет
Новая площадь поверхности КП2	$H_{\text{КП2}}^{p'}$	$\text{м}^2$	$\frac{Q_{\text{КП2}}^B \cdot V_p \cdot 10^3}{k \cdot \Delta t}$ (207)	
Новая длина змеевика	$l'$	$\text{м}$	$\frac{H_{\text{КП2}}^{p'}}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot d}$ (208)	
Разность длин змеевиков	$\Delta l$	$\text{м}$	$l' - l$ (209)	

По результату расчёта реконструированной поверхности нагрева КП2 необходимо увеличить/уменьшить длину петель змеевика на \_\_\_\_\_ метра.

Примечания.

**1\*.**

В данной формуле (205)  $\frac{k \cdot H_{\text{КП2}} \cdot \Delta t}{V_p \cdot 10^3}$  её составляющие компоненты определяются:

$V_p$  – расчётный расход топлива, кг/с. См. раздел 5.

$H_{\text{КП2}}$  - полная поверхность нагрева КП2,  $\text{м}^2$ . Находится в таблице конструктивных характеристики КП2 (таблица 7.4.1).

Остальные величины из вышеуказанной формулы находятся и определяются в расчёте данного раздела, и их нахождение не составляет трудностей.

**2\*.**

Значения в формуле (194)  $\left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_{\text{п}} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{ср}}}{1000} \right)$ :

$r_{\text{H}_2\text{O}}$  - значение объёмной доли водяных паров, значение находится в разделе 3, таблица 3.1 для рассчитываемой поверхности нагрева (для столбца  $\alpha_{\text{ПП}}$ );

$r_{\text{п}}$  - значение доли трехатомных газов и водяных паров, значение находится в разделе 3, таблица 3.1 для рассчитываемой поверхности нагрева (для столбца  $\alpha_{\text{ПП}}$ );

$T_{\text{ср}}$  - средняя температура газов в данной поверхности нагрева, К.

Определяется как  $T_{\text{ср}} = \Theta_{\text{ср}} + 273,15$ , К. (210)

$S$  – толщина излучающего слоя, м. Определяется в таблице конструктивных характеристик КП2 (таблица 7.4.1).



**3\*.**

Значения в формуле (195)  $\frac{43 \cdot \rho_{\Gamma}}{(T_{\text{ср}} \cdot d_{\text{зл}})^{0,67}}$ :

$\rho_{\Gamma}$  – плотность дымовых газов при атмосферном давлении, г/м<sup>3</sup>. Значение определяется по [2], стр. 43.

$d_{\text{зл}}$  – эффективный диаметр золовых частиц, мкм. Определяется в зависимости от вида сжигаемого топлива по [2], стр. 43.

УО «МГЭК»

## 8 РАСЧЕТ ЭКОНОМАЙЗЕРА ВТОРОЙ СТУПЕНИ

### 8.1 Конструктивные характеристики экономайзера второй ступени

Таблица 8.1 – Конструктивные характеристики ЭК2

Рассчитываемая величина	Обозн.	Разм.	Формула или обоснование	Расчет
Диаметр и толщина стен труб	$d \times \delta$	мм	По чертежу или описанию котла для данной поверхности нагрева	$d$ – диаметр наружный $\delta$ – толщина стенки
Шаги:				
-поперечный	$S_1$	м	По чертежу или описанию котла	
-продольный	$S_2$	м	По чертежу или описанию котла	
Относительные шаги:				
-поперечный	$\sigma_1$	—	$\frac{S_1}{d}$ (211)	
-продольный	$\sigma_2$	—	$\frac{S_2}{d}$ (212)	
Количество труб в ряду	$Z_1$	шт.	По чертежу или описанию котла	
Количество рядов	$Z_2$	шт.	По чертежу или описанию котла	
Число параллельно включенных труб	$n$	шт	$Z_1 \cdot Z_2$ (213)	
Длина змеевика	$L$	м	По чертежу с помощью линейки, нитки, курвиметра для соответствующей поверхности нагрева	
Полная поверхность нагрева	$H_{ЭК2}$	м <sup>2</sup>	$\pi \cdot d \cdot n \cdot l$ (214)	
Ширина газохода	$a$		По чертежу	
Глубина газохода	$b$		По чертежу	

