

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

**Н.П. ЖУКОВ, Н.Ф. МАЙНИКОВА,  
О.Н. ПОПОВ, Е.В. ПУДОВКИНА, А.О. АНТОНОВ**

# **КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ**

Утверждено Учёным советом в качестве учебного пособия  
к выполнению курсового проекта для студентов,  
изучающих дисциплину «Котельные установки и парогенераторы»



---

Тамбов  
• Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» •  
2013

УДК 621.181.04  
ББК 31.361я73  
Ж86

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Прикладная механика и  
сопротивление материалов» ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
*В.Ф. Першин*

Доктор технических наук, профессор, заместитель директора  
по научной работе ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии  
*С.А. Нагорнов*

Ж86            Котельные установки : учебное пособие / Н.П. Жуков,  
Н.Ф. Майникова, О.Н. Попов, Е.В. Пудовкина, А.О. Антонов. –  
Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 80 с. – 50 экз.  
ISBN 978-5-8265-1187-9

Содержит рекомендации к тепловому, аэродинамическому и гидравлическому расчётам котла в связи с переводом его на другое топливо. Рассчитано на совместное использование с «Нормативными методами» теплового, аэродинамического и гидравлического расчётов.

Тематика и содержание курсового проекта соответствуют требованиям государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированного специалиста 140100 «Теплоэнергетика» специальности 140106 «Энергообеспечение предприятий» и по направлению подготовки 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника» магистерской программы 140100.03 «Технология производства электрической и тепловой энергии».

Предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Котельные установки и парогенераторы».

УДК 621.181.04  
ББК 31.361я73

**ISBN 978-5-8265-1187-9**

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2013

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Курсовой проект выполняется по заданию, выдаваемому преподавателем. В проекте: изучаются характеристики котла-прототипа и его конструкция, условия эксплуатации; уточняются характеристики заданного топлива, способ его сжигания, температура горячего воздуха и коэффициент его избытка в топке; рассчитываются энтальпии продуктов сгорания для всего газового тракта котла; вычисляются потери тепла с уходящими газами, КПД котлоагрегата и расход топлива; производится расчёт теплообмена в топочной камере; производится расчёт конвективных поверхностей нагрева; определяется КПД котлоагрегата (по прямому балансу); производится сравнение полученных характеристик проекта с прототипом и даётся объяснение имеющихся различий; выполняется аэродинамический расчёт газового и воздушного трактов котельного агрегата, гидравлический расчёт контура циркуляции парового котла.

Рекомендуемый объём курсового проекта – 60...80 страниц (формат А4), при этом расчётные данные сводятся по возможности в таблицы и графики для обеспечения максимальной компактности расчётно-пояснительной записки. Расчёты выполняются с использованием ЭВМ.

По завершению расчётов необходимо выполнить графическую часть проекта.

### 1. Рекомендуемый объём разделов проекта

Раздел проекта	Объём, %
1. Описание конструкции котла	8
2. Расчёт объёмов и энтальпии продуктов сгорания, построение $H-t$ -диаграммы	5
3. Составление теплового баланса и определение расхода топлива	5
4. Расчёт топки	10
5. Расчёт конвективных поверхностей нагрева	10
6. Аэродинамический расчёт	8
7. Гидравлический расчёт	8
8. Расчёт тепловой схемы котельной	8
9. Оформление расчётно-пояснительной записки	8
10. Графическая часть	30

## ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Для выполнения поверочного теплового расчёта котлоагрегата студентам необходимо выдать следующие исходные данные:

- тип котла;
- номинальная производительность;
- давление пара;
- температура перегретого пара;
- месторождение и марка топлива;
- температура питательной воды.

Чертежи агрегата, по которым могут быть определены размеры топочной камеры, площади поверхностей нагрева отдельных элементов и их конструктивные данные (диаметр труб, их число и расположение, продольный и поперечный шаг, проходные сечения для продуктов сгорания и рабочей среды, размеры газоходов), студенты находят самостоятельно.

Варианты заданий на выполнение курсового проекта приведены в табл. 2 и 3. Номер варианта задания студент получает у преподавателя.

### 2. Задания на проектирование паровых котлов

Вариант	Тип котла	Водяной пар			Температура питательной воды $t_{п.в.}$ , °С	Топливо, месторождение
		Производительность $D$ , т/ч	Давление $P$ , МПа	Температура $t_{п.п.}$ , °С		
1	2	3	4	5	6	7
1	Е-160-100	160	9,8	540	215	Мазут 40 малосернистый
2						Газ, Саратов–Москва
3						Уголь, Донецкий, ДР
4						Уголь, Кузнецкий, Т
5						Древесина
6	Е-320-140	320	13,8	560	230	Мазут 40 сернистый
7						Газ, Первомайск–Сторожевка
8						Уголь, Подмосковский, Б2
9						Уголь, Воркутинское месторождение, Ж
10						Моторное топливо

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
11	Е-420-13,8-560	420	13,8	560	230	Мазут 40 высокосернистый
12						Газ, Брянск–Москва
13						Уголь, Березовское месторождение, Б2
14						Уголь, Азейское месторождение, Б3
15						Соляровое масло
16	ДКВр-6,5-13	6,5	1,4	230	100	Мазут 100 высокосернистый
17						Газ, Ярино–Пермь
18						Уголь, Норильское месторождение, СС
19						Уголь, Артёмовский, Б3
20						Торф
21	Пп-2650-25-545	2650	25	545	270	Мазут 100 сернистый
22						Газ, Ставрополь– Грозный
23						Уголь, Липовецкое месторождение, Д
24						Уголь, Ургальское месторождение, Г
25						Дизельное топливо
26	ДЕ-10-14	10	1,4	230	100	Мазут 100 малосернистый
27						Газ, Ставрополь– Москва
28						Уголь, Сахалинское месторождение, Д
29						Уголь, Сангарское месторождение, Д
30						Сланцы
31	ДКВр-10-13	10	1,4	-	104	Уголь , Челябинский, Б3
32						Газ, Бухара–Урал
33						Уголь, Ирша- Бородинское месторождение, Б2
35						Уголь, Кизеловский, Г

### 3. Задания на проектирование водогрейных котлов

Вариант	Тип котла	Теплопроизводительность, МВт	Температура питательной воды, °С	Температура теплоносителя, °С	Топливо, месторождение
1	2	3	4	5	6
1	КВ-ГМ-209-150	209	110	150	Мазут 100 сернистый
2					Газ, Брянск–Москва
3					Мазут 100 малосернистый
4					Газ, Ярино–Пермь
5					Дизельное топливо
6	КВ-ГМ-116,3-150	116,3	70	150	Мазут 100 высокосернистый
7					Газ, Бухара–Урал
8					Мазут 40 сернистый
9					Газ, Саратов–Москва
10					Биогаз
11	КВ-ТС-50	58,15	90	130	Уголь, Челябинский, БЗ
12					Уголь, Кизеловский, Г
13					Уголь, Сучанский, Т
14					Пеллеты
15					Сланцы
16	КВ-ТК-50	58,15	70	115	Уголь, Донецкий, Т
17					Уголь, Кузнецкий, Д
18					Уголь, Печорский, Ж
19					Уголь, Подмосковский, Б2
20					Торф

# 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАЗДЕЛОВ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

## 1.1. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОТЛА

Для поверочного теплового расчёта необходимы следующие данные: объём топочной камеры, площадь поверхности стен топочной камеры, тип экранов, расстояние экранных труб от обмуровки стен топки, наружный диаметр и толщина стенки экранных труб, расположение горелок, наружный диаметр и толщина стенки труб пароперегревателя, расположение змеевиков, продольный и поперечный шаг, живое сечение для прохода продуктов сгорания, площадь поверхности нагрева конвективного газохода, наружный диаметр и толщина стенки труб конвективных пучков, расположение труб, продольный и поперечный шаг труб, число труб в ряду, число рядов труб по ходу продуктов сгорания, площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания в конвективных пучках.

