

НЕГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра Энергетики

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебно-методической работе

к.ф.н. Яблоновская Т.В.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Учебно-методический комплекс**

**Раздел Методические указания к выполнению курсовой работы**

учебное пособие, практикум или иное

**по дисциплине**

Котельные установки и парогенераторы

наименование дисциплины

**для студентов по направлению подготовки**

13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

код, наименование направления (специальности)

Зав. кафедрой

К.т.н., доцент Антаненкова Ирина Сергеевна

уч. степень, уч. звание, ФИО

\_\_\_\_\_

подпись

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Разработчик (составитель) УМК

К.т.н., доцент Шацких Юлия Владимировна

уч. степень, уч. звание, ФИО

\_\_\_\_\_

подпись

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Москва, 2016 г.

## Оглавление

1. Цели и задачи выполнения курсовой работы.....	3
2. Исходные данные.....	3
3. Требования к выполнению курсовой работы.....	4
4. Содержание курсовой работы.....	5
5. Методика выполнения курсовой работы.....	6
5.1. Характеристики топлива .....	6
5.2. Определение коэффициента избытка воздуха.....	6
5.3. Определение объемов и энтальпии продуктов сгорания топлив.....	7
5.4. Тепловой баланс, КПД брутто .....	11
5.5. Расход топлива .....	12
5.6. Расчет теплообмена в топке.....	13
5.7. Тепловой расчет конвективных котельного пучка .....	20
5.8. Экономайзер.....	25
5.8.1. Расчет чугунного экономайзера .....	27
5.8.2. Расчет стального экономайзера .....	29
Рекомендуемая литература .....	31

# 1. Цели и задачи выполнения курсовой работы

Основной целью курсовой работы является приобретение студентами практических навыков теплового расчета котельных агрегатов.

В процессе выполнения курсовой работы студент решает следующие задачи: знакомится с конструкциями современных котельных агрегатов низкого давления, знакомится с нормативными и справочными материалами по расчету котельных агрегатов, осваивает методику поверочного и конструктивного расчета поверхностей нагрева.

Курсовая работа выполняется в течение 8 семестра. Рекомендуется следующий график выполнения курсовой работы (таблица 1).

Таблица 1 – График выполнения курсовой работы

Раздел курсовой работы	Срок выполнения
1. Получение задания, анализ исходных данных	1 неделя
2. Расчет объемов и энтальпий продуктов сгорания топлива	2-3 неделя
3. Составление теплового баланса, определение КПД и расхода топлива	4-5 неделя
4. Расчет топочной камеры	6-7 неделя
5. Расчет котельных пучков	8-9 неделя
6. Расчет экономайзера	10-11 неделя
7. Выполнение графической части проекта	12-15 неделя
8. Предоставление курсовой работы на проверку	16-17 неделя

## 2. Исходные данные

Задание на курсовую работу студент выбирает по таблице вариантов (таблица 2) согласно предпоследней и последней цифрам учебного шифра.

**Пример.** ИНС студента: 001-03553. Предпоследняя цифра: 5. Последняя цифра: 3. Следовательно, по данным таблицы 2: тип котла - ДКВР-6,5-23 С, тип топки - ПТЛ-РПК, топливо - Ирша-Бородинское 2Б, температура уходящих газов - 155 °С, продувка - 3 %.

Недостающие данные студент выбирает самостоятельно в соответствии с имеющимися в литературе рекомендациями. По согласованию с кафедрой отдельным студентам могут быть выданы индивидуальные задания, связанные с особенностями их производственной деятельности. Например, выполнить тепловой расчет водогрейного котла, котла-утилизатора и др.).

Тепловой расчет выполняется для распространенных типов котлов, при этом расчёт топки и котельных пучков выполняется поверочным методом, расчет экономайзера – конструктивным. Характеристики котельных агрегатов указаны в таблице 3.

Результаты работы отражаются в расчетно-пояснительной записке и в чертежах (два листа формата А1): продольный разрез котла в масштабе 1:20 и продольный разрез экономайзера. Металлические лестницы и площадки для обслуживания котлоагрегата чертить не следует. Арматуру и garnитуру котла и короба для подвода воздуха вычертить обязательно.

Для получения положительной оценки студенту необходимо правильно выполнить все разделы курсовой работы (см. таблицу 1). После проверки курсовой работы преподавателем и обнаружения ошибок, работа возвращается студенту на доработку. Повторная сдача работы на проверку происходит в течение двух недель.

Таблица 2 – Исходные данные

Предпоследняя цифра	Последняя цифра	Тип котла	Тип топки	Топливо	Температура уходящих газов, °С	Продукция, %
1, 3, 5, 7, 9	1	ДКВР-6,5-13 С	ПТЛ-РПК	Кузнецкий Д	160	2,0
	2	ДКВР-6,5-13 С	ТЛЗ	Подмосковный 2Б	165	2,5
	3	ДКВР-6,5-23 С	ПТЛ-РПК	Ирша-Бородинское 2Б	155	3,0
	4	ДКВР-6,5-23 С	ТЛЗ	Кизеловский Г	150	1,5
	5	ДКВР-10-13 С	ПТЛ-РПК	Воркутинское Ж	145	2,0
	6	ДКВР-10-13 С	ТЛЗ	Назаровское 2Б	155	2,5
	7	ДКВР-10-23 С	ПТЛ-РПК	Интинское Д	140	3,0
	8	ДКВР-10-23 С	ТЛЗ	Артемовское 3Б	150	1,5
	9	ДКВР-20-13 С	ТЧЗ	Челябинский 3Б	180	2,5
	0	ДКВР-20-23 С	ТЧЗ	Межреческое ГЖ	175	3,0
2, 4, 6, 8, 0	1	ДКВР-6,5-13 ГМ	Газомазутная	Малосернистый мазут	190	2,0
	2	ДКВР-6,5-23 ГМ		Природный газ (Уренгой-Ужгород)	160	2,5
	3	ДКВР-10-13 ГМ		Природный газ (Саратов -Москва)	145	3,0
	4	ДКВР-10-23 ГМ		Мазут сернистый	175	1,5
	5	ДКВР-20-13 ГМ		Природный газ (Оренбург-Александров Гай)	140	2,0
	6	ДКВР-20-23 ГМ		Мазут высокосернистый	180	2,5
	7	ДЕ-16-14 ГМ-О		Природный газ (Промыслов-Астрахань)	145	3,0
	8	ДЕ-16-24 ГМ-О		Природный газ (Шебекинка-Москва)	145	1,5
	9	ДЕ-25-14 ГМ-О		Мазут сернистый	170	2,5
	0	ДЕ-25-24 ГМ-О		Природный газ (Уренгой-Новопсков)	140	3,0

Таблица 3 – Характеристики котельных агрегатов

Тип котла	ДКВР-6,5-13, ДКВР-6,5-23	ДКВР-10-13, ДКВР-10-23	ДКВР-20-13, ДКВР-20-23	ДЕ-16-14 ГМ, ДЕ-16-24 ГМ	ДЕ-25-14 ГМ, ДЕ-25-24 ГМ
Паропроизводительность, т/ч	6,5	10,0	20,0	16	25
Избыточное давление пара, МПа	1,3/2,3	1,3/2,3	1,3/2,3	1,4/2,4	1,4/2,4
Объем топки и камеры догорания, м <sup>3</sup>	20,4	39,3	43,0	22,5	29,0
Площадь поверхности зеркала горения, м <sup>2</sup>	6,3	8,7	12,9	–	–
Площадь поверхности нагрева –топки, м <sup>2</sup>	27,9	47,9	51,3	48,13	60,46
– котельных пучков, м <sup>2</sup>	197,4	229,1	357,4	154,0	209,8
Живое сечение для прохода газов в котельном пучке, м <sup>2</sup>	1,24	1,28	2,84	1,18	1,18
Температура пара	Насыщенный				
Температура питательной воды, °С	100				

### 3. Требования к выполнению курсовой работы

Методические указания содержат основные рекомендации, отражающие особенности проектно-конструктивного расчета котельного агрегата.

Курсовая работа оформляется в виде расчетно-пояснительной записки, набранной на ПК в редакторе Word шрифтом Times New Roman, размер шрифта 14 кегль, межстрочный интервал - 1,5.

Желательный объем пояснительной записки 35-40 страниц формата А4.

Пояснительная записка составляется последовательно в соответствии с содержанием работы. Текст работы следует делить на разделы. Каждый раздел начинается с новой страницы. Разделы следует нумеровать арабскими цифрами и записывать с абзацного отступа с прописной буквы. Заголовки выделяют жирным шрифтом, точку в конце заголовка не ставить.

Иллюстрации, таблицы должны иметь нумерацию соответствующего раздела, и пояснительные данные, например: Рисунок 1 – Расчетная схема топочной камеры. При переносе таблицы на другой лист над ней помещают слова «Продолжение таблицы» с указанием номера в левом верхнем углу.

Все расчеты должны иметь соответствующие объяснения и комментарии, а также ссылки на использованные источники, которые следует приводить в квадратных скобках.

Приложения оформляются как продолжение данного документа на последующих его листах. В тексте работы должны быть ссылки на все приложения. Каждое приложение начинается с новой страницы с указанием наверху справа страницы слова «Приложение», его обозначения и наименования отдельной строкой.

При оформлении курсовой работы соблюдают поля текста: слева - 25 мм, сверху и снизу - 20мм, справа - 15 мм.

Нумерация страниц должна быть сквозной, первой страницей считается титульный лист, номер страницы на нем не ставится. Обозначение страниц начинается со второго листа.

### 4. Содержание курсовой работы

Расчетная часть курсовой работы включает:

- выбор коэффициента избытка воздуха на выходе из топки и величин присосов воздуха по газоходам котла;
- расчет объемов и энтальпий продуктов сгорания топлива (составление  $H-t$  таблицы);
- определение составляющих теплового баланса и КПД брутто котла;
- определение расхода топлива;
- тепловой расчет топки;
- расчет теплообмена в конвективных поверхностях: котельных пучках и водяном экономайзере.

## 5. Методика выполнения курсовой работы

### 5.1. Характеристики топлива

Элементарный состав рабочей массы твердого и жидкого топлив берется из прил. I, III [2], а состав природных газов - из прил. II [2]. Там же приведены значения теплоты сгорания топлива  $Q_H^p$ , кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>).

### 5.2. Определение коэффициента избытка воздуха

Значение коэффициента избытка воздуха на выходе из топки  $\alpha_T$  выбирается в зависимости от конструкции топочного устройства из таблицы 4.