окончание таблицы 8.1

Живое сечение для прохода газов	$F_{\Gamma}$	$M^2$	$a \cdot h_{\Gamma} - h_{\Gamma p} \cdot n \cdot d,$ (215) где $h_{\Gamma}$ – высота газохода данной поверхности нагрева $h_{\Gamma p}$ – высота/длина прямого участка поверхности нагрева	
Живое сечение для прохода воды	$f_{\text{в}}$	$M^2$	$\frac{\pi \cdot d_{\text{внутр}}^2}{4} \cdot n \cdot 2$ (216)	
Толщина излучающего слоя	$S$	$M$	$0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{d^2} - 1 \right)$ (217)	

## 8.2 Тепловой расчет экономайзера второй ступени

Таблица 8.2 – Тепловой расчет ЭК 2

Рассчитываемая величина	Обозн	Разм	Формула или обоснование	Расчет
Температура воды на входе в ЭК2	$t'_{ВП2}$	°С	$t'_{ВП2} = t''_{ВП1}$ или согласно компоновке поверхностей нагрева в конвективной шахте котла – см. чертёж/описание котла	
Энтальпия воды на входе в ЭК2	$h'_{ВП2}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$t'_{ВП2} = t''_{ВП1}$ по $P_{ЭК}$ и $h'_{ЭК2}$ по табл. табл. XXIV [3]	
Температура газа на входе в ЭК2	$\Theta'_{ЭК2}$	°С	$\Theta'_{ЭК2} = \Theta''_{КП2}$ или согласно компоновке поверхностей нагрева в конвективной шахте котла – см. чертёж/описание котла	
Энтальпия газа на входе в ЭК2	$H'_{ЭК2}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По $H-\Theta$ таблице по $\Theta'_{ЭК2}$ в соотв. столбце с помощью итерации/ аппроксимации	
Температура воды на выходе из ЭК 2	$t''_{ВП2}$	°С	Принимаем по $P_B$ табл. XXIII [3]	
Энтальпия воды на выходе из ЭК 2	$h''_{ВП2}$	°С	Принимаем по $P_B$ табл. XXIII [3]	
Тепловосприятие ЭК 2 по уравнению теплового баланса	$Q_{ЭК2}^Б$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{D_{пп}}{B} \cdot (h''_{ЭК2} - h'_{ЭК2})$ (218)	
Энтальпия газов на выходе из ЭК 2	$H''_{ЭК2}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$H'_{ЭК2} - \frac{\Theta_{ЭК2}^Б}{\varphi}$ (219)	
Температура газа на выходе за ЭК 2	$\Theta''_{ЭК2}$	°С	По $H-\Theta$ таблице путём обратной аппроксимации/ итерации по $H''_{ЭК2}$ в соответствующем столбце	
Средняя температура газов в ЭК 2	$\Theta_{ср}$	°С	$\frac{\Theta'_{ЭК2} + \Theta''_{ЭК2}}{2}$ (220)	

продолжение таблицы 8.2

Средняя температура воды в ЭК 2	$t_{cp}$	°C	$\frac{t'_{ЭК2} + t''_{ЭК2}}{2}$ (221)	
Скорость газов в ЭК 2	$\omega_r$	м/с	$\frac{V_p \cdot V_r \cdot (\theta_{cp} + 273)}{273 \cdot F_r}$ (222) $V_r$ – см. раздел 3 для рассчитываемой поверхности нагрева $V_p$ – раздел 5	
Коэф. ослабления лучей:				
- трехатомными газами	$K_r$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$\left( \frac{7,8 + 16 \cdot \gamma_{H_2O}}{\sqrt{\gamma_n \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{cp}}{1000} \right)$ (223) см. 2*	
-золотыми частицами (только при сжигании твёрдого топлива)	$K_{зл}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$\frac{43 \cdot \rho_r}{(T_{cp} \cdot d_{зл})^{0,67}}$ (224) см 3*	
-коксовыми частицами (только при сжигании твёрдого топлива)	$K_k$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	Принимается по стр. 43 [2]	
сажистыми частицами, образующимися в ядре факела (только при сжигании газа/мазута)	$k_c$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$0,3 \cdot (0,2 - \alpha_{пн}) \cdot (1,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_{cp} - 0,5) \cdot \frac{c^p}{H^p}$ (225) ф-ла 4.43 стр. 43 [2] с пояснениями	
-продуктами сгорания (только при сжигании твёрдого топлива)	$k$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$k_r \cdot r_n + k_{зл} \cdot \mu_{зл} + k_k$ (225)	
-продуктами сгорания (только при сжигании ГМ)	$k$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	$k_r \cdot r_n + k_c$ (225)	
Оптическая толщина излучающего слоя	$kPS$	—	$k \cdot P \cdot S$ (226) $P = 0,1 \text{ МПа}$ $S$ – см. конструктивные характеристики ЭК2	