Указанные конструктивные характеристики определяют из чертежа рассчитываемого котла. По общим видам котлоагрегата следует составить его расчётную схему. При сложном расположении поверхностей нагрева составляют схемы отдельных газоходов.

## 1.2. ПОВЕРОЧНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ КОТЛА

### 1.2.1. Расчёт объёмов, энтальпий воздуха и продуктов сгорания

При тепловом расчёте паровых и водогрейных котлов определяются теоретические и действительные объёмы воздуха и продуктов сгорания [1 – 3]. Это производится в следующей последовательности.

1. Определить теоретический объём воздуха, необходимый для полного сгорания:

при сжигании сухого газообразного топлива

$$V^0 = 0,0478 \left[ 0,5(\text{CO} + \text{H}_2) + 1,5\text{H}_2\text{S} + 2\text{CH}_4 + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m\text{H}_n - \text{O}_2 \right];$$

при сжигании твёрдого и жидкого топлива

$$V^0 = 0,0889 \left( C^p + 0,375S_{\text{оп}}^p \right) + 0,265\text{H}^p - 0,0333\text{O}_2.$$

2. Определить теоретические объёмы продуктов сгорания.

Объём двухатомных газов:

при сжигании сухого газообразного топлива

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + \frac{\text{N}_2}{100};$$

при сжигании твёрдого и жидкого топлива

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,8 \frac{N^p}{100}.$$

Объём трёхатомных газов:

при сжигании сухого газообразного топлива

$$V_{RO_2} = 0,01[CO_2 + CO + H_2S + \sum m C_m H_n];$$

при сжигании твёрдого и жидкого топлива

$$V_{RO_2} = 1,866 \frac{C^p + 0,375S_{op}^p}{100}.$$

Объём сухих газов

$$V_{c.g}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0.$$

Объём водяных паров:

при сжигании сухого газообразного топлива

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \left[ H_2S + H_2 + \sum \left( \frac{n}{2} \right) C_m H_n + 0,124d_r \right] + 0,016V^0;$$

при сжигании твёрдого и жидкого топлива

$$V_{H_2O}^0 = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0161V^0,$$

где  $d_r$  – влагосодержание газообразного топлива, отнесённое к 1 м<sup>3</sup> сухого газа, г/м<sup>3</sup>.

3. Определить средний коэффициент избытка воздуха в газоходе для каждой поверхности нагрева (П4, П5).

4. Определить избыточное количество воздуха для каждого газохода

$$V_{изб}^B = V^0(\alpha_{cp} - 1).$$

5. Определить действительные объёмы:

1) объём водяных паров

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



2) суммарный объём продуктов сгорания

$$V_{\Gamma} = V_{\text{с.г}}^0 + V_{\text{изб}}^{\text{в}} + V_{\text{H}_2\text{O}}.$$

6. Определить объёмные доли трёхатомных газов и водяных паров, а также суммарную объёмную долю

$$r_{\text{RO}_2} = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_{\Gamma}}; \quad r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\Gamma}}; \quad r_{\text{п}} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}.$$

7. При сжигании твёрдого топлива определить концентрацию золовых частиц в продуктах сгорания

$$\mu = \frac{10A^{\text{п}} a_{\text{yh}}}{V_{\Gamma}},$$

где  $a_{\text{yh}}$  – доля золы топлива в уносе (определяется по [1]).

Расчёт энтальпии продуктов сгорания производится при действительных коэффициентах избытка воздуха после каждой поверхности нагрева [1 – 7]. Определение энтальпии воздуха и продуктов сгорания рекомендуется вести в следующей последовательности.

1. Вычислить энтальпию теоретического объёма воздуха для всего выбранного диапазона значений температуры

$$H_{\text{в}}^0 = V^0 (c\theta)_{\text{в}}.$$

Здесь:  $(c\theta)_{\text{в}}$  – энтальпия воздуха, кДж/м<sup>3</sup> (Пб);  $V^0$  – теоретический объём воздуха.

2. Определить энтальпию теоретического объёма продуктов сгорания для всего выбранного диапазона температуры

$$H_{\Gamma}^0 = V_{\text{RO}_2} (c\theta)_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} (c\theta)_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} (c\theta)_{\text{H}_2\text{O}}.$$

Здесь:  $(c\theta)_{\text{CO}_2}$ ,  $(c\theta)_{\text{N}_2}$ ,  $(c\theta)_{\text{H}_2\text{O}}$  – энтальпии трёхатомных газов, теоретического объёма азота, теоретического объёма водяных паров (Пб);  $V_{\text{RO}_2}$ ,  $V_{\text{N}_2}$ ,  $V_{\text{H}_2\text{O}}$  – объёмы трёхатомных газов, теоретического объёма азота и водяного пара, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>).

3. Определить энтальпию избыточного количества воздуха для всего выбранного диапазона значений температуры

$$V_{\text{изб}}^{\text{в}} = (\alpha - 1) H_{\text{в}}^0.$$

4. Определить энтальпию продуктов сгорания (при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha > 1$ , кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>))

$$H = H_{\text{изб}}^B + H_{\text{r}}^0 + H_{\text{эл}},$$

где  $H_{\text{эл}}$  – энтальпия золы, кДж/кг.

$$H_{\text{эл}} = (c\theta)_{\text{эл}} \frac{A^P a_{\text{ун}}}{100},$$

где  $(c\theta)_{\text{эл}}$  – энтальпия 1 кг золы, кДж/кг (Пб).

### 1.2.2. Расчётный тепловой баланс и расход топлива

Тепловой баланс – это распределение теплоты, вносимой в котлоагрегат при сжигании, на полезно использованную теплоту и тепловые потери. Тепловой баланс составляется на 1 кг твёрдого (жидкого) или на 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива применительно к установившемуся тепловому состоянию котельного агрегата [1 – 7].

Уравнение теплового баланса имеет вид

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6.$$

В процентах от располагаемой теплоты:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100.$$

Здесь:  $q_1 = (Q_1/Q_p^p) \cdot 100$ ;  $q_2 = (Q_2/Q_p^p) \cdot 100$  и т.д.;  $Q_p^p$  – располагаемая теплота, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг);  $Q_1 (q_1)$  – теплота, полезно использованная в котлоагрегате на получение пара, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг);  $Q_2 (q_2)$  – потери теплоты с уходящими газами, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг);  $Q_3 (q_3)$  – потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг);  $Q_4 (q_4)$  – потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг);  $Q_5 (q_5)$  – потери теплоты в окружающую среду, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг);  $Q_6 (q_6)$  – потери теплоты с физической теплотой шлака, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг).

Располагаемая теплота

$$Q_p^p = Q_n^c + Q_{\text{тл}} + Q_{\text{в.вн}} + Q_{\text{ф}} - Q_{\text{к}}.$$

Здесь:  $Q_n^c$  – низшая теплота сгорания сухой массы топлива, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг);  $Q_{\text{в.вн}}$  – теплота, вносимая в топку с воздухом, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг);  $Q_{\text{ф}}$  – теплота, вносимая в топку с паровым дутьём, кДж/м<sup>3</sup>

(кДж/кг);  $Q_{\text{тл}}$  – физическая теплота топлива, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг);  $Q_{\text{к}}$  – теплота, затраченная на разложение карбонатов рабочей массы сланцев, содержащей CaCO<sub>3</sub> и MgCO<sub>3</sub>, с образованием газообразного CO<sub>2</sub><sup>к</sup>.