Таблица 4 – Расчетные характеристики топочных камер

Топливо	Коэффициент избытка воздуха за топкой $\alpha_T$	Удельная нагрузка		Потеря теплоты от неполноты горения, %		Доля золы топлива в уносе, %							
		зеркала горения, кВт/м <sup>2</sup>	топочно-го объема, кВт/м <sup>3</sup>	химической $q_3$	механической* $q_4$								
<b>Топки с ленточными питателями и решеткой с поворотными колосниками (ПТЛ-РПК)</b>													
Тип каменного угля:													
– кузнецкий Г и Д ( $A^p = 0,3$ )	1,35–1,5	930 – 1160	230 – 250	0,5 – 1,0	5,5/3	16/7							
– донецкий Г и Д ( $A^p = 0,8$ )					6,5/4,5	13/6							
– кузнецкий 1СС ( $A^p = 0,4$ )					11/5	16/7							
Тип бурого угля:													
– ирша-бородинский ( $W^p = 2,1; A^p = 0,4$ )		930 – 1160			810 – 1040	290 – 460	0,5 – 1,0	6/3	22/9,5				
– артемовский ( $W^p = 1,8; A^p = 1,0$ )								5,5/4	15/7				
– веселовский ( $W^p = 2,0; A^p = 1,5$ )								8/6,5	12,5/5,5				
– харанорский ( $W^p = 3,2; A^p = 0,7$ )								7,5/5	15/7				
– подмосковный ( $W^p = 3,0; A^p = 2,1$ )								9/7,5	10,5/5				
<b>Топки с пневмомеханическими забрасывателями и цепной решеткой обратного хода (ТЧЗ, ТЛЗ)</b>													
Тип каменного угля:													
– кузнецкий Г и Д ( $A^p = 0,3$ )	1,3–1,4	1400 – 1740	290 – 460	0,5 – 1,0	5,5/3	20/9							
– донецкий Г и Д ( $A^p = 0,8$ )					6/3,5	17/7,5							
– сучанский ( $A^p = 1,4$ )		1400 – 1620			7,5/5,5	11/5							
– кузнецкий 1СС ( $A^p = 0,4$ )		1400 – 1740			1160 – 1400	290 – 460	0,5 – 1,0	11/5	20/8				
Тип бурого угля:													
– ирша-бородинский ( $W^p = 2,1; A^p = 0,4$ )								6/3	27/12				
– артемовский ( $W^p = 1,8; A^p = 1,0$ )								5,5/4	19/8,5				
– веселовский ( $W^p = 2,0; A^p = 1,5$ )								7,5/5,5	15/7				
– харанорский ( $W^p = 3,2; A^p = 0,7$ )		7/4			19/8,5								
– подмосковный ( $W^p = 3,0; A^p = 2,1$ )		7,5/5			11/5								
<b>Камерные топки для сжигания газа и мазута</b>													
Мазут	1,1	–	405	0,5	0	–							
Природный газ		–	465			–							

\* Числитель – для топок, необорудованных средствами уменьшения уноса, знаменатель – для топок с острым дутьем и возвратом уноса

Значения присосов воздуха в газоходах котлоагрегатов:

- топочные камеры газомазутных котлов  $\Delta\alpha_T = 0,02$ ;
- топочные камеры слоевых котлов  $\Delta\alpha_T = 0,1$ ;
- котельный пучок  $\Delta\alpha_{кп} = 0,05$ ;
- экономайзер стальной  $\Delta\alpha_{эк} = 0,08$ ;
- экономайзер чугунный с обшивкой  $\Delta\alpha_{эк} = 0,1$ .

### 5.3. Определение объемов и энтальпии продуктов сгорания топлив

Определение объемов воздуха и газов ведут на 1 кг твердого или жидкого рабочего топлива и на 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива. Принимаем, что горение полное, объемы газообразного топлива, воздуха и продуктов сгорания относят к нормальным условиям ( $p_0 = 101,3$  кПа,  $t_0 = 0$  °С). Последовательность расчета следующая.

1. Определение теоретического объема воздуха, необходимого для полного горения:

- при сжигании твердого и жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V^0 = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375S^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p; \quad (1)$$

- при сжигании газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V^0 = 0,0476 \cdot \left[ 0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_mH_n - O_2 \right]; \quad (2)$$

где  $m$  – число атомов углерода;  $n$  – число атомов водорода.

Здесь и далее содержание компонентов топлива принимается в процентах.

2. Определение теоретического объема азота в продуктах сгорания:

- при сжигании твердого и жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,008N^p; \quad (3)$$

- при сжигании газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,01N_2. \quad (4)$$

3. Определение объема трехатомных газов:

- при сжигании твердого и жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{RO_2} = 0,01866 \cdot (C^p + 0,375S^p); \quad (5)$$

- при сжигании газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{RO_2} = 0,01 \cdot [CO_2 + CO + H_2S + \sum m C_m H_n]. \quad (6)$$

Здесь имеется в виду, что  $RO_2 = CO_2 + SO_2$ .

#### 4. Определение теоретического объема водяных паров:

– при сжигании твердого и жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{H_2O}^0 = 0,1111H^p + 0,0124W^p + 0,016V^0 + 1,24G_{\phi}; \quad (7)$$

– при сжигании газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \cdot (H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124d_{г.тл}) + 0,0161V^0, \quad (8)$$

где  $d_{г.тл}$  – влагосодержание газообразного топлива; при расчетной температуре 10 °С принимается  $d_{г.тл} \approx 10$  г/м<sup>3</sup>.

#### 5. Определение теоретического объема продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>):

$$V_{\Gamma}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0. \quad (9)$$

#### 6. Определение среднего коэффициента воздуха в газоходе для каждой поверхности нагрева (таблица 5).

#### 7. Определение действительного объема водяных паров, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>):

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha_{cp} - 1)V^0. \quad (10)$$

#### 8. Определение действительного объема продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>):

$$V_{\Gamma} = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + (\alpha_{cp} - 1)V^0. \quad (11)$$

#### 9. Масса продуктов сгорания, кг/кг

$$G_{\Gamma} = 1 - \frac{A^p}{100} + 1,306 \cdot \alpha_{cp} \cdot V^0. \quad (12)$$

#### 10. Концентрация золы в продуктах сгорания, кг/кг

$$\mu = \frac{A^p a_{yH}}{100 G_{\Gamma}}, \quad (13)$$

где  $a_{yH}$  – доля золы топлива в уносе (принимается по таблице 3).

Результаты расчета действительных объемов продуктов сгорания по газоходам котлоагрегата сводят в таблицу (см. таблицу 5). В таблице последовательность и количество расчетных участков конвективных поверхностей должны соответствовать компоновке поверхностей нагрева рассчитываемого котельного агрегата.



Таблица 5 – Характеристика продуктов сгорания в поверхностях нагрева

Величина и расчетная формула	Топочная камера	Газоход	
		Котельный пучок	Экономайзер
Коэффициент избытка воздуха за поверхностью нагрева $\alpha''$	$\alpha_T$	$\alpha''_{кп} = \alpha_T + \Delta\alpha_{кп}$	$\alpha_{yx} = \alpha''_{кп} + \Delta\alpha_{эк}$
Средний коэффициент избытка воздуха в поверхности нагрева $\alpha_{cp}$	$\alpha_T$	$\frac{\alpha_T + \alpha''_{кп}}{2}$	$\frac{\alpha''_{кп} + \alpha_{yx}}{2}$
Объем водяных паров $V_{H_2O}$ , м <sup>3</sup> /кг			
Полный объем газов $V_T$ , м <sup>3</sup> /кг			
Объемная доля трехатомных газов $r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_T}$			
Объемная доля водяных паров $r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_T}$			
Доля трехатомных газов и водяных паров $r_{II} = r_{RO_2} + r_{H_2O}$			
Концентрация золы частиц $\mu$ , кг/кг			

Таблица 6 – Энтальпия 1 м<sup>3</sup> воздуха, газообразных продуктов сгорания (кДж/м<sup>3</sup>) и 1 кг золы (кДж/кг)

$\vartheta$ , °C	$(c\vartheta)_{RO_2}$	$(c\vartheta)_{N_2}$	$(c\vartheta)_{O_2}$	$(c\vartheta)_{H_2O}$	$(c\vartheta)_B$	$(c\vartheta)_{зл}$
100	170	130	132	151	133	81
200	359	261	238	305	267	170
300	561	393	408	464	404	264
400	774	528	553	628	543	361
500	999	666	701	797	686	460
600	1226	806	852	970	832	562
700	1466	949	1008	1151	982	664
800	1709	1096	1163	1340	1131	769
900	1957	1247	1323	1529	1285	878
1000	2209	1398	1482	1730	1440	987
1100	2465	1550	1642	1932	1600	1100
1200	2726	1701	1806	2138	1760	1209
1300	2986	1856	1970	2352	1919	1365
1400	3251	2016	2133	2566	2083	1587
1500	3515	2171	2301	2789	2247	1764
1600	3780	2331	2469	3011	2411	1881
1700	4049	2490	2637	3238	2574	2070
1800	4317	2650	2805	3469	2738	2192
1900	4586	2814	2978	3700	2906	2337
2000	4859	2973	3150	3939	3074	2520
2100	5132	3137	3318	4175	3242	—
2200	5405	3301	3494	4414	3410	—

11. Расчеты по определению энтальпий теоретического объема воздуха  $H_B^0$  и продуктов сгорания  $H_T^0$  сводят в таблицу 7. Значения энтальпии воздуха  $(c\vartheta)_B$ , трехатомных газов  $(c\vartheta)_{RO_2}$ , теоретического объема азота  $(c\vartheta)_{N_2}$ , теоретического объема водяных паров  $(c\vartheta)_{H_2O}$  принимаются по таблице 6, кДж/м<sup>3</sup>.

12. Энтальпия продуктов сгорания топлива, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>)

$$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha'' - 1)H_{\text{B}}^0 + H_{\text{Зл}}, \quad (14)$$

где  $H_{\text{Зл}} = 0,01 \cdot a_{\text{yH}} \cdot A^{\text{p}} \cdot (c\vartheta)_{\text{Зл}}$  – энтальпия золы, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);

$(c\vartheta)_{\text{Зл}}$  – энтальпия 1 кг золы, определяется по таблице 6.

Энтальпии газа, воздуха и золы в формуле (14) принимаются при температуре газов  $\vartheta_{\Gamma}$ .

Результаты расчета энтальпии продуктов сгорания по газоходам котлоагрегата сводят в  $H - \vartheta$  в таблицу 8.