продолжение таблицы 8.2

Коэффициент ослабления лучей	$\xi_{\phi}$	—	$1 - e^{-kPS}$ (227)	
Коэффициенты теплоотдачи:				
-излучением продуктов сгорания	$\alpha_{\text{л}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	см. табл. 6.1 [2] для ЭК по виду топлива и в зависимости от конструкции ЭК	
Коэффициент загрязнения	$\xi$	—	Принимаем по рис.6.17 [2]	
-конвекцией от газов к поверхности	$\alpha_{\text{к}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	см. табл. 6.1 [2] для ЭК по виду топлива и в зависимости от конструкции ЭК	
Коэффициент загрязнения	$\varepsilon$	$\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$	В зависимости от вида топлива принимаем по рис.6.15 [2] или по разделу 6.3 (стр. 142) [2]	
Коэффициент тепловой эффективности	$\psi$	—	—	
- от газов к стенке	$\alpha_1$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	см. табл. 6.1 [2] для ЭК по виду топлива и в зависимости от конструкции ЭК	
Коэффициент теплопередачи	$k$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	см. табл. 6.1 [2] для ЭК по виду топлива и в зависимости от конструкции ЭК	
Температурный напор в ЭК 2	$\Delta t$	$^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{ср}} - t_{\text{ср}}$ (228)	
Тепловосприятие ЭК 2 по уравнению теплопередачи	$Q_{\text{ЭК2}}^{\text{T}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{k \cdot H_{\text{ЭК2}} \cdot \Delta t}{B_p \cdot 10^3}$ (229) см. 1*	

окончание таблицы 8.2

Отношение величин тепловосприятий	$\frac{Q_{\text{ЭК2}}^{\text{T}}}{Q_{\text{ЭК2}}^{\text{б}}}$	%	$\frac{Q_{\text{ЭК2}}^{\text{T}}}{Q_{\text{ЭК2}}^{\text{б}}} \cdot 100$ (230)	
-----------------------------------	---------------------------------------------------------------	---	----------------------------------------------------------------------------------	--

**Отношение  $\frac{Q_{\text{ЭК2}}^{\text{T}}}{Q_{\text{ЭК2}}^{\text{б}}} \cdot 100$  должно находиться в пределах 98-102%. При расхождении заданной величины более чем  $\pm 2$  % проводится реконструкция с последующим уточнением величин тепловосприятий по аналогии с пунктом 7.4.3 с подстановкой соответствующих величин и обозначений для ЭК2.**

Примечания.

**1\*.**

В данной формуле (229)  $\frac{k \cdot N_{\text{ЭК2}} \cdot \Delta t}{V_{\text{p}} \cdot 10^3}$  её составляющие компоненты определяются:

$V_{\text{p}}$  – расчётный расход топлива, кг/с. См раздел 5.

$N_{\text{ЭК2}}$  - расчетная поверхность нагрева ЭК, м<sup>2</sup>. Находится в таблице 8.1 – конструктивные характеристики ЭК2.

Остальные величины из вышеуказанной формулы находятся и определяются в разделе, и их нахождение не составляет трудностей.

**2\*.**

Значения в формуле (223)  $\left( \frac{7,8+16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_{\text{п}} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{cp}}}{1000} \right)$ :

$r_{\text{H}_2\text{O}}$  - значение объёмной доли водяных паров, значение находится в таблице 3.1 раздела 3 для рассчитываемой поверхности нагрева, то есть для столбца  $\alpha_{\text{ЭК2}}$ ;

$r_{\text{п}}$  - значение доли трехатомных газов и водяных паров, значение находится в таблице 3.1 раздела 3 для рассчитываемой поверхности нагрева, то есть для столбца  $\alpha_{\text{ЭК2}}$ ;

;

$T_{\text{cp}}$  - средняя температура газов в данной поверхности нагрева, К. Определяется как  $T_{\text{cp}} = \Theta_{\text{cp}} + 273,15$ , К. (231)

$S$  – толщина излучающего слоя, м. Определяется в таблице конструктивных характеристик ЭК2, т.е. в таблице 8.1.