Тепловые расчёты котлоагрегатов выполняют, пользуясь низшей теплотой сгорания рабочей массы топлива.

Низшая теплота сгорания (кДж/кг) рабочей массы твёрдого и жидкого топлива

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 338C^{\text{п}} + 1025H^{\text{п}} - 108,5(O^{\text{п}} - S_{\text{л}}^{\text{п}}) - 25W^{\text{п}},$$

где  $C^{\text{п}}$ ,  $H^{\text{п}}$ ,  $O^{\text{п}}$ ,  $S_{\text{л}}^{\text{п}}$ ,  $W^{\text{п}}$  – содержание элементов в рабочей массе топлива, %.

Низшая теплота сгорания газообразного топлива

$$\begin{aligned} Q_{\text{н}}^{\text{с}} = & 108H_2 + 126CO + 234H_2S + 358CH_4 + 591C_2H_4 + \\ & + 638C_2H_6 + 860C_3H_6 + 913C_3H_8 + 1135C_4H_8 + \\ & + 1187C_4H_{10} + 1461C_5H_{12} + 1403C_6H_6. \end{aligned}$$

Здесь: H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> и т.д. – объёмное содержание газов, входящих в состав газообразного топлива, %.

Теплота, вносимая в топку с воздухом при его внешнем подогреве, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг)

$$Q_{\text{в.вн}} = \alpha_{\text{т}} V^0 c'_{\text{рв}} \Delta t_{\text{в}}.$$

Здесь:  $\alpha_{\text{т}}$  – коэффициент избытка воздуха в топке;  $V^0$  – теоретический объём воздуха, необходимый для полного сгорания 1 м<sup>3</sup> (кг) топлива, (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), (м<sup>3</sup>/кг);  $c'_{\text{рв}}$  – средняя объёмная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении, кДж/(м<sup>3</sup>·К) (кДж/(кг·К));  $\Delta t_{\text{в}}$  – разность значений температуры подогретого и холодного воздуха, °С.

Теплота, вносимая в топку с паровым дутьём

$$Q_{\text{ф}} = W_{\text{ф}} (h_{\text{ф}} - 2510).$$

Здесь:  $W_{\text{ф}}$ ,  $h_{\text{ф}}$  – расход и энтальпия пара, идущие на дутьё и распыливание топлива (кг/кг и кДж/кг, соответственно).

Физическая теплота топлива

$$Q_{\text{тл}} = c_{\text{т}}^{\text{п}} t_{\text{т}}.$$

Здесь:  $c_{\text{т}}^{\text{п}}$  – теплоёмкость рабочей массы топлива, кДж/(м<sup>3</sup>·К) (кДж/(кг·К));  $t_{\text{т}}$  – температура топлива на входе в топку, °С.

Теплота, полезно используемая в котлоагрегате, кВт:

$$Q_1 = (1 + P) D_{п.п} (h_{п.п} - h_{п.в}).$$

Здесь:  $D_{п.п}$  – расход перегретого пара, кг/с;  $h_{п.п}$ ,  $h_{п.в}$  – энтальпия перегретого пара, питательной воды, кДж/кг;  $P$  – величина непрерывной продувки.

Потери теплоты с уходящими газами

$$Q_2 = \frac{(H_{y.г} - \alpha_{y.г} H_{x.в}^0)(100 - q_4)}{100}.$$

Здесь:  $H_{y.г}$  – энтальпия уходящих газов, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг);  $H_{x.в}^0$  – энтальпия холодного воздуха, кДж/м<sup>3</sup>;  $\alpha_{y.г}$  – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах;  $q_4$  – потери теплоты от механической неполноты сгорания.

$$H_{x.в}^0 = V^0 c_p t_b.$$

Здесь:  $V^0$  – теоретический объём воздуха, необходимый для полного сгорания 1 м<sup>3</sup> сухого газообразного топлива;  $c_p$  – теплоёмкость воздуха;  $t_b$  – температура забора воздуха.

Величины потерь теплоты от химической  $q_3$  и механической  $q_4$  неполноты сгорания топлива принимают по табл. 4.

Потери  $q_5$  в зависимости от паропроизводительности котлоагрегата принимают по табл. 5.

**Таблица 4**

Топливо	Суммарные потери $q_3 + q_4$ , % при нагрузке котла, %		
	100	70 – 100	< 70
Мазут	0,1...0,15	0,15...0,2	0,3...0,4
Газ	0,05...0,07	0,05...0,01	0,1...0,15

Примечание. Для твёрдых топлив величину механического недожога принимают в соответствии с табл. XVIII – XXI [7].

**Таблица 5**

$D$ , кг/с	25	75	100	125	150	175	200	$\geq 250$
$q_5$ , %	0,75	0,5	0,45	0,4	0,3	0,275	0,25	0,2

Потери с физической теплотой шлака  $q_6$ , %:

$$q_6 = \frac{a_{\text{шл}} c_{\text{шл}} t_{\text{шл}} A^r}{Q_p^p}$$

Здесь:  $a_{\text{шл}}$  – доля золы в шлаке;  $c_{\text{шл}}$  – теплоёмкость шлака;  $t_{\text{шл}}$  – температура шлака;  $A^r$  – зольность.

КПД брутто котла (как отношение полезно затраченной теплоты к израсходованной) может быть найдено из уравнения прямого баланса, %:

$$\eta_{\text{ка}} = \frac{Q_1}{B Q_H^c} \cdot 100.$$

Здесь  $B$  – полный расход топлива,  $\text{м}^3/\text{с}$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ).

По обратному балансу КПД брутто, %:

$$\eta_{\text{ка}} = q_1 = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6).$$

### 1.2.3. Расчёт топочной камеры

Целью расчёта является определение температуры газов на выходе из топки [1 – 7]. Для достижения поставленной цели расчёт рекомендуется вести в следующей последовательности.

1. Задаются температурой продуктов сгорания на выходе из топки.

2. Для принятой температуры определить энтальпию продуктов сгорания на выходе из топки.

3. Подсчитать полезное тепловыделение в топке,  $\text{кДж}/\text{кг}$  ( $\text{кДж}/\text{м}^3$ ):

$$Q_T = Q_p^p \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_B - Q_{B, \text{вн}} + r H_{\text{отб}}.$$

Здесь  $Q_B$  – теплота, вносимая в топку воздухом,  $\text{кДж}/\text{кг}$  ( $\text{кДж}/\text{м}^3$ ).

$$Q_B = (\alpha_T - \Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{\text{пл}}) H_{\text{г.в}}^0 + (\Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{\text{пл}}) H_{\text{х.в}}^0.$$

Здесь:  $\alpha_T$  – коэффициент избытка воздуха;  $\Delta\alpha_T$  – присосы воздуха в топку;  $\Delta\alpha_{\text{пл}}$  – присосы воздуха в системе пылеприготовления;  $H_{\text{г.в}}^0$  – энтальпия теоретически необходимого горячего воздуха,  $\text{кДж}/\text{кг}$  ( $\text{кДж}/\text{м}^3$ );  $H_{\text{х.в}}^0$  – энтальпия присосанного холодного воздуха при

$t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $H_{\text{г.в}}^0 = 39,8 V^0$ );  $Q_{\text{в.вн}}$  – теплота, внесённая в котельный агрегат с поступившим в него воздухом, учитывается только при внешнем подогреве вне котлоагрегата, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  $rH_{\text{отб}}$  – теплота рециркулирующих продуктов сгорания, учитывается только при возврате в топку части продуктов сгорания, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>).