Таблица 7 – Энтальпии теоретических объемов воздуха и продуктов сгорания, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>)

Температура, °С	$V^0 = \dots$ м <sup>3</sup> /кг	$V_{\text{RO}_2}^0 = \dots$ м <sup>3</sup> /кг	$V_{\text{N}_2}^0 = \dots$ м <sup>3</sup> /кг	$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = \dots$ м <sup>3</sup> /кг	$H_{\Gamma}^0 = H_{\text{RO}_2} + H_{\text{H}_2\text{O}} + H_{\text{N}_2}$
	$H_{\text{B}}^0 = V^0(c\vartheta)_{\text{B}}$	$H_{\text{RO}_2} = V_{\text{RO}_2}(c\vartheta)_{\text{RO}_2}$	$H_{\text{H}_2\text{O}}^0 = V_{\text{H}_2\text{O}}^0(c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$	$H_{\text{N}_2}^0 = V_{\text{N}_2}^0(c\vartheta)_{\text{N}_2}$	
30					
100					
200					
300					
...					
2200					

Таблица 8 – Энтальпии продуктов сгорания  $H_{\Gamma}$  в газоходах, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>)

$\vartheta_{\Gamma}, \text{°C}$	$H_{\text{B}}^0$	$H_{\Gamma}^0$	$H_{\text{Зл}}$	Участки газового тракта и коэффициент избытка воздуха		
				верх топки, $\alpha_{\Gamma}$	котельный пучок $\alpha''_{\text{кп}}$	экономайзер, $\alpha_{\text{yx}}$
100						
200						
300						
400						
500						
600						
700						
800						
900						
1000						
1100						
1200						
1300						
1400						
1500						
1600						
1700						
1800						
1900						
2000						
2100						
2200						

## 5.4. Тепловой баланс, КПД брутто

При работе парового котла вся поступившая в него теплота расходуется на выработку полезной теплоты, содержащейся в паре или горячей воде, и на покрытие различных потерь теплоты. Суммарное количество теплоты, поступившее в котельный агрегат, называют располагаемой теплотой и обозначают  $Q_p^p$ . Между теплотой, поступившей в котельный агрегат и покинувшей его, должно существовать равенство. Теплота, покинувшая котельный агрегат, представляет собой сумму полезной теплоты и потерь теплоты, связанных с технологическим процессом выработки пара или горячей воды.

Тепловой баланс составляется на 1 кг твердого или жидкого топлива, либо на 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива при нормальных условиях.

Тепловой баланс котла имеет вид, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>)

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (15)$$

где  $Q_1$  — полезная теплота, содержащаяся в паре или горячей воде;  $Q_2$  — потери теплоты с уходящими газами;  $Q_3$  — потери от химической неполноты сгорания;  $Q_4$  — потери теплоты от механической неполноты сгорания;  $Q_5$  — потери теплоты от наружного охлаждения;  $Q_6$  — суммарные потери физической теплоты, содержащейся в удаляемом шлаке и на охлаждение панелей и балок, не включенных в циркуляционный контур котла.

Тепловой баланс котла составляется применительно к установившемуся тепловому режиму, а потери теплоты выражаются в долях располагаемой теплоты:

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_p^p}, \quad (16)$$

В безразмерном виде уравнение теплового баланса для котлоагрегата имеет вид:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 1. \quad (17)$$

### Располагаемая теплота топлива:

— для твердого и жидкого топлива, кДж/кг:

$$Q_p^p = Q_n^p + h_{\text{тл}} + Q_{\phi}; \quad (18)$$

— для газообразного топлива, кДж/м<sup>3</sup>  $Q_p^p = Q_n^p$ ,

где  $Q_n^p$  — низшая теплота сгорания рабочей массы топлива, кДж/кг [см. 2, прил. I-III];  $h_{\text{тл}}$  — физическая теплота, внесенная топливом, кДж/кг;  $Q_{\phi}$  — теплота, вносимая в агрегат при паровом распыливании жидкого топлива, кДж/кг.

Физическая теплота топлива, кДж/кг, учитывается только при его предварительном подогреве от постороннего источника теплоты, как правило при паровом подогреве мазута:

$$h_{\text{тл}} = c_{\text{тл}} t_{\text{тл}}, \quad (19)$$

где  $t_{\text{тл}}$  — температура топлива, °С (для мазута в зависимости от его вязкости 90–130 °С);  $c_{\text{тл}}$  — удельная теплоемкость мазута, кДж/(кг·К):

$$c_{\text{тл}} = 1,74 + 0,0025t_{\text{тл}}. \quad (20)$$

Теплота, вносимая в агрегат через форсунку при паровом распыливании мазута, кДж/кг:

$$Q_{\phi} = 0,35(h_{\phi} - 2520), \quad (21)$$

где  $h_{\phi}$  – энтальпия пара, расходуемого на распыливание топлива, определяется из таблиц для водяного пара по его параметрам (280–350 °С и 0,3–0,6 МПа), кДж/кг.

Потеря теплоты с уходящими газами определяется по формуле

$$q_2 = \frac{(H_{yx} - \alpha_{yx}H_{x,b}^0) \cdot (100 - q_4)}{Q_p^p}, \quad (22)$$

где  $H_{yx}$  – энтальпия уходящих газов, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>); определяется по  $\vartheta_{yx}$  из таблицы 8 при избытке воздуха в продуктах сгорания за экономайзером;  $H_{x,b}^0$  – энтальпия холодного воздуха при расчетной температуре  $t_{x,b} = 30$  °С и  $\alpha = 1$

$$H_{x,b}^0 = c_{x,b}t_{x,b}V^0 = 1,32t_{x,b}V^0. \quad (23)$$

Значения величин  $q_3$  и  $q_4$  принимается по таблице 3, а  $q_5$  – по графику [см. 2, табл. 5.13], учитывая наличие хвостовых поверхностей нагрева. Потеря в виде физической теплоты шлаков ( $q_6$ )

$$q_6 = \frac{a_{шл} \cdot A^p \cdot (c\vartheta)_{зл}}{Q_p^p} \cdot 100\%, \quad (24)$$

где  $a_{шл}$  – доля золы в топливе, перешедшей в шлак  $a_{шл} = 1 - a_{ун}$ .

Температура золы (шлака) при твердом шлакоудалении принимается равной 600 °С.

КПД брутто (%) котельного агрегата вычисляется по уравнению обратного теплового баланса

$$\eta_{бр} = q_1 = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6). \quad (25)$$

Потеря тепла в окружающую среду при расчете теплообмена в отдельных поверхностях нагрева учитывается коэффициентом сохранения тепла

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{\eta_{бр} + q_5}. \quad (26)$$

## 5.5. Расход топлива

Полное количество теплоты, полезно отданной в котельном агрегате, кВт:

$$Q_{к.а} = Q_1 = D(h_{н.п} - h_{п.в}) + D_{пр}(h_{кип} - h_{п.в}), \quad (27)$$

где  $D$  – расчетная паропроизводительность котла, кг/с;  $h_{н.п}$ ,  $h_{п.в}$ ,  $h_{кип}$  – энтальпии соответственно насыщенного пара, питательной воды и кипящей воды в барабане парового котла, кДж/кг, определяются по [см. 2, прил. IV–V];  $D_{пр}$  – расход продувочной воды из барабанного парового котла, кг/с, при величине непрерывной продувки  $p$ , %,  $D_{пр} = 0,01pD$ .

Расход топлива, подаваемого в топку, кг/с (м<sup>3</sup>/с)

$$B = \frac{Q_{к.а}}{Q_p^p \cdot \eta_{бр}} \cdot 100. \quad (28)$$

Для твердых видов топлива определяют расчетный физический расход топлива с учетом механического недожога:

$$B_p = B(1 - 0,01q_4). \quad (29)$$

## 5.6. Расчет теплообмена в топке

Поверочный расчет однокамерных и полуоткрытых топок проводится в такой последовательности.

При поверочном расчете топки по чертежам необходимо определить: объем топочной камеры  $V_T$ ,  $m^3$ , и площадь поверхности стен  $F_{CT}$ ,  $m^2$ , а также конструктивные характеристики труб экранов (диаметр труб  $d$ , расстояние между осями труб  $s$ ).

Верхняя часть объема топки ограничивается потолочным перекрытием и выходным окном, перекрытым труб котельного пучка. При расчете  $F_{CT}$  и  $V_T$  в котлах ДКВр необходимо учитывать объем и площадь стен камеры догорания. При определении объема верхней части топки за его границы принимают потолочное перекрытие и плоскость, проходящую через оси первого ряда труб котельного пучка. Границами средней (призматической) части объема топки являются осевые плоскости экранных труб или стен топочной камеры. Нижняя часть камерных топок ограничивается подом, а слоевых – колосниковой решеткой со слоем топлива. За границы нижней части объема камерных топок принимается под. За границы объема слоевых топок с механическими забрасывателями принимаются плоскость колосниковой решетки и вертикальная плоскость, проходящая через концы колосников или скребки шлакоснимателя. В топках с цепными механическими решетками (ЦМР) из этого объема исключается объем слоя топлива и шлака, находящихся на решетке. Средняя толщина слоя топлива и шлака принимается равной для антрацитов 100–150 мм, для каменных углей 150–200 мм, для бурых углей – 300 мм, для торфа – 400 мм, для древесной щепы – 500 мм.