**3\*.**

Значения в формуле (224)  $\frac{43 \cdot \rho_{\text{г}}}{(T_{\text{cp}} \cdot d_{\text{зл}})^{0,67}}$ :

$\rho_{\text{г}}$  – плотность дымовых газов при атмосферном давлении, г/м<sup>3</sup>. Значение определяется по [2], стр. 43.

$d_{\text{зл}}$  – эффективный диаметр золовых частиц, мкм. Определяется в зависимости от вида сжигаемого топлива по [2], стр. 43.

## 9 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЁТНОЙ НЕВЯЗКИ БАЛАНСА ТЕПЛОТЫ ПАРОВОГО КОТЛА

Таблица 9.1 – расчётная невязка баланса теплоты котельного агрегата

Расчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Формула или обоснование	Расчет
Невязка теплового баланса	$\Delta Q$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\Delta Q$ – см формулу (234)	
Относительная невязка баланса	$\frac{\Delta Q}{Q_P^p}$	%	$\frac{\Delta Q}{Q_P^p} = \frac{\Delta Q}{Q_P^p} \cdot 100$ (233)	

\*

$$\Delta Q = \frac{Q_p^p \cdot \eta_{ка}}{100} - (Q_T^l + Q_{шп}^b + Q_{кп1}^b + Q_{кп2}^b + Q_{эк2}^b) \cdot \frac{(100 - q_4)}{100}, \quad (234)$$

где

- величина  $Q_p^p$  принимается из раздела 5, таблицы 5.1;
- величины  $Q_T^l$ ,  $Q_{шп}^b$ ,  $Q_{кп1}^b$ ,  $Q_{кп2}^b$ ,  $Q_{эк2}^b$  принимаются в соответствующих разделах курсового проекта;
- $q_4$  – таблица 5.1, раздела 5;
- $\eta_{ка}$  – таблица 5.1, раздела 5.

**Значение  $\frac{\Delta Q}{Q_P^p} \cdot 100$  должно находиться в пределах +/- 0,5 %.**

При выходе значения за указанные пределы необходимо проверить проведённые ранее расчёты, их математическую правильность выполнения, принятые коэффициенты и т.д.

В случае, если после проверки и уточнения расчётных величин, проведения проверочных расчётов, итоговое значение всё равно не попадает в указанный выше интервал соответствия, необходимо обратиться к руководителю курсового проекта для консультации.



## 10 СВОДНАЯ ТАБЛИЦА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА

Таблица 10.1 – расчётная невязка баланса теплоты котельного агрегата

Поверхность Параметр	Топка	РП	ШП	КП1	КП2	ЭК2
Температура газов на входе, $\Theta'$ °С	---	---	***	***	***	***
Температура газов на выходе, $\Theta''$ °С	***	---	***	***	***	***
Температура среды на входе, $t'$ °С	---	***	***	***	***	***
Температура среды на выходе, $t''$ °С	---	***	***	***	***	***

Заполнение таблицы 10.1 производится согласно ранее рассчитанным данным в курсовом проекте.

Заполняются только те ячейки, которые выделены \*\*\*.

Значение температуры газов на выходе из топки принимается из расчёта формулы (97).

Заполнение ячеек таблицы температур дымовых газов по поверхностям нагрева котла проводятся следующим образом: например, для ШП, величина температуры дымовых газов на входе определяется из раздела 7, пункта 7.2.2, таблицы 7.2.2 по величине  $\theta'_{шп}$ . Соответственно, температура дымовых газов выходе из ШП – определится аналогичным способом, и будет соответствовать значению  $\theta''_{шп}$ . Далее – с использованием методики описанной выше, заполняются соответствующие ячейки для КП1, КП2, ЭК2.

Температура [рабочей] среды на входе и на выходе из каждой поверхности нагрева определяется согласно расчётным данным как указано в примере для дымовых газов. Разница состоит в том, что принимаются температуры рабочих сред – воды и пара. Так, температура пара на входе в РП определится из раздела 7, пункта 7.1, таблицы 7.1 по величине  $t'_{рп}$ . Температура пара на выходе из РП – по значению  $t''_{рп}$ .

После заполнения таблицы 10.1 расчёт считается завершённым.

## 11 СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. М.И. Резников, Ю.М. Липов. Паровые котлы тепловых электростанций. М. Энергоатомиздат, 1987
2. Ю.М. Липов, Ю.Ф. Самойлов, Т.В. Виленский. Компоновка и тепловой расчет парового котла. М. М. Энергоатомиздат, 1988
3. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Санкт-Петербург, 1998

УО «МГЭК»