4. Коэффициент тепловой эффективности экранов

$$\psi = x\xi.$$

Здесь:  $x$  – угловой коэффициент (П7);  $\xi$  – коэффициент, учитывающий снижение тепловосприятия экранных поверхностей нагрева (П8). Для неэкранированных топок  $\psi = 0$ .

5. Эффективная толщина излучающего слоя

$$s = 3,6V_{\text{т}} / F_{\text{ст}}.$$

Здесь:  $V_{\text{т}}$  – объём топочной камеры, м<sup>3</sup>;  $F_{\text{ст}}$  – поверхность стен топочной камеры, м<sup>2</sup>.

6. Определить коэффициент ослабления лучей при сжигании жидкого и газообразного топлива, (м·МПа<sup>-1</sup>):

$$k = k_{\text{г}}r_{\text{п}} + k_{\text{с}}.$$

Здесь:  $k_{\text{г}}$  – коэффициент ослабления лучей трёхатомными газами, (м·МПа)<sup>-1</sup> (П9);  $k_{\text{с}}$  – коэффициент ослабления лучей сжатыми частицами, (м·МПа)<sup>-1</sup>;  $r_{\text{п}}$  – суммарная объёмная доля трёхатомных газов.

Коэффициент ослабления лучей сжатыми частицами

$$k_{\text{с}} = 0,3(2 - \alpha_{\text{т}}) \left( 1,6 \frac{T_{\text{т}}''}{1000} - 0,5 \right) \frac{C^{\text{P}}}{H^{\text{P}}},$$

где  $C^{\text{P}}$ ,  $H^{\text{P}}$  – содержание углерода и водорода в рабочей массе жидкого топлива.

При сжигании природного газа

$$\frac{C^{\text{P}}}{H^{\text{P}}} = 0,12 \sum \frac{m}{n} C_m H_n,$$

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

При сжигании твёрдого топлива

$$k = k_{\text{г}}r_{\text{п}} + k_{\text{эл}}\mu_{\text{эл}} + k_{\text{к}}.$$

Здесь:  $k_{эл}$  – коэффициент ослабления лучей частицами летучей золы,  $(\text{м}\cdot\text{МПа})^{-1}$  (П10);  $\mu_{эл}$  – средняя массовая концентрация золы;  $k_{к}$  – коэффициент ослабления лучей частицами кокса,  $(\text{м}\cdot\text{МПа})^{-1}$  (определяется по [1]).

7. Степень черноты факела для твёрдого топлива

$$\alpha_{\phi} = \alpha,$$

где  $\alpha$  – степень черноты среды, заполняющей топку.

Степень черноты среды зависит от оптической толщины среды ( $kps$ ) и определяется по П11.

Для жидкого и газообразного топлив

$$\alpha_{\phi} = m\alpha_{св} + (1-m)\alpha_{г}.$$

Здесь:  $m$  – коэффициент, характеризующий долю топочного объёма, заполненного светящейся частью факела (П12);  $\alpha_{св}$ ,  $\alpha_{г}$  – степень черноты светящейся части факела и несветящихся трёхатомных газов.

$$\alpha_{св} = 1 - e^{-(k_{г} r_{н} + k_{с}) ps},$$

$$\alpha_{г} = 1 - e^{-k_{г} r_{н} ps}.$$

8. При слоевом сжигании твёрдого топлива определить площадь зеркала горения,  $\text{м}^2$ :

$$R = BQ_{н}^D / q_{з.г}.$$

Здесь  $q_{з.г}$  – удельная нагрузка зеркала горения,  $\text{кВт}/\text{м}^2$ .

9. Степень черноты топки.

Для слоевых топок

$$\alpha_{т} = \frac{\alpha + (1-\alpha)R / F_{ст}}{\alpha - (1-\alpha)(1-\psi_{ср})(1-R / F_{ст})},$$

где  $R$  – площадь зеркала горения,  $\text{м}^2$ .

Для камерных топок при сжигании твёрдого топлива

$$\alpha_{т} = \frac{\alpha}{\alpha + (1-\alpha)\psi_{ср}}.$$

Для камерных топок при сжигании жидкого и газообразного топлив

$$\alpha_{т} = \frac{\alpha_{\phi}}{\alpha_{\phi} + (1-\alpha_{\phi})\psi_{ср}}.$$

10. Определить параметр  $M$ :

– при сжигании газа и мазута

$$M = 0,54 - 0,2x_T ;$$

– при камерном сжигании высокорекреакционных топлив и слоевом сжигании всех видов топлив

$$M = 0,59 - 0,5x_T ;$$

– при сжигании малореакционных твёрдых топлив, а также каменных углей с повышенной зольностью

$$M = 0,56 - 0,5x_T .$$

Относительное положение максимума температуры для большинства топлив определяется как:

$$x_T = h_T / H_T .$$

Здесь:  $h_T$  – расстояние от пода топки до оси горелки, м;  $H_T$  – расстояние от пода топки до середины выходного окна топки, м.

11. Средняя суммарная теплоёмкость продуктов сгорания

$$Vc_{cp} = \frac{Q_T - H_T''}{T_a - T_T''} .$$

Здесь:  $T_a$  – теоретическая (адиабатная) температура горения, К;  $T_T''$  – температура (абсолютная) на выходе из топки, К;  $H_T''$  – энтальпия продуктов сгорания, кДж/кг;  $Q_T$  – полезное тепловыделение в топке, кДж/кг.

12. Действительная температура на выходе из топки

$$\vartheta_T'' = \frac{T_a}{M \left( \frac{5,67 \Psi_{cp} F_{ct} a_T T_a^3}{10^{11} \phi B_p Vc_{cp}} \right)^{0,6} + 1} .$$

Полученная температура сравнивается с принятой ранее, если расхождение не превышает  $\pm 30$  °С, то расчёт считается окончанным. В противном случае задаются новым значением температуры на выходе из топки и расчёт повторяют.

13. Удельные нагрузки колосниковой решётки (кВт/м<sup>2</sup>) и топочного объёма (кВт/м<sup>3</sup>) рассчитывают по формулам:

$$q_{з.г} = B Q_H^p / R ; \quad q_v = B Q_H^p / V_T .$$



## 1.2.4. Расчёт конвективных поверхностей нагрева

Конвективные поверхности нагрева котлоагрегатов играют важную роль в процессах получения пара и горячей воды, а также при использовании теплоты продуктов сгорания, покидающих топочную камеру. Эффективность работы конвективных поверхностей нагрева в значительной мере зависит от интенсивности передачи теплоты продуктами сгорания воде и пару.

### 1.2.4.1. Расчёт конвективных пучков котла

Количество теплоты, отданное продуктами сгорания, приравнивается к теплоте, воспринятой водой или паром. Для расчёта задаются двумя значениями температуры продуктов сгорания ( $\vartheta'_1$  и  $\vartheta''_{11}$ ) после прохождения рассчитываемой поверхности нагрева. Затем уточняют значение температуры дымовых газов (продуктов сгорания) путём последовательных приближений [1 – 3].

Расчёт конвективных поверхностей нагрева рекомендуется производить в следующей последовательности.

1. Из чертежей котлоагрегата определить конструктивные характеристики (площадь поверхности нагрева, диаметр труб, продольный и поперечный шаги труб, площадь живого сечения, число рядов труб, количество труб в ряду).