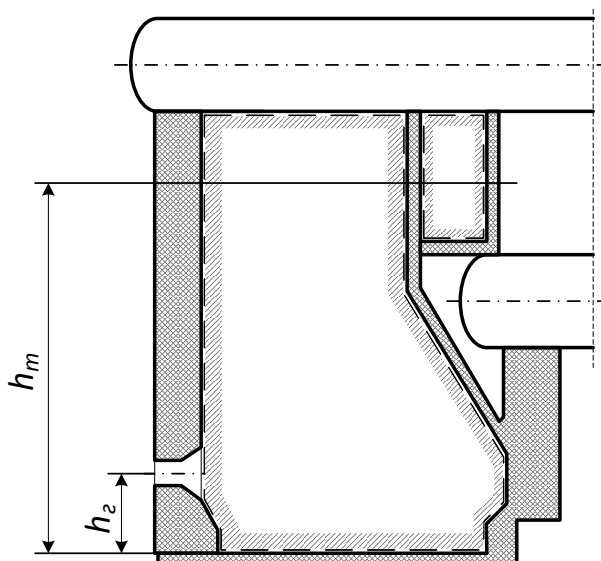


Рисунок 1 – Определение активного объема топки

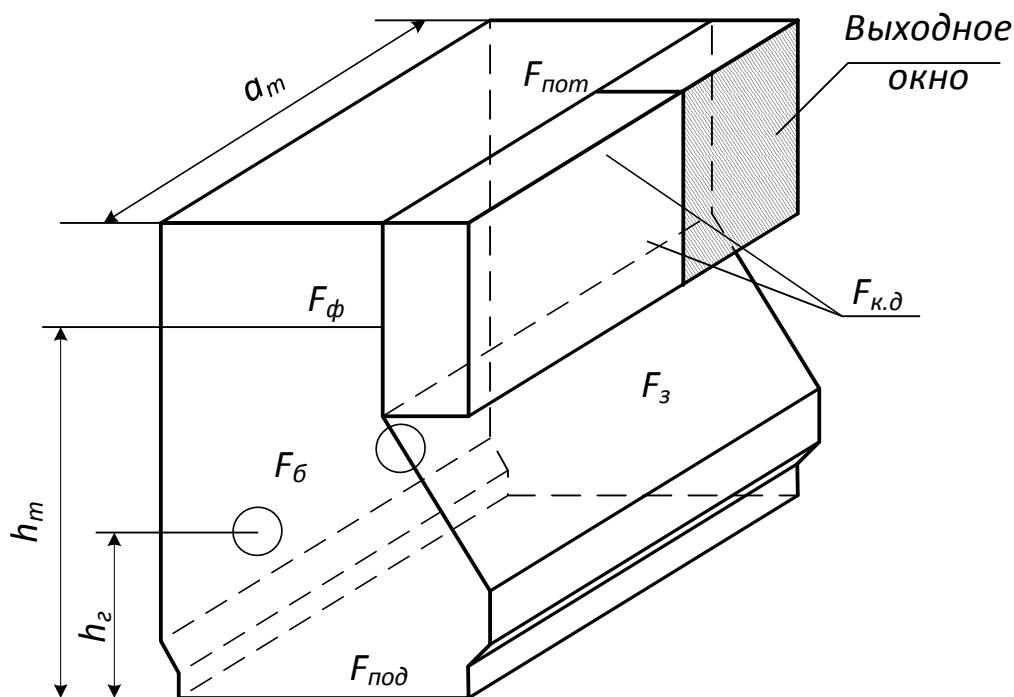


Рисунок 2 – Определение площади стен топки

1. Полная площадь поверхности стен топки ( $F_{ст}$ , м<sup>2</sup>) вычисляется по размерам поверхностей, ограничивающих объем топочной камеры как показано штриховкой на рисунках 1, 2. Для этого все поверхности, ограничивающие объем топки, разбиваются на элементарные геометрические фигуры. При определении  $F_{ст}$  учитывают все лучевоспринимающие участки топки:

$$F_{ст} = F_{ф} + 2F_{б} + F_{пот} + F_{под} + F_3 + F_{к.д}, \quad (30)$$

где  $F_{ф}$  – площадь фронтальной стены, м<sup>2</sup>;  $F_{б}$  – площадь боковой стены топки и камеры догорания, м<sup>2</sup>;  $F_{пот}$  – площадь потолка топки и камеры догорания, м<sup>2</sup>;  $F_{под}$  – площадь пода топки и камеры догорания, м<sup>2</sup>;  $F_3$  – площадь задней стены топки, м<sup>2</sup>;  $F_{к.д}$  – площадь фронтальной и задней стены камеры догорания, м<sup>2</sup>.

2. Площадь стены, занятой экраном, м<sup>2</sup>

$$F_{пл} = bl, \quad (31)$$

где  $b$  – расстояние между осями крайних труб данного экрана, м;  $l$  – освещенная длина экрана, определяется по рисунку 1.

При определении  $F_{пл}$  исключают незащищенные трубами участки экранов, если площадь каждого из них более 1 м<sup>2</sup>: амбразуры горелок, лючков, гляделок.

3. Для слоевых котлов по таблице 3 определяют площадь зеркала горения  $R$ , м<sup>2</sup>.

4. Объем топки  $V_T$  (см. таблицу 3)

$$V_T = F_{б} \cdot a_T, \quad (32)$$

где  $a_T$  – глубина топки, м (см. рисунки 1, 2).

5. Угловой коэффициент экранов  $x$  определяется по рисунку 3. Для ошпорованных экранов угловой коэффициент принимается равным 1, как и для поверхности, проходящей через первый ряд труб котельного пучка, расположенного в выходном окне топки.

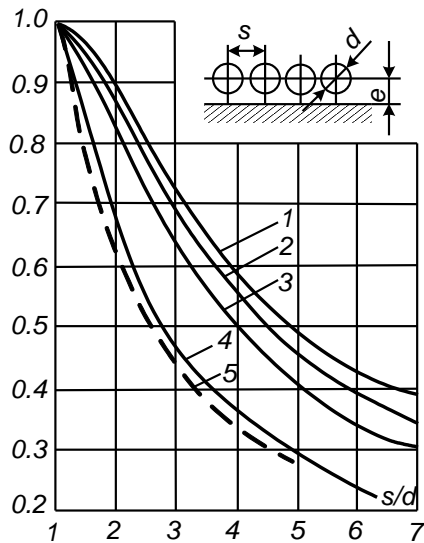


Рисунок 3 – Угловой коэффициент однорядного гладкотрубного экрана:

- 1 – при расстоянии от стенки  $e \geq 1,4d$ ;
- 2 – при  $e = 0,8d$ ; 3 – при  $e = 0,5d$ ;
- 4 – при  $e = 0$ ;
- 5 – без учета излучения обмуровки при  $e \geq 0,5d$

Расчет геометрических характеристик топочной камеры удобно вести в форме таблицы (таблица 9).

Таблица 9 – Расчет полной поверхности стен топочной камеры  $F_{ст}$

Показатели		Единица измерения	Стены топки					Выходное окно топки	Камера догорания
Наименование	Обозначение		фронтальная и свод	боковые	задняя	под	потолок		
1. Расстояние между осями крайних труб	$b$	м							
2. Освещаемая длина труб	$l$	м							
3. Площадь, занятая экраном									
– суммарная	$F_{пл}$	м <sup>2</sup>							
– ошпорованная	$F_{пл}^{закр}$	м <sup>2</sup>							
– открытая	$F_{пл}^{откр}$	м <sup>2</sup>							
4. Площадь стены	$F_{ст i}$	м <sup>2</sup>							
5. Наружный диаметр труб	$d$	мм							
6. Шаг труб	$s$	мм							
7. Расстояние от трубы до кладки стены	$e$	мм							
8. Угловой коэффициент	$x$	–							
9. Коэффициент загрязнения экранов	$\xi$	–							
10. Коэффициент тепловой эффективности экранов	$\psi$	–							

6. Предварительно задаются температурой продуктов сгорания на выходе из топочной камеры  $\vartheta''_T$ , ориентируясь на данные таблицы 10.

Таблица 10 – Ориентировочные значения температуры газов на выходе из топки  $\vartheta''_T$ , °С

Топливо	Способ сжигания
Слоевые топки	
Сортированные антрациты, тощие угли	1050–1100
АРШ, АШ, ТР	1000
Каменные угли сортированные	950–1050
Бурые угли рядовые	900–1000
Сланцы	900
Торф	900–950
Камерные топки	
Мазут	1000–1050
Природный газ	1050–1100

7. Для принятой в п. 6 температуры определяется энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки  $H''_T$  по таблице 8.

8. Подсчитывается полезное тепловыделение в топке, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$Q_T = Q_p^p \cdot \frac{100 - (q_3 + q_4 + q_6)}{100 - q_4} + Q_B, \quad (333)$$

где  $Q_B$  – теплота, вносимая в топку воздухом, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>). Для котлов, не имеющих воздухоподогревателя, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$Q_B = \alpha''_T H''_{x.B.} \quad (34)$$

9. Определяется коэффициент тепловой эффективности экранов

$$\psi = x\xi, \quad (35)$$

где  $\xi$  – условный коэффициент загрязнения и закрытия экранов. Коэффициент  $\xi$  учитывает снижение тепловосприятия экранных поверхностей нагрева вследствие их загрязнения наружными отложениями или закрытия огнеупорной массой. Коэффициент загрязнения принимается по таблице 11.

Таблица 11 – Коэффициент загрязнения и закрытия экранов

Тип экрана	Топливо	Значение $\xi$
Настенные гладкотрубные цельносварные экраны в камерных топках	газообразное	0,65
	мазут	0,55
Настенные гладкотрубные цельносварные экраны в слоевых топках	все топлива	0,60
Экраны, покрытые шамотным кирпичом	все топлива	0,10

Если стены топки покрыты экранами с разными угловыми коэффициентами или частично покрыты огнеупорной массой (шамотным кирпичом), то определяется среднее значение коэффициента тепловой эффективности  $\psi_{cp}$



$$\psi_{\text{ср}} = \frac{\sum \psi_i F_{\text{пл } i}}{F_{\text{ст}}} \quad (36)$$

При этом для незранированных участков топки коэффициент тепловой эффективности  $\psi$  принимается равным нулю. При определении среднего коэффициента тепловой эффективности суммирование распространяется на все участки топочных стен. Для этого стены топочной камеры должны быть разбиты на отдельные участки, в которых угловой коэффициент и коэффициент загрязнения неизменны.

Для выходного окна топки, отделяющего топку от расположенной за ним поверхности нагрева

$$\xi_{\text{вых}} = \xi \cdot \beta, \quad (37)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий взаимный теплообмен между топкой и поверхностью нагрева. При размещении за выходным окном котельного пучка  $\beta = 1,0$ .

Значения коэффициентов  $\xi$  и  $\psi$  заносятся в таблицу 9.

10. Определяется эффективная толщина излучающего слоя, м:

$$S = 3,6 \frac{V_{\text{T}}}{F_{\text{ст}}} \quad (38)$$

11. Рассчитывается коэффициент поглощения топочной среды  $k$ , который определяет относительное изменение интенсивности луча в поглощающем слое единичной толщины и характеризует полную поглощательную способность среды.

При сжигании жидкого и газообразного топлива коэффициент поглощения лучей,  $(\text{м} \cdot \text{МПа})^{-1}$ , зависит от коэффициентов поглощения лучей трехатомными газами ( $\text{RO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ )  $k_{\text{r}}^0$  и сажистыми частицами  $k_{\text{c}}$ :

$$k = k_{\text{r}}^0 r_{\text{г}} + m k_{\text{c}}, \quad (39)$$

где  $r_{\text{г}}$  – суммарная объемная доля трехатомных газов, берется из таблицы 3;  $m$  – поправочный коэффициент; при сжигании мазута в негазоплотных котлах  $m = 0,6$ ; при сжигании газов  $m = 0,1$ .

Коэффициент поглощения лучей трехатомными газами  $k_{\text{r}}^0$  определяется по номограмме или по формуле,  $(\text{м} \cdot \text{МПа})^{-1}$ :

$$k_{\text{r}}^0 = \left( \frac{7,8 + 16r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{10pr_{\text{г}}S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T''_{\text{T}}}{1000} \right), \quad (40)$$

где  $p$  – давление в топочной камере котлоагрегата (для агрегатов, работающих без наддува, принимается  $p = 0,1$  МПа);  $r_{\text{H}_2\text{O}}$  – объемная доля водяных паров, берется из таблицы 5;  $T''_{\text{T}} = \vartheta''_{\text{T}} + 273$  – абсолютная температура на выходе из топочной камеры, К (равна принятой по предварительной оценке).