Площадь поверхности нагрева, расположенная в рассчитываемом газоходе,  $\text{м}^2$

$$H = \pi d l n.$$

Здесь:  $d$  – наружный диаметр труб, м;  $l$  – длина труб, м;  $n$  – общее число труб в газоходе, шт.

По конструктивным данным подсчитываются относительные поперечный и продольный шаги

$$\sigma_1 = S_1 / d, \quad \sigma_2 = S_2 / d.$$

Здесь:  $S_1$  – поперечный шаг труб, м;  $S_2$  – продольный шаг труб, м.

Площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания,  $\text{м}^2$  :

– при поперечном омывании гладких труб

$$F = ab - z_1 l d;$$

– при продольном омывании гладких труб

$$F = ab - z \frac{\pi d^2}{4}.$$

Здесь:  $a$  и  $b$  – размеры газохода в расчётных сечениях, м;  $l$  – длина труб, м;  $z$  – число труб в пучке;  $z_1$  – число труб в ряду;  $z_2$  – число рядов труб.

2. Предварительно принять два значения температуры продуктов сгорания после рассчитанного газохода.

3. Теплота, отданная продуктами сгорания, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$Q_0 = \varphi(H' - H'' + \Delta\alpha_k H_{\text{прс}}^0).$$

Здесь:  $\varphi$  – коэффициент сохранения теплоты;  $H'$  – энтальпия продуктов сгорания перед поверхностью нагрева, кДж/кг;  $H''$  – энтальпия продуктов сгорания после рассчитываемой поверхности нагрева, кДж/кг;  $\Delta\alpha_k$  – присос воздуха в конвективную поверхность нагрева;  $H_{\text{прс}}^0$  – энтальпия присосанного в конвективную поверхность нагрева воздуха при температуре 30 °С.

4. Расчётная температура потока продуктов сгорания в конвективном газоходе, °С:

$$\vartheta = \frac{\vartheta' + \vartheta''}{2},$$

где  $\vartheta'$  и  $\vartheta''$  – значения температуры продуктов сгорания на входе в поверхность и выходе из неё.

5. Температурный напор

$$\Delta t = \vartheta - t_k,$$

где  $t_k$  – температура охлаждающей среды, °С.

6. Средняя скорость продуктов сгорания в поверхности нагрева, м/с:

$$w_\Gamma = \frac{B_p V_\Gamma (\vartheta + 273)}{273 F}.$$

Здесь:  $B_p$  – расчётный расход топлива, кг/с (м<sup>3</sup>/с);  $V_\Gamma$  – объём продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг;  $\vartheta$  – средняя расчётная температура продуктов сгорания, °С;  $F$  – площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания, м<sup>2</sup>.

7. Коэффициент теплоотдачи конвекцией от продуктов сгорания к поверхности нагрева:

– при поперечном омывании коридорных и шахматных пучков и ширм

$$\alpha_k = \alpha_n c_z c_s c_\phi;$$

– при продольном омывании

$$\alpha_k = \alpha_n c_l c_\phi .$$

Здесь:  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи излучением (П13, П14 и [1, 3]);  $c_z$ ,  $c_s$ ,  $c_\phi$  – поправки (определяются из тех же номограмм, только необходимо вычислить среднюю температуру воздуха и относительные шаги);  $c_l$  – поправка на относительную длину, вводится при  $l/d < 50$  в случае прямого входа в трубу.

8. Степень черноты газового потока. Для этого необходимо определить суммарную оптическую толщину

$$kps = (k_{г,п} + k_{эл,п})ps ,$$

где  $p$  – давление в газоходе, МПа.

Толщина излучающего слоя для гладкотрубных пучков, м:

$$s = 0,9d \left( \frac{4}{\pi} \frac{s_1 s_2}{d^2} - 1 \right) .$$

9. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{л}$ , учитывающий передачу теплоты излучением в конвективных поверхностях нагрева, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

– для запылённого потока

$$\alpha_{л} = \alpha_n a ;$$

– для незапылённого потока

$$\alpha_{л} = \alpha_n a c_r .$$

Здесь:  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи (определяется по П15);  $a$  – степень черноты;  $c_r$  – коэффициент (П15).

Для определения  $\alpha_n$  и  $c_r$  вычисляется температура загрязнённой стенки, °С:

$$t_3 = t - \Delta t .$$

Здесь:  $t$  – средняя температура окружающей среды, °С;  $\Delta t$  при сжигании твёрдого и жидкого топлива принимается 60 °С, при сжигании газа 25 °С.

10. Суммарный коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности нагрева, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_1 = \xi(\alpha_k + \alpha_{л}) .$$

Здесь  $\xi$  – коэффициент использования. Для поперечного омывания пучков принимается 1, для сложно омываемых пучков 0,95.

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

$$K = \psi \alpha_1 .$$

Здесь  $\psi$  – коэффициент тепловой эффективности (П16, П17).

12. Количество теплоты, воспринятое поверхностью нагрева, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$Q_{\tau} = \frac{KH\Delta t}{B_p \cdot 10^3} .$$

Здесь  $\Delta t$  – температурный напор, °С.

13. По принятым двум значениям температуры  $\vartheta'_1$  и  $\vartheta''_{11}$  и полученным двум значениям  $Q_6$  и  $Q_{\tau}$  производится графическая интерполяция для определения температуры продуктов сгорания после поверхности нагрева. Точка пересечения прямых укажет температуру продуктов сгорания  $\vartheta''_p$ . Если её значение отличается от одного из принятых не более чем на 50 °С, то для завершения расчёта необходимо по  $\vartheta''_p$  повторно определить только  $Q_{\tau}$ , сохранив прежние коэффициенты. При большем расхождении заново определяется коэффициент теплопередачи для найденной температуры  $\vartheta''_p$ .

#### 1.2.4.2. Расчёт конвективных пароперегревателей

Задачей расчёта является определение температуры продуктов сгорания после пароперегревателя и выявление возможности получения необходимой температуры перегретого пара (при имеющейся поверхности нагрева пароперегревателя).

Последовательность расчёта пароперегревателя зависит от расположения его в газовом тракте котельного агрегата, способа регулирования температуры перегрева пара и схемы включения регулятора перегрева.

Расчёт конвективного пароперегревателя, имеющего поверхностный или впрыскивающий пароохладитель, установленный вращесчку, производится по частям [1].

Расчёт первой по ходу продуктов сгорания части пароперегревателя производится в следующей последовательности.

1. Из чертежей котла-прототипа определить конструктивные характеристики (площадь поверхности нагрева первой части, располо-

жение труб, продольный и поперечный шаги труб, площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания и пара).

2. Выбрать основные расчётные параметры: температуру продуктов сгорания на входе в пароперегреватель, давление, температуру и энтальпию перегретого пара. Задаются тепловосприятием пароохладителя  $\Delta h_{\text{по}} = 60 \dots 80$  кДж/кг.

3. Задаются двумя значениями температуры продуктов сгорания после первой ступени пароперегревателя. Далее расчёт ведётся для принятых значений температуры.

4. Теплота, отданная продуктами сгорания пару, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$Q_{\text{б}} = \phi(H' - H'' + \Delta\alpha_{\text{пп}} H_{\text{прс}}^0).$$

Здесь:  $\Delta\alpha_{\text{пп}}$  – присос воздуха в газоход пароперегревателя.

5. Энтальпия пара на выходе из газохода пароперегревателя (с учётом пароохладителя), кДж/кг:

$$h''_{\text{по}} = h_{\text{п.п}} - \frac{Q_{\text{б}} B_{\text{р}}}{D}.$$

Здесь:  $h_{\text{п.п}}$  – энтальпия перегретого пара, кДж/кг;  $B_{\text{р}}$  – расчётный расход топлива, кг/с.