Коэффициент поглощения лучей сажистыми частицами,  $(\text{м} \cdot \text{МПа})^{-1}$ :

$$k_{\text{c}} = \frac{1,2}{1 + (\alpha''_{\text{T}})^2} \cdot \left( 1,6 \cdot \frac{T''_{\text{T}}}{1000} - 0,5 \right) \cdot \left( \frac{C^{\text{P}}}{H^{\text{P}}} \right)^{0,4}, \quad (41)$$

где  $C^p, H^p$  – содержание углерода и водорода в рабочей массе жидкого топлива.

При сжигании газа

$$\frac{C^p}{H^p} = 0,12 \sum \frac{m}{n} C_m H_n, \quad (42)$$

где  $C_m H_n$  – процентное содержание входящих в состав природного газа углеводородных соединений.

При сжигании твердого топлива коэффициент поглощения лучей зависит от коэффициентов поглощения лучей трехатомными газами, золовыми и коксовыми частицами и подсчитывается по формуле,  $(\text{м} \cdot \text{МПа})^{-1}$ :

$$k = k_{\Gamma}^0 r_{\Pi} + k_{\text{зл}} \mu_{\text{зл}} + k_{\text{кокс}} \mu_{\text{кокс}}. \quad (43)$$

Коэффициент поглощения лучей частицами летучей золы  $k_{\text{зл}} \mu_{\text{зл}}$  определяется по формуле

$$k_{\text{зл}} \mu_{\text{зл}} = \frac{10^4 A_{\text{зл}}}{\sqrt[3]{(T_{\Gamma}^{\text{м}})^2}} \cdot \frac{\mu_{\text{зл}}}{1 + 1,2 \mu_{\text{зл}} S}. \quad (44)$$

Коэффициент  $A_{\text{зл}}$  для топок с твердым шлакоудалением принимается по таблице 12.

Средняя массовая концентрация золы  $\mu_{\text{зл}}$  берется из расчетной таблицы 4.

Коэффициент поглощения лучей частицами кокса  $k_{\text{кокс}} \mu_{\text{кокс}}$  принимается по таблице 12.

Таблица 12 – Значение коэффициента  $A_{\text{зл}}$  и коэффициента  $k_{\text{кокс}} \mu_{\text{кокс}}$

Вид сжигаемого топлива	$A_{\text{зл}}$	$k_{\text{кокс}} \mu_{\text{кокс}}, (\text{м} \cdot \text{МПа})^{-1}$
АШ	1,00	0,25
Тощий уголь	0,8	0,25
Каменный уголь	0,8	0,2
Бурый уголь	0,75	0,1
Сланец	0,75	0,1
Торф	0,6	0,1

12. Рассчитывается критерий Бугера (критерий поглощательной способности)

$$Bu = kpS. \quad (45)$$

13. Рассчитывается эффективное значение критерия Бугера

$$\widetilde{Bu} = 1,61 \cdot \ln \left( \frac{1,4Bu^2 + Bu + 2}{1,4Bu^2 - Bu + 2} \right). \quad (46)$$

14. Относительное положение максимума температуры для большинства топлив определяется как отношение высоты размещения горелок к общей высоте топки

$$x_{\Gamma} = \frac{h_{\Gamma}}{h_{\Gamma}}, \quad (47)$$

где  $h_r$  – расстояние от пода топки или от середины холодной воронки до оси горелок, м;  
 $h_T$  – расстояние от пода топки до середины выходного окна топки, м (рисунок 2).

15. Определяется параметр  $M$ , учитывающий влияние на интенсивность теплообмена относительного уровня расположения горелок, степени забалластирования топочных газов и других факторов. Он зависит от вида топлива, способа его сжигания, типа горелок, их расположения на стенах топки и связан с относительным уровнем расположения горелок по высоте топочной камеры  $x_r$ :

– для камерных топок

$$M = M_0 \cdot (1 - 0,4x_r)^3 \sqrt{r_v}; \quad (48)$$

– для слоевых топок ( $x_r = 0$ )

$$M = M_0 \cdot (1 + \rho)^3 \sqrt{r_v}, \quad (49)$$

где  $\rho = R/F_{CT}$  – отношение площади  $R$  зеркала горения (слоя) к площади поверхности стен топки  $F_{CT}$ ; коэффициент  $M_0$  для слоевых топок  $M_0 = 0,46$ , для газомазутных топок при настенном расположении горелок  $M_0 = 0,40$ .

Параметр забалластирования топочных газов

$$r_v = \frac{V_r}{V_{RO_2} + V_{N_2}^0}, \quad (50)$$

где  $V_r$  – объем газов на выходе из топки, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>).

16. Адиабатная температура горения. Из таблицы 8 по значению  $Q_T$ , равному энтальпии продуктов сгорания  $H_a$  получаем значение адиабатной температуры  $\vartheta_a$ , °С. Абсолютное значение температуры  $T_a = \vartheta_a + 273$ , К.

17. Определяется средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания на 1 кг сжигаемого твердого и жидкого топлива или на 1 м<sup>3</sup> газа при нормальных условиях, кДж/(кг·К) или кДж/(м<sup>3</sup>·К):

$$(Vc)_{cp} = \frac{Q_T - H''_T}{T_a - T''_T}. \quad (51)$$

18. Определяется действительная температура на выходе из топки, °С:

$$\vartheta''_T = \frac{T_a}{M\widetilde{Bu}^{0,3} \cdot \left( \frac{5,67\psi_{cp}F_{CT}T_a^3}{10^{11}\varphi B_p(Vc)_{cp}} \right)^{0,6} + 1} - 273. \quad (52)$$

Полученная температура на выходе из топки сравнивается с температурой, принятой ранее в п. 6. Если расхождение между полученной температурой  $\vartheta''_T$  и ранее принятой на выходе из топки не превысит  $\pm 100$  °С, то расчет считается окончанным. В противном случае задаются новым, уточненным значением температуры на выходе из топки, и весь расчет повторяется. Дальнейшие расчеты ведутся по значению температуры, принятой в п. 4.

19. Удельное тепловосприятие топки, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$Q_L^T = \varphi(Q_T - H''_T), \quad (53)$$

где  $\varphi$  – коэффициент сохранения теплоты (26).

20. Среднее тепловое напряжение поверхности нагрева топки, кВт/м<sup>2</sup>:

$$q_L = \frac{B_p Q_L^T}{F_{CT}}. \quad (54)$$

Полученное значение не должно превышать значений, указанных в таблице 3.

## 5.7. Тепловой расчет котельного пучка

Котельный пучок расположен между верхним и нижним барабанами и представляет собой коридорный пучок труб.

Тепловой расчет котельного пучка выполняется поверочным методом, в результате которого определяется температура газов за рассчитываемой поверхностью. Температура газов на входе в поверхность  $\vartheta'$  известна из расчета топки. Последовательность поверочного расчета следующая.

1. По чертежу и техническим характеристикам котельного агрегата составляют расчетную схему и таблицу конструктивных характеристик поверхностей нагрева, пример которой приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Конструктивные характеристики поверхностей нагрева котельных пучков

Показатели	Обозн.	Ед. изм.	Значение
Диаметр труб наружный	$d$	м	
Количество труб в ряду	$z_1$	шт	
Количество рядов труб	$z_2$	шт	
Общее количество труб в расчетном участке	$z$	шт	
Угловой коэффициент	$\chi$	–	
Средняя длина труб (7.1)	$l_{cp}$	м	
Высота выходного окна	$h_{B.0}$	м	
Расположение труб (шахматное, коридорное)	–	–	
Шаг труб:			
– поперечный	$s_1$	мм	
– продольный	$s_2$	мм	
Относительный шаг труб			
– поперечный	$\sigma_1$	–	
– продольный	$\sigma_2$	–	
Размеры поперечного сечения газохода	$a$	м	
	$h$	м	

Если в испарительном пучке длина труб по рядам существенно отличается, то необходимо найти среднюю длину труб:

$$l_{\text{cp}} = \frac{n_1 l_1 + n_2 l_2 + \dots}{z}, \quad (55)$$

где  $n_1, n_2, \dots$  – количество труб длиной  $l_1, l_2, \dots$ ;  $z$  – общее количество труб в пучке.

2. Площадь поверхности нагрева  $H_{\text{л}}$ ,  $\text{м}^2$ , принимается по таблице 3.

3. Задаются температурой газов на выходе из поверхности нагрева  $\vartheta''_{\text{кп}}$ , при этом понижение температуры газов  $\Delta\vartheta$  ориентировочно принимается для котельного пучка 150 – 600 °С.

Температура газов на выходе из рассчитываемой поверхности нагрева, °С:  $\vartheta''_{\text{кп}} = \vartheta''_{\text{т}} - \Delta\vartheta$ .

5. По таблице 8 находят энтальпию газов за поверхностью нагрева  $H''_{\text{кп}}$ .

6. Количество теплоты, отданной газами в рассчитываемой поверхности,  $\text{кДж/кг}$  ( $\text{кДж/м}^3$ ):

$$Q_{\text{б}} = Q_{\text{кп}} = \varphi(H'_{\text{кп}} - H''_{\text{кп}} + \Delta\alpha_{\text{кп}}H_{\text{х.в}}^0), \quad (56)$$

где  $\varphi$  – коэффициент сохранения теплоты (26);  $H'_{\text{кп}} = H''_{\text{т}}$  – энтальпия газов на входе в котельный пучок,  $\text{кДж/кг}$  ( $\text{кДж/м}^3$ );  $\Delta\alpha_{\text{кп}}$  – присосы воздуха в котельном пучке.

7. Живое сечение для прохода газов  $F$ ,  $\text{м}^2$ , принимается по таблице 3.

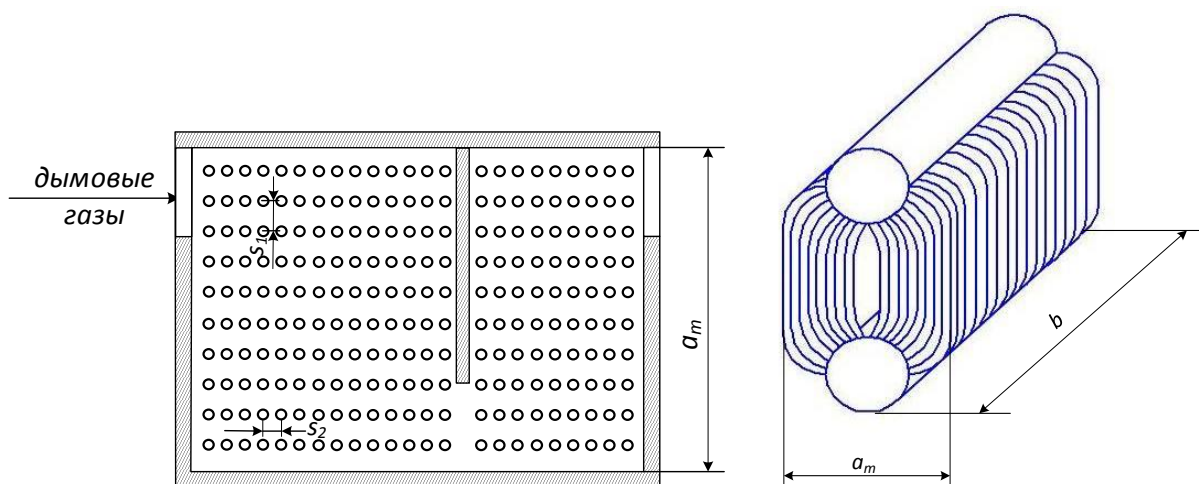


Рисунок 4 – Эскиз котельного пучка

8. Средняя температура газа в поверхности  $\bar{\vartheta} = (\vartheta''_{\text{кп}} + \vartheta''_{\text{т}})/2$ , °С;  $\bar{T} = \bar{\vartheta} + 273$ , К.

9. Температурный напор  $\Delta t_{\text{cp}}$ , °С

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (57)$$

где  $\Delta t_{\text{б}}$  и  $\Delta t_{\text{м}}$  – большая и меньшая разности температур теплообменивающихся сред на границах поверхности, °С.

Для котельного пучка  $\Delta t_{\text{б}} = \vartheta''_{\text{т}} - t_{\text{к.в}}$ ;  $\Delta t_{\text{м}} = \vartheta''_{\text{кп}} - t_{\text{к.в}}$ , где  $t_{\text{к.в}}$  – температура котловой воды, равная температуре насыщения при давлении в барабане, °С [см. 2, прил. IV].

10. Средний расход дымовых газов  $V_c$ , м<sup>3</sup>/с

$$V_c = \frac{B_p V_r (\bar{\vartheta} + 273)}{273}, \quad (58)$$

где  $V_r$  – объем 1 кг (1 м<sup>3</sup>) газов при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>); принимается по таблице 5.

11. Средняя скорость газов в поверхности  $w_r$ , м/с

$$w_r = \frac{V_r}{F}. \quad (59)$$

12. Коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), от дымовых газов к стенке при поперечном омывании коридорного пучка определяется по рис. П4.4 [1]:

$$\alpha_k = \alpha_n c_z c_s c_\phi, \quad (60)$$

где  $c_z$  – поправка на число поперечных рядов труб по ходу газов;

$c_s$  – поправка на компоновку пучка;

$c_\phi$  – поправка, которая учитывает влияние на коэффициент теплоотдачи изменений физических характеристик греющей среды при изменении температуры и состава.

13. Эффективная толщина излучающего слоя, м

$$S = 0,9d \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 s_2}{d^2} - 1 \right), \quad (61)$$

где  $s_1$  и  $s_2$  — поперечный и продольный шаги труб, м.

14. Коэффициент поглощения лучей трехатомными газами  $k_r$ , (м·МПа)<sup>-1</sup>, определяется по формуле (40) при  $\bar{T}$

15. Коэффициент поглощения лучей частицами золы  $k_{зл}\mu_{зл}$ , (м·МПа)<sup>-1</sup>, определяется по (44) при  $\bar{T}$ .

16. Суммарная оптическая толщина запыленного газового потока

$$kpS = (k_r r_n + k_{зл}\mu_{зл})pS. \quad (62)$$

Для незапыленного потока (продукты сгорания газообразных и жидких топлив) второе слагаемое равно нулю; его можно не вводить в расчет при слоевом сжигании твердого топлива.

17. Степень черноты потока газов

$$a = 1 - e^{-kpS}. \quad (63)$$

18. Температура наружных загрязнений  $t_3$ , °С

$$t_3 = t_{к.в} + \Delta t. \quad (64)$$

Для котельных пучков котлов малой мощности при сжигании твердых и жидких топлив при коридорном расположении труб  $\Delta t = 60$  °С. При сжигании газа для всех поверхностей нагрева

$\Delta t = 25^\circ\text{C}$ .

19. Коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания  $\alpha_{\text{л}}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), определяется по рис. П4.8 [1]:

– для запыленного потока

$$\alpha_{\text{л}} = \alpha_{\text{н}} a, \quad (65)$$

– для незапыленного потока

$$\alpha_{\text{л}} = \alpha_{\text{н}} c_{\Gamma} a. \quad (66)$$

20. Коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к трубной поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_1 = \xi(\alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}), \quad (67)$$

где  $\xi$  – коэффициент использования; для смешанном оmyаемых пучков труб принимается  $\xi = 0,95$ .

21. Коэффициент теплопередачи  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$k = \psi \alpha_1. \quad (68)$$

Здесь  $\psi$  – коэффициент тепловой эффективности, принимается по таблицам 14 и 15.

Таблица 14 – Коэффициент тепловой эффективности для твердых топлив

Вид топлива	Коэффициент тепловой эффективности $\psi$
АШ и тощие угли	0,60
Каменные, бурые (кроме канско-ачинских)	0,65
Бурые угли (канско-ачинские, подмосковные)	0,70
Фрезерный торф	0,60
Сланцы (северо-западные, кашпирские)	0,50

Таблица 15 – Коэффициенты тепловой эффективности при сжигании газа и мазута

Наименование поверхности нагрева	Скорость газов, м/с	Коэффициент тепловой эффективности $\psi$
Коридорные поверхности в горизонтальном газопроводе без очистки. Котельные пучки парогенераторов малой мощности, фестоны	4–12	0,65–0,6
	12–20	0,6
Экономайзеры парогенераторов малой мощности (при температуре воды на входе 100 °С и ниже)	4–12	0,55–0,5

Примечание: большие значения  $\psi$  соответствуют меньшим скоростям.

22. Тепловосприятие поверхности, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>)

$$Q_{\text{т}} = \frac{kH\Delta t_{\text{ср}}}{B_{\text{п}} \cdot 10^3}, \quad (69)$$

### 23. Несходимость тепловосприятий

$$|\delta Q| = \frac{|Q_6 - Q_T|}{Q_6} \cdot 100\%. \quad (70)$$

Для котельного пучка  $|\delta Q| \leq 2\%$ .

Если несходимость тепловосприятий превышает допустимое значение, следует изменить температуру газов на выходе из поверхности  $\vartheta''_{к.п}$ , °С, и провести, начиная с расчета средней температуры газов, следующее приближение. Если при первом приближении  $Q_6 < Q_T$ , то во втором приближении  $\vartheta''_{к.п}$  выбирают такой, чтобы разница  $\Delta\vartheta$  была больше, чем в первом приближении и наоборот.

Для последующего приближения целесообразно выбирать температуру газов, отличающуюся от принятой в предыдущем не более чем на 50 °С. В этом случае коэффициент теплопередачи  $k$  можно не пересчитывать. Пересчитываются температурный напор  $\Delta t_{ср}$ , тепловосприятие по балансу  $Q_6$ , заново рассчитывается тепловосприятие по уравнению теплопередачи  $Q_T$ . Определяется новое значение несходимости  $|\delta Q|$ .

Если и после второго приближения несходимость окажется больше указанного предела ( $|\delta Q| \leq 2\%$ ), то температуру за котельным пучком  $\vartheta''_{к.п}$  можно определить линейной интерполяцией: графически (рисунок 5).

Если найденная путем интерполяции расчетная температура  $\vartheta''_{к.п}$  отличается от той, по которой определялся коэффициент теплопередачи, не более чем на 50 °С, то необходимо по этой температуре уточнить тепловосприятие  $Q_6$ . При большем расхождении температур  $\vartheta''_{к.п}$  необходимо по расчетной температуре  $(\vartheta''_{к.п})_p$  повторить расчет, включая определение коэффициента теплопередачи и температурного напора.

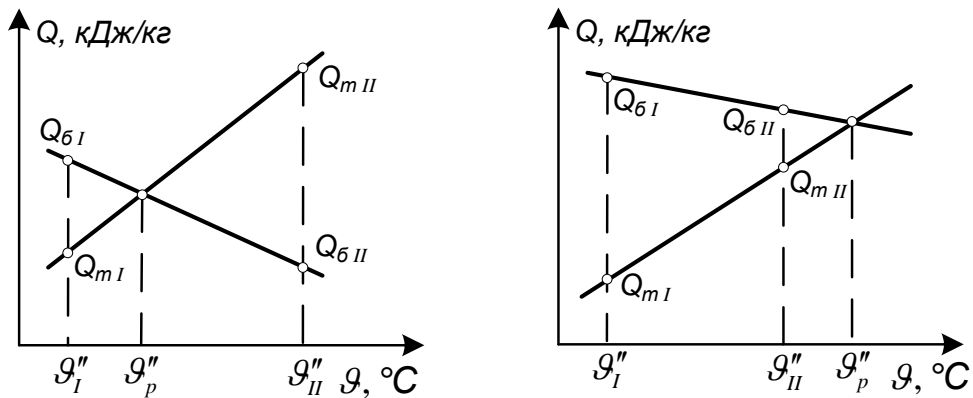


Рисунок 5 – Графическое определение расчетной температуры за поверхностью нагрева



## 5.8. Экономайзер

Для большинства котлов низкого давления экономайзер не является неотъемлемой частью. Его устанавливают отдельно. Экономайзеры (рисунок 6) могут быть некипящего типа (чугунные) и кипящего типа (стальные). Тип устанавливаемого экономайзера определяется тепловым расчетом.

1. Для рассматриваемых типов котлов экономайзер является последней по ходу газа поверхностью нагрева. Количество теплоты, воспринятое водой в экономайзере, определяется из теплового баланса котельного агрегата, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$Q_{\text{эк}} = Q_6 = Q_p^p \eta_{6p} \frac{100}{100 - q_4} - (Q_l^T + Q_{\text{к.п.}}). \quad (71)$$

2. Расход питательной воды, кг/с, через экономайзер

$$D_{\text{эк}} = D + D_{\text{пр}}, \quad (72)$$

где  $D_{\text{пр}}$  – величина продувки котла, кг/с;  $D_{\text{пр}} = pD$ .