6. Определить температуру пара после пароохладителя.

7. Определить температурный напор

$$\Delta t_{\text{п.п}} = \psi \Delta t_{\text{прт}}.$$

Здесь  $\Delta t_{\text{прт}}$  – температурный напор при противотоке;  $\psi$  – коэффициент пересчёта от противоточной схемы к последовательно смешанной [П18].

8. Подсчитать среднюю скорость продуктов сгорания в газоходе пароперегревателя, м/с:

$$w_{\text{г}} = \frac{B_{\text{р}} V_{\text{г}} (\vartheta + 273)}{273 F}.$$

9. Определить коэффициент теплоотдачи конвекцией (п. 1.2.4.1).

10. Вычислить расчётную скорость пара в змеевиках пароперегревателя, м/с:

$$w_{\text{п}} = \frac{D v_{\text{ср}}}{f}.$$

Здесь:  $D$  – расход пара, кг/с;  $v_{cp}$  – средний удельный объём пара, м<sup>3</sup>/кг;  
 $f$  – площадь живого сечения для прохода пара, м<sup>2</sup>;  $f = 0,785 d_{вн}^2 z$ ;  $d_{вн}$  –  
 внутренний диаметр труб пароперегревателя, м;  $z$  – число параллельно  
 включённых труб.

11. Подсчитать коэффициент теплоотдачи от стенки к пару,  
 Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_2 = \alpha_n c_d .$$

Здесь:  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи (П19);  $c_d$  – коэффициент (П19).

12. Найти степень черноты газового потока в соответствии с ука-  
 заниями, описанными выше (п. 1.2.4.1).

13. Вычислить температуру стенки труб пароперегревателя, при-  
 нимаемую при сжигании твёрдого и газообразного топлива при темпе-  
 ратуре наружного слоя золовых отложений на трубах, °С:

$$t_3 = t + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \frac{B_p}{H} Q_6 .$$

Здесь:  $t$  – среднеарифметическое значение температуры пара в рассчи-  
 тываемой части пароперегревателя, °С;  $\varepsilon$  – коэффициент загрязнения,  
 (м<sup>2</sup>·К)/Вт (принимается для пароперегревателей с коридорным и шах-  
 матным расположением труб при сжигании жидких топлив  
 $\varepsilon = 0,00257$ ; для пароперегревателей с коридорным расположением  
 труб при сжигании твёрдых топлив  $\varepsilon = 0,0043$ ).

При сжигании газообразного топлива

$$t_3 = t + 25 ,$$

где  $t$  – среднеарифметическое значение температуры пара в рассчиты-  
 ваемой части пароперегревателя, °С.

14. Коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

– для запылённого потока (при сжигании твёрдого топлива)

$$\alpha_{л} = \alpha_n a ;$$

– для незапылённого потока (при сжигании жидкого и газообраз-  
 ного топлив)

$$\alpha_{л} = \alpha_n a c_r .$$

Здесь:  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи (П15);  $a$  – степень черноты;  $c_r$  –  
 коэффициент (П15).

15. Коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к стенке  
 пароперегревателя, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_1 = \xi(\alpha_k + \alpha_n).$$

Здесь  $\xi$  – коэффициент использования (для поперечного омывания пучков принимается равным 1).

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

$$K = \frac{\psi\alpha_1}{1 + \alpha_1/\alpha_2}.$$

Здесь  $\psi$  – коэффициент тепловой эффективности (П16, П17).

12. Количество теплоты, воспринятое пароперегревателем, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$Q_T = \frac{KH\Delta t}{B_p \cdot 10^3}.$$

Здесь  $\Delta t$  – температурный напор, °С.

13. По принятым двум значениям температуры и полученным двум значениям  $Q_6$  и  $Q_T$  производится графическая интерполяция для определения температуры продуктов сгорания после пароперегревателя. Точка пересечения прямых укажет температуру продуктов сгорания  $\vartheta_p''$ . По этой температуре определяются  $Q_6$  и энтальпия пара на выходе из пароохладителя.

На этом расчёт первой части пароперегревателя закончен.

Расчёт второй по ходу продуктов сгорания части пароперегревателя, имеющего пароохладитель, и пароперегревателей без пароохладителей производится в следующей последовательности.

1. Из чертежей определить конструктивные характеристики (площадь поверхности нагрева всего пароперегревателя или рассчитываемой второй части, расположение труб, относительные шаги труб, площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания и пара).

2. Выбрать основные расчётные параметры: температуру продуктов сгорания на входе в пароперегреватель или перед его частью, давление, температуру и энтальпию перегретого пара. Энтальпия пара после второй части пароперегревателя, кДж/кг:

$$h'_{по} = h''_{по} + \Delta h_{по}.$$

3. По таблице XXV [3] (XVII [12], П22) по величине  $h'_{по}$  и давлению пара найти температуру перегретого пара после второй части пароперегревателя.

4. Определить тепловосприятие пароперегревателя, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>).

Без пароохладителя

$$Q_{\text{пп}} = \frac{D}{B_p} (h_{\text{п.п}} - h_{\text{н}}).$$

С поверхностным пароохладителем

$$Q_{\text{пп}} = \frac{D}{B_p} (h'_{\text{по}} - h_{\text{н}}).$$

С впрыскивающим пароохладителем

$$Q_{\text{пп}} = \frac{D - \Delta D}{B_p} (h'_{\text{по}} - h_{\text{н}}).$$

Здесь:  $h_{\text{п.п}}$  – энтальпия перегретого пара, кДж/кг;  $h'_{\text{по}}$  – энтальпия пара после второй части пароперегревателя, кДж/кг;  $D$  – расход перегретого пара кг/с;  $B_p$  – расход топлива м<sup>3</sup>/с или кг/с;  $\Delta D$  – расход охлаждающей воды на впрыскивающий пароохладитель, кг/с.

Расход воды на впрыскивающий пароохладитель, кг/с:

$$\Delta D = D - \frac{\Delta h_{\text{по}}}{h'_{\text{по}} - h_{\text{ж}}}.$$

Здесь  $h_{\text{ж}}$  – энтальпия воды, подаваемой в пароохладитель.

5. Определить энтальпию продуктов сгорания после пароперегревателя

$$H''_{\text{пп}} = H'_{\text{пп}} - \frac{Q_{\text{пп}}}{\varphi} - \Delta \alpha_{\text{пп}} H_{\text{в}}^0.$$

Здесь:  $H'_{\text{пп}}$  – энтальпия продуктов сгорания перед пароперегревателем, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  $\varphi$  – коэффициент сохранения теплоты;  $H_{\text{в}}^0$  – энтальпия теоретического объёма воздуха, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  $Q_{\text{пп}}$  – тепловосприятие пароперегревателя или его части.

6. По величине  $H''_{\text{пп}}$  при коэффициенте избытка воздуха после пароперегревателя определить температуру продуктов сгорания.

7. При расчёте второй части пароперегревателя коэффициент теплопередачи следует принимать равным коэффициенту теплопередачи, рассчитанному для первой части.

8. В зависимости от схемы взаимного движения продуктов сгорания и пара определить температурный напор [1 – 7].



9. Определить количество теплоты, воспринятое пароперегревателем, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$Q_{\Gamma} = \frac{KH\Delta t}{B_p \cdot 10^3}.$$

10. Произвести сравнение тепловосприятий пароперегревателя  $Q_{\Gamma}$  и  $Q_{\text{пп}}$  (в процентах):

$$\Delta Q = \frac{Q_{\Gamma}}{Q_{\text{пп}}} \cdot 100.$$

Если расхождение между  $Q_{\Gamma}$  и  $Q_{\text{пп}}$  составляет не более 2% (при отсутствии пароохладителя 3%), расчёт пароперегревателя считается окончанным, так как существующая поверхность нагрева обеспечит необходимую температуру перегретого пара.

В противном случае следует определить необходимую площадь поверхности нагрева всего пароперегревателя или его второй части, м<sup>2</sup>:

$$H' = \frac{B_p \cdot 10^3 Q_{\text{пп}}}{K\Delta t}.$$

#### 1.2.4.3. Расчёт водяных экономайзеров

1. По уравнению теплового баланса определить количество теплоты, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$Q_6 = \varphi(H'_{\text{эк}} - H''_{\text{эк}} + \Delta\alpha_{\text{эк}}H_B^0).$$

Здесь:  $H'_{\text{эк}}$  – энтальпия продуктов сгорания на входе в экономайзер, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  $H''_{\text{эк}}$  – энтальпия уходящих газов, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  $\varphi$  – коэффициент сохранения теплоты;  $\Delta\alpha_{\text{эк}}$  – присос воздуха в экономайзер;  $H_B^0$  – энтальпия теоретического количества воздуха.

2. Определить энтальпию воды после водяного экономайзера, кДж/кг:

$$h''_{\text{эк}} = \frac{B_p Q_6}{D + D_{\text{пр}}} + h'_{\text{эк}}.$$

Здесь:  $h'_{\text{эк}}$  – энтальпия воды на входе в экономайзер, кДж/кг;  $D$  – паро-производительность котла, кг/с;  $D_{\text{пр}}$  – расход продувочной воды, кг/с.

3. В зависимости от направления движения воды и продуктов сгорания определить температурный напор [1 – 7].

4. Выбрать конструктивные характеристики водяного экономайзера.

5. Определить действительную скорость продуктов сгорания в экономайзере, м/с:

$$w_{\Gamma} = \frac{B_{\text{p}} V_{\Gamma} (\vartheta_{\text{эк}} + 273)}{273 F_{\text{эк}}} .$$

Здесь:  $B_{\text{p}}$  – расчётный расход топлива, кг/с ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $V_{\Gamma}$  – объём продуктов сгорания при среднем коэффициенте избытка воздуха;  $\vartheta_{\text{эк}}$  – средне-арифметическая температура продуктов сгорания в экономайзере, °С;  $F_{\text{эк}}$  – площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания,  $\text{м}^2$ .

Площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания:

– при установке чугунного водяного экономайзера

$$F_{\text{эк}} = z_1 F_{\text{тр}} ;$$

– при установке стального водяного экономайзера

$$F_{\text{эк}} = ab - z_1 ld .$$

Здесь:  $F_{\text{тр}}$  – площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания одной трубы;  $z_1$  – число труб в ряду;  $a$  и  $b$  – размеры газохода, м;  $d$  – наружный диаметр труб, м.

6. Определить коэффициент теплоотдачи:

– для чугунных экономайзеров

$$k = k_{\text{нсв}} [1, \text{рис. 6.9}];$$

– для стальных водяных экономайзеров

$$k = \psi \alpha_1 .$$

Здесь  $\psi$  – коэффициент тепловой эффективности (П16, П17).

7. Определить площадь поверхности нагрева водяного экономайзера,  $\text{м}^2$ :

$$H_{\text{эк}} = \frac{10^3 B_{\text{p}} Q_{\text{эк}}}{k \Delta t} .$$

8. По величине площади полученной поверхности нагрева экономайзера окончательно установить его конструктивные характеристики.

Для чугунного экономайзера определить общее число труб и число рядов:

$$n = H_{\text{эк}}/H_{\text{тр}}; \quad m = n/z_1.$$

Здесь:  $H_{\text{тр}}$  – площадь поверхности нагрева одной трубы,  $\text{м}^2$ ;  $z_1$  – принятое число труб в ряду.

Для стального экономайзера определить длину каждого змеевика ( $\text{м}$ ), число петель и полную высоту пакетов экономайзера,  $\text{м}$ :

$$l_{\text{эк}} = H_{\text{эк}}/\pi dz; \quad z_{\text{пет}} = l_{\text{эк}}/a'; \quad h_{\text{эк}} = z_{\text{пет}}S_{\text{пет}}.$$

Здесь:  $d$  – наружный диаметр труб экономайзера,  $\text{м}$ ;  $z$  – полное число труб экономайзера, включённых параллельно;  $a'$  – длина пакета экономайзера,  $\text{м}$ ;  $S_{\text{пет}}$  – шаг петли экономайзера,  $\text{м}$ .

9. Определить невязку теплового баланса,  $\text{кДж/кг}$  ( $\text{кДж/м}^3$ ):

$$\Delta Q = Q_{\text{р}}^{\text{п}} \eta_{\text{бр}} - (Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{пе}} + Q_{\text{эк}}) \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right),$$

где  $Q_{\text{л}}$ ,  $Q_{\text{к}}$ ,  $Q_{\text{пп}}$ ,  $Q_{\text{эк}}$  – количества теплоты, воспринятые лучевоспринимающими поверхностями топки, котельными пучками, пароперегревателем и экономайзером. Невязка не должна превышать 0,5%.

#### 1.2.4.4. Расчёт воздухоподогревателей

В современных паровых и водогрейных котлах, особенно при сжигании влажных топлив, широко применяются воздухоподогреватели. Для промышленных паровых и водогрейных котлов в основном применяются трубчатые воздухоподогреватели. Расчёт трубчатых воздухоподогревателей, установленных после водяного экономайзера, производится в следующей последовательности.

1. Из чертежей котла-прототипа определить конструктивные характеристики (диаметр, продольный и поперечный шаги труб, площадь живого сечения, число ходов).

2. Определить минимальный температурный напор на горячем конце воздухоподогревателя ( $^{\circ}\text{C}$ ):

$$t_{\text{гор}} = \vartheta'_{\text{вп}} - t_{\text{г.в}},$$

где  $\vartheta'_{\text{вп}}$  – температура продуктов сгорания на входе в воздухоподогреватель, °С;  $t_{\text{г.в}}$  – температура горячего воздуха, °С.

3. Определить тепловосприятие воздуха в воздухоподогревателе

$$Q_{\text{вп}} = \left( \beta_{\text{г.в}} + \frac{\alpha_{\text{вп}}}{2} \right) (H_{\text{г.в}}^0 - H_{\text{вп}}^0),$$

где  $\beta_{\text{г.в}}$  – соотношение количества горячего воздуха к теоретически необходимому.

$$\beta_{\text{г.в}} = \alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{пл}}.$$

Здесь:  $\alpha_{\text{т}}$ ,  $\Delta\alpha_{\text{т}}$ ,  $\Delta\alpha_{\text{пл}}$  – присосы воздуха в топку, воздухоподогреватель и системы пылеприготовления;  $H_{\text{г.в}}^0$ ,  $H_{\text{вп}}^0$  – энтальпия теоретического количества воздуха на входе и выходе из воздухоподогревателя, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>).

4. Из уравнения теплового баланса определить энтальпию продуктов сгорания после воздухоподогревателя, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>):

$$H''_{\text{вп}} = H'_{\text{вп}} - \frac{Q_{\text{вп}}}{\varphi} + \Delta\alpha_{\text{вп}} H_{\text{в}}^0.$$

Полученное значение  $H''_{\text{вп}}$  сравнивается с предварительно принятым. Если расхождение не превысит 0,5% располагаемой теплоты  $Q_{\text{р}}^{\text{п}}$ , то расчёт выполнен правильно.

5. Определить температурный напор в воздухоподогревателе [1].

6. Определить скорость продуктов сгорания в воздухоподогревателе, м/с:

$$w_{\text{г}} = \frac{B_{\text{р}} V_{\text{г}} (\vartheta + 273)}{273 F_{\text{вп}}}.$$

Здесь:  $B_{\text{р}}$  – расчётный расход топлива, кг/с (м<sup>3</sup>/с);  $V_{\text{г}}$  – объём продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг;  $\vartheta$  – среднеарифметическая температура продуктов сгорания на входе и выходе из воздухоподогревателя, °С;  $F_{\text{вп}}$  – площадь поперечного сечения для прохода продуктов сгорания, м<sup>2</sup>.

7. Определить скорость воздуха в воздухоподогревателе, м/с:

$$w_{\text{в}} = \frac{B_{\text{р}} \beta_{\text{г.в}} V^0 (t + 273)}{273 F}.$$

Здесь:  $V^0$  – теоретическое количество воздуха, необходимого для горения, м<sup>3</sup>/кг;  $t$  – среднеарифметическая температура воздуха на входе и

выходе из воздухоподогревателя, °С;  $F$  – площадь поперечного сечения для прохода воздуха,  $\text{м}^2$ .

8. Определить коэффициент теплоотдачи конвекцией от продуктов сгорания к стенке в соответствии с указаниями [1].

9. Определить суммарный коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности нагрева,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ :

$$\alpha_1 = \xi(\alpha_k + \alpha_l).$$

Здесь:  $\alpha_l$  – коэффициент теплоотдачи излучением,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\xi$  – коэффициент использования при сжигании угля АШ, фрезерного торфа, мазута и древесного топлива принимают 0,8. Для всех других – 0,85.

10. Определить коэффициент теплоотдачи от стенки поверхности нагрева к воздуху,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

При поперечном омывании коридорных и шахматных пучков

$$\alpha_2 = \alpha_n c_z c_s c_\phi.$$

Здесь:  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи излучением (П16, П17);  $c_z$ ,  $c_s$ ,  $c_\phi$  – поправки, определяются из тех же номограмм после вычисления средней температуры воздуха и относительных шагов.

11. Определить коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ :

$$k = \xi \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

12. Из уравнения теплопередачи определить теплоту, воспринятую воздухом,  $\text{кДж}/\text{кг}$  ( $\text{кДж}/\text{м}^3$ ):

$$Q_{\text{вп}} = \frac{k H_{\text{вп}} \Delta t}{10^3 B_p}.$$

По значению  $Q_{\text{вп}}$  определяется энтальпия горячего воздуха после воздухоподогревателя  $\text{кДж}/\text{кг}$  ( $\text{кДж}/\text{м}^3$ ):

$$H_{\text{г.в}}^0 = \frac{Q_{\text{вп}}}{\beta_{\text{г.в}} + \Delta \alpha_{\text{вп}} / 2} + H_{\text{вп}}^0.$$

По величине  $H_{\text{г.в}}^0$  определяется температура горячего воздуха после воздухоподогревателя  $t_{\text{г.в}}$ . Если эта температура отличается от принятой при составлении уравнения теплового баланса не более чем на  $\pm 40$  °С, то расчёт считается окончанным.

### 1.3. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ КОТЛА

Цель аэродинамического расчёта – выбор тягодутьевых машин по их производительности и перепаду давлений в газовом и воздушном трактах.

В котлах с уравновешенной тягой перепады давлений в воздушном тракте (от места забора воздуха из окружающей среды до входа воздуха в топку) и в газовом тракте (от топки до выхода газов из дымовой трубы) рассчитывают отдельно. Основная часть воздушного тракта от вентилятора до входа в топку находится под давлением, а газовый тракт – под разрежением. В топке поддерживается небольшое разрежение (абсолютное давление близко к атмосферному) [8].

В котлах с наддувом весь газоздушный тракт находится под давлением. Воздушный и газовый тракты рассчитывают совместно.

Воздушный и газовый тракты рассчитывают на номинальную нагрузку котла. Исходные данные (скорости, значения температуры, площади живых сечений и т.п.) для расчёта потерь давления в элементах котла принимают из теплового расчёта.

Сопротивления участков тракта рассчитывают по средним для данного участка условиям, за исключением сосредоточенных в начале или конце участка отдельных местных сопротивлений, которые рассчитывают по соответствующим условиям [8].

Перепад полных давлений по газовому тракту при уравновешенной тяге, Па

$$\Delta p_{\text{п}} = \Delta p \frac{\rho_0}{1,293} - \sum \Delta p_c + \Delta p_{\text{т}}'' .$$

Здесь:  $\Delta p$  – суммарное сопротивление без поправки на сжимаемость газов на участке от топки до выхода из дымовой трубы, Па;  $\sum \Delta p_c$  – суммарная самотяга газового тракта, включая дымовую трубу, Па;  $\Delta p_{\text{т}}''$  – разрежение на выходе из топки, обычно принимается 20 Па.

Перепад полных давлений в воздушном тракте, Па

$$\Delta p_{\text{п}} = \Delta p - p_c - p_{\text{т}}' .$$

Здесь:  $\Delta p$  – суммарное сопротивление на участке от забора воздуха до выхода из горелки, Па;  $p_c$  – суммарная самотяга воздушного тракта, Па;  $p_{\text{т}}' = p_{\text{т}}'' + \rho g b'$  – разрежение в топке на уровне ввода воздуха, Па;  $b'$  – разность отметок между выходом газов из топки и вводом воздуха в топку, м.

Значение самотяги при температуре окружающего воздуха 20 °С на любом участке газоздушного тракта (включая дымовую трубу), Па:

$$\Delta p_c = \pm b(\rho - \rho_0)g.$$

Здесь:  $b$  – разность высот рассматриваемого участка, м;  $\rho$  – средняя плотность потока по высоте участка, кг/м<sup>3</sup>. При движении среды вверх значение самотяги берётся со знаком плюс, при движении вниз – минус.

При работе котла под наддувом перепад полных давлений во всём тракте (воздушном и газовом) составляет

$$\Delta p_{\Pi} = (\Delta p - p_c)_{\text{возд}} + (\Delta p - p_c)_{\text{газ}} - 0,95b,$$

где индексы «возд» и «газ» относятся к воздушной и газовой частям тракта.

Значения указанных выше сопротивлений  $\Delta p$  определяются по зависимостям, приведённым в [8].

Подача дутьевого вентилятора, м<sup>3</sup>/с:

$$V_{\text{д.в}} = B_p V^0 (\alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{пл}} + \Delta\alpha_{\text{вп}}) \frac{t_{\text{х.в}} + 273}{273}.$$

Объёмный расход газов перед дымососом, м<sup>3</sup>/с:

$$V_{\text{д}} = B_p \left[ V_{\text{г}}^0 + (\alpha_{\text{д}} - 1) V^0 \right] \frac{\vartheta_{\text{д}} + 273}{273}.$$

Здесь:  $B_p$  – расчётный расход топлива, кг/с (м<sup>3</sup>/с);  $V^0$  – теоретически необходимое количество воздуха при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/кг;  $V_{\text{г}}^0$  – теоретический объём продуктов сгорания при нормальных условиях и избытке воздуха  $\alpha = 1,0$  м<sup>3</sup>/кг;  $\alpha_{\text{т}}$ ,  $\alpha_{\text{д}}$  – избыток воздуха