3. Удельная энтальпия воды на входе в экономайзер, кДж/кг, равна энтальпии питательной воды  $h'_{\text{эк}} = h_{\text{п.в.}}$ , см. (27).

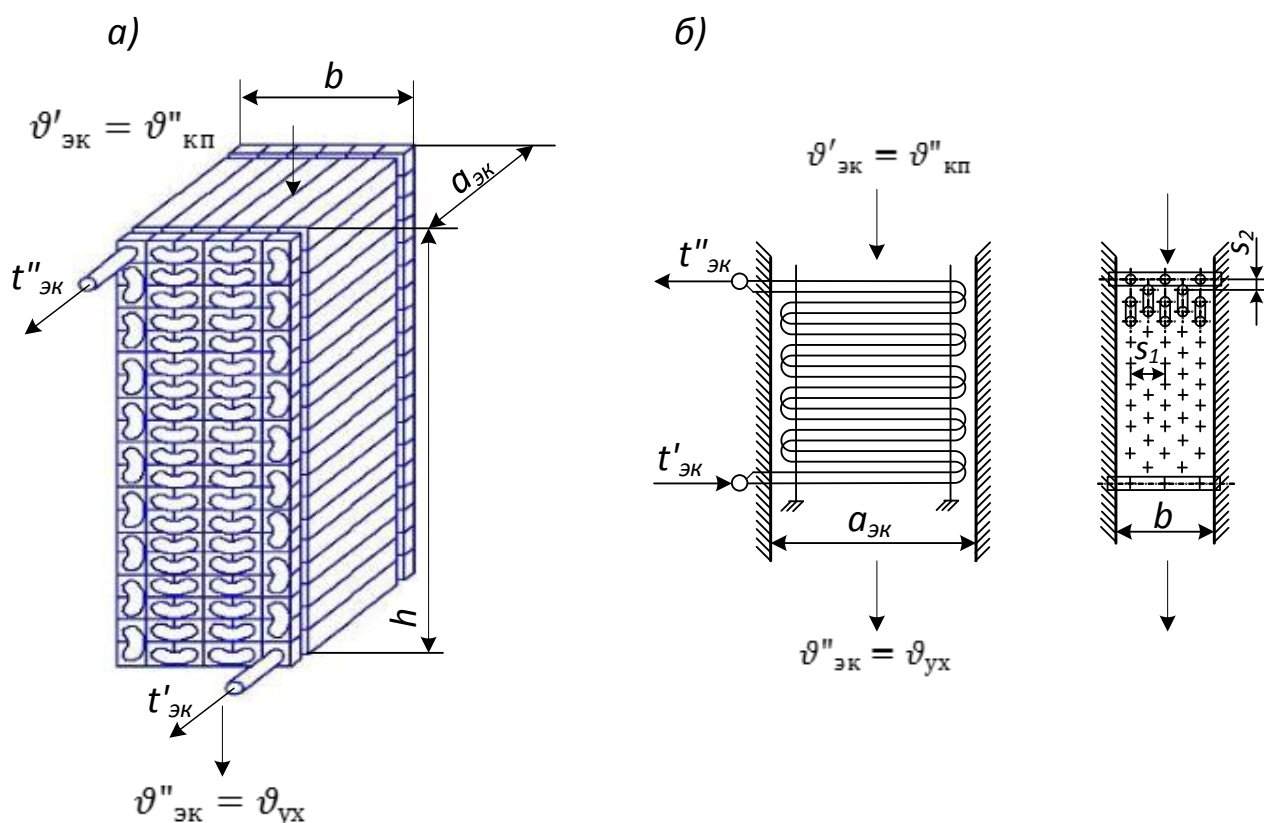


Рисунок 6 – Эскиз экономайзера: а) чугунный; б) стальной

4. Удельная энтальпия воды на выходе из экономайзера, кДж/кг, определяется из уравнения

$$h''_{\text{эк}} = h'_{\text{эк}} + \frac{Q_6 B_p}{D_{\text{эк}}}. \quad (73)$$

Если разность между удельными энтальпиями кипящей воды при давлении в барабане агрегата  $h_{к.в}$  и воды на выходе из экономайзера  $h''_{эк}$  будет больше 125 кДж/кг, т. е.  $h_{к.в} - h''_{эк} \geq 125$  кДж/кг, то в агрегате можно установить экономайзер некипящего типа и при давлении в барабане  $p_6 < 2,3$  МПа использовать чугунные трубы. В противном случае экономайзер должен быть кипящего типа из стальных труб.

Температура среды на выходе из кипящего экономайзера равна температуре насыщения при давлении в барабане  $t''_{эк} = t_{к.в}$ , см. (27).

5. Для кипящего экономайзера паросодержание пароводяной смеси на выходе из экономайзера

$$x_{эк} = \frac{h''_{эк} - h_{к.в}}{r} \cdot 100\%, \quad (74)$$

где  $r$  – теплота парообразования при давлении в барабане, кДж/кг.

Паросодержание  $x_{эк}$  не должно превышать 30%.

6. Количество теплоты, отданное газами, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$Q_6 = Q_{эк} = \varphi(H''_{к.п} - H_{ух} + \Delta\alpha_{эк}H_{х.в}^0). \quad (75)$$

Отсюда находим энтальпию уходящих газов  $H_{ух}$ .

7. По таблице 8 определяем температуру уходящих газов  $\vartheta_{ух}$ , которая должна отличаться от заданной не более чем на  $\pm 10$  °С.

8. Определяют среднюю температуру продуктов сгорания  $\bar{\vartheta} = (\vartheta''_{кп} + \vartheta_{ух})/2$ ;  $\bar{T} = \bar{\vartheta} + 273$ .

9. Определяют средний расход дымовых газов в экономайзере по (58).

10. Выбирают скорость продуктов сгорания. По условиям истирания труб экономайзера золой скорость газов  $w_T$  принимается 7–14 м/с (оптимальными считаются скорости 8–10 м/с).

11. Для воды определяем среднюю температуру  $\bar{t} = (t_{п.в} + t''_{эк})/2$ , среднее давление  $\bar{p} = (p_{п.в} + p_6)/2$ .

12. Определяем удельный объем воды  $v_B$  при  $\bar{t}$  и  $\bar{p}$  [см. 2, прил. V].

13. Определяют средний температурный напор  $\Delta t_{ср}$  по (57), рисунок 7.

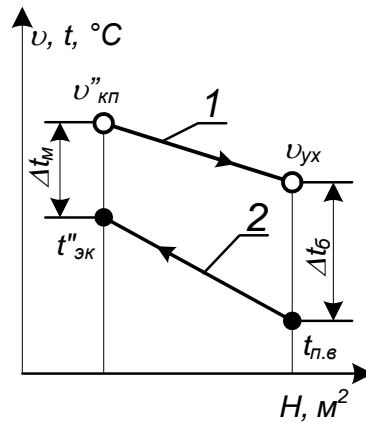


Рисунок 7 – График изменения температуры сред в экономайзере при противотоке:  
1 – температура дымовых газов; 2 – температура воды

### 5.8.1. Расчет чугунного экономайзера

1. Площадь проходного сечения для газов  $F$ ,  $\text{м}^2$ , находят по (59).
2. Число труб в ряду для чугунного экономайзера

$$z_1 = F/F_{\text{тр}}, \quad (76)$$

где  $F_{\text{тр}}$  – площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания для одной трубы (таблица 16).

Таблица 16 – Конструктивные характеристики труб чугунных экономайзеров ВТИ и ЦККБ

Характеристика одной трубы	Экономайзер ВТИ				Экономайзер ЦККБ
	1500	2000	2500	3000	
Длина $l_{\text{тр}}$ , мм	1500	2000	2500	3000	1990
Площадь поверхности нагрева с газовой стороны $H_{\text{тр}}$ , $\text{м}^2$	2,18	2,95	3,72	4,49	5,50
Площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания $F_{\text{тр}}$ , $\text{м}^2$	0,088	0,120	0,152	0,184	0,210

Число  $z_1$  округляют до целого и уточняют площадь проходного сечения  $F$  и скорость газов. Число труб в ряду  $z_1$  для чугунных экономайзеров должно быть не менее 3 и не более 10.

3. Определяют площадь сечения для прохода воды,  $\text{м}^2$ :

$$f = \frac{D_{\text{ЭК}} v_{\text{В}}}{w_{\text{В}}} = z_{\text{р}} z_1 \frac{\pi d_{\text{ВН}}^2}{4} = n \frac{\pi d_{\text{ВН}}^2}{4}, \quad (77)$$

где  $z_{\text{р}}$  – число рядов труб, выходящих из одного коллектора; для чугунного экономайзера  $z_{\text{р}} = 1$ , для стального экономайзера  $z_{\text{р}} = 2$ ;  $n = z_{\text{р}} z_1$  – число параллельно включенных труб;  $d_{\text{ВН}}$  – внутренний диаметр трубы, м.

Экономайзер ВТИ

Экономайзер ЦККБ

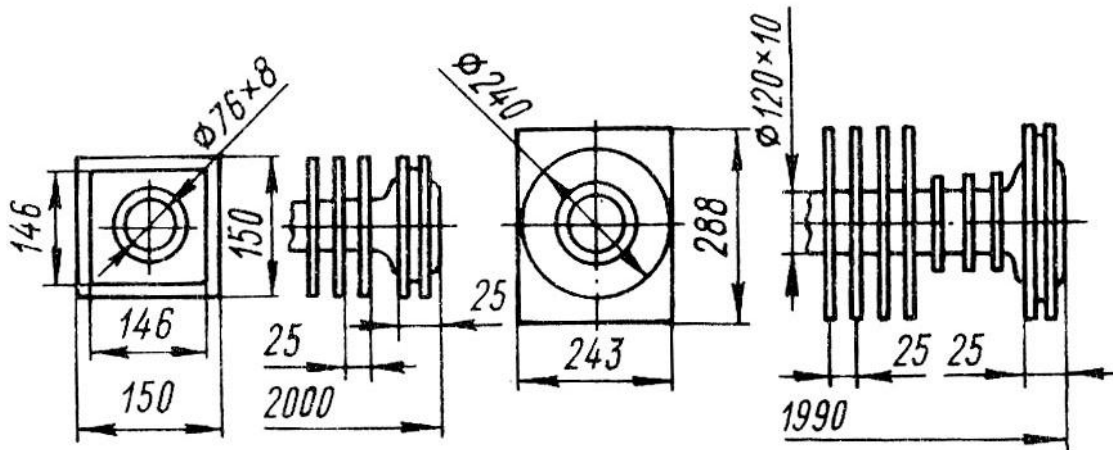


Рисунок 8 – Конструкции чугунных экономайзеров

4. Уточняют скорость воды в экономайзере

$$w_B = \frac{D_{\text{ЭК}} v_B}{f}. \quad (78)$$

Скорость воды  $w_B$  должна удовлетворять рекомендуемым значениям: в «некипящем» экономайзере не должна быть меньше 0,3 м/с; в «кипящем» экономайзере – не менее 1 м/с. Если нужную скорость не удастся получить, то следует изменить число рядов труб  $z_p$ , присоединяемых к коллекторам, или перейти на двухходовую по воде компоновку экономайзера [4].

5. Определяют коэффициент теплопередачи  $k$  по номограмме 5 [4].

6. По уравнению теплопередачи (69) находят площадь поверхности нагрева экономайзера  $H$ , м<sup>2</sup>.

7. Количество труб в чугунном экономайзере

$$z = H/H_{\text{ТР}}. \quad (79)$$

Округляем полученное значение до целого.

8. Количество рядов труб

$$z_2 = z/z_1. \quad (80)$$

Округляем полученное значение до целого, уточняем общее число труб  $z$ , поверхность нагрева  $H$  и воспринятое тепло  $Q_T$ .

Обычно в чугунных экономайзерах число труб по высоте  $z_2 \leq 10$ . При большем количестве экономайзер компоуется в две колонки  $z_k = 2$  [4].

9. Невязка между балансовой теплотой  $Q_6$  и теплотой  $Q_T$  (70) не должна превышать 5%.

10. Размеры газохода экономайзера (см. рисунок 6):

- глубина  $a_{\text{ЭК}} = l_{\text{ТР}}$ , м;
- ширина  $b_{\text{ЭК}} = s_p z_1 z_k$ , м, где  $s_p$  – размер ребра трубы экономайзера (рисунок 8);
- высота  $h_{\text{ЭК}} = s_p z_2$ , м.

### 5.8.2. Расчет стального экономайзера

Стальные экономайзеры выполняются в виде змеевиков из гладких труб с наружным диаметром 28, 30, 32 и 38 мм при толщине стенки 2,5–3,5 мм, Ст. 20; расположение труб шахматное ( $s_1/d = 2,3 - 3,5$ ;  $s_2/d = 1,5 - 2,5$ ), омывание газами поперечное. Змеевики располагаются как параллельно, так и перпендикулярно фронту котла.

1. Выбирают диаметр труб экономайзера  $d$ , определяем поперечный  $s_1$  и продольный  $s_2$  шаги.
2. Задаются скоростью воды, в «кипящем» экономайзере  $w_b \geq 1,0$  м/с.
3. Определяют площадь проходного сечения для воды  $f$  по (78).
4. Находят количество параллельно включенных труб  $n$  по (77), округляем до четного значения, находим число труб поперек потока газа  $z_1 = n/z_p$ .
5. Определяют ширину газохода экономайзера, м

$$b = (z_1 + 1) \cdot s_1. \quad (81)$$

6. Принимаем глубину газохода экономайзера равной глубине котла  $a_{\text{ЭК}} = a_{\text{Т}}$ .
7. Длина труб экономайзера принимается равной глубине газохода  $l = a_{\text{ЭК}}$ .
8. Определяют площадь проходного сечения для продуктов сгорания, м<sup>2</sup>

$$F = a_{\text{ЭК}} b - z_1 dl. \quad (82)$$

9. Уточняем скорость продуктов сгорания  $w_r$ , м/с, по (59).
10. Коэффициент теплоотдачи конвекцией при поперечном омывании шахматных пучков определяется по рис. П4.5 [1]  $\alpha_k = \alpha_n c_z c_s c_\phi$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).
11. Определяют степень черноты потока газов по (39), (43), (61) – (63).
12. Температура наружных загрязнений  $t_3$ , °С, по (64). Для экономайзеров при сжигании твердых и жидких топлив при  $\vartheta'_{\text{ЭК}} > 400$  °С  $\Delta t = 60$  °С; при  $\vartheta'_{\text{ЭК}} \leq 400$  °С  $\Delta t = 25$  °С. При сжигании газа  $\Delta t = 25$  °С.
13. Коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания  $\alpha_l$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), определяется по рис. П4.8 [1], (65)–(66).
14. Коэффициент теплоотдачи по  $\alpha_1$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), по (67). Коэффициент использования принимается  $\xi = 1,0$ .
15. Коэффициент тепловой эффективности (при сжигании газа и мазута) по таблице 15.

16. Коэффициент загрязнения поверхностей нагрева (при сжигании твердого топлива), (м<sup>2</sup>·К)/Вт

$$\varepsilon = C_d \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon, \quad (83)$$

где  $C_d$  – поправка на диаметр (рисунок 9);  $\varepsilon_0$  – исходный коэффициент загрязнения, (м<sup>2</sup>·К)/Вт, зависит от скорости газов и относительного продольного шага труб и определяется по рисунку 9;  $\Delta\varepsilon$  – поправка, зависящая от температуры газов, типа поверхности и сорта сжигаемого топлива, (м<sup>2</sup>·К)/Вт, принимается по таблице 17.

Таблица 17 – Выбор поправки  $\Delta\varepsilon$ , (м<sup>2</sup>·К)/Вт

Наименование поверхности нагрева	Топлива, дающие сыпучие отложения	Канско-ачинские угли и сланцы с очисткой
Одноступенчатый экономайзер и другие поверхности при $\vartheta'_{\text{эк}} \leq 400$ °С	0	0
Одноступенчатые экономайзеры при $\vartheta'_{\text{эк}} > 400$ °С	0,0017	0,0026

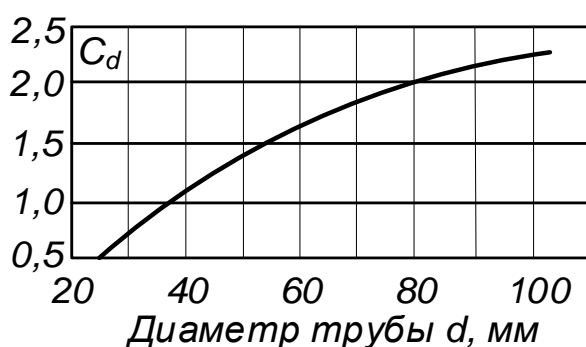
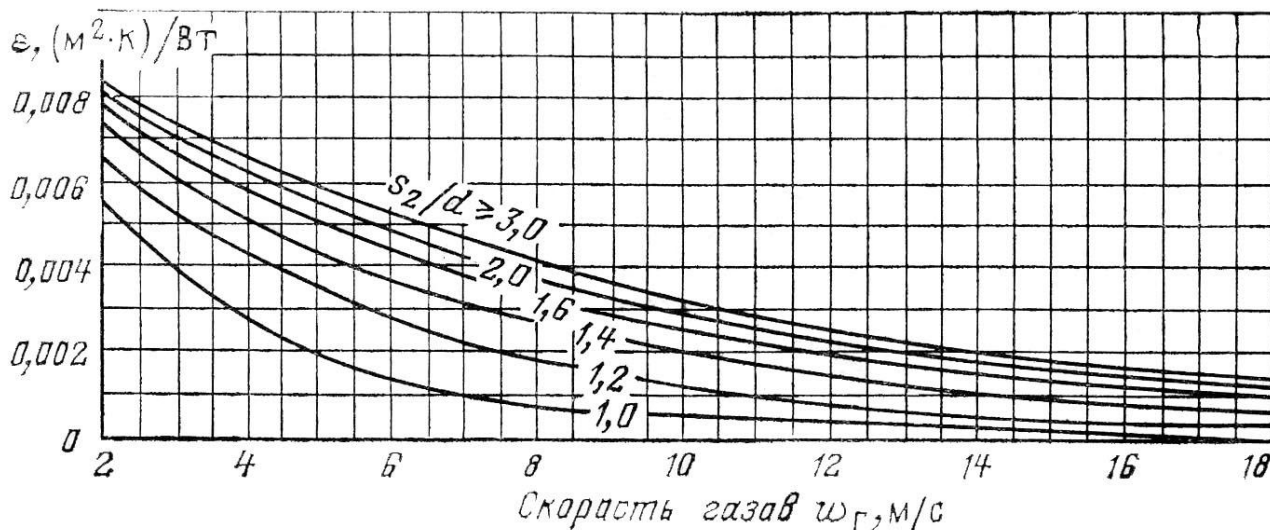


Рисунок 9 – Коэффициент загрязнения шахматных гладкотрубных пучков при сжигании твердых топлив

17. Коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

– при сжигании твердого топлива

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon\alpha_1}; \quad (84)$$

– при сжигании газа и мазута

$$k = \psi\alpha_1. \quad (85)$$

18. Площадь поверхности нагрева экономайзера  $H$ ,  $\text{м}^2$ , по (69).

19. Длина каждого змеевика, определяемая по наружному диаметру труб,  $\text{м}$ :

$$l_{\text{зм}} = \frac{H}{n\pi d}, \quad (86)$$

20. Число петель

$$z_{\text{пет}} = \frac{l_{\text{зм}}}{2a_{\text{ЭК}}}. \quad (87)$$

21. Число петель округляют до целого.

22. Уточняют поверхность нагрева  $H$  по (86) и воспринятое тепло  $Q_{\text{т}}$  по формуле (69). Невязка между балансовой теплотой  $Q_{\text{б}}$  и теплотой  $Q_{\text{т}}$  (70) не должна превышать 5%.

23. Шаг одной петли экономайзера равен  $s_{\text{пет}} = 2s_2$ , тогда полная высота пакета экономайзера

$$h_{\text{ЭК}} = z_{\text{пет}} \cdot s_{\text{пет}}. \quad (88)$$

Экономайзерные поверхности компонуются пакетами высотой 1000–1500 мм с разрывами между соседними ступенями экономайзера в 600–800 мм (между экономайзером и воздухоподогревателем разрывы составляют 800–1000 мм). В итоге устанавливается высота, которую занимает в конвективной шахте экономайзер.

## Рекомендуемая литература

1. Котельные установки и парогенераторы [Электронный ресурс]: учебник/ В.М. Лебедев [и др.].— Электрон. текстовые данные.— М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013.— 375 с.
2. Губарев А.В. Паротеплогенерирующие установки промышленных предприятий [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов/ Губарев А.В.— Электрон. текстовые данные.— Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2013.— 240 с.
3. Минкина С.А. Тепловой и аэродинамический расчеты котельных агрегатов [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Минкина С.А.— Электрон. текстовые данные.— Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2013.— 104 с.
4. Водяные экономайзеры котельных агрегатов [Электронный ресурс]: методическая разработка/ — Электрон. текстовые данные.— Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2010.— 48 с.
5. <http://www.bikz.ru/> – сайт ОАО «Бийский котельный завод» (ОАО «БикЗ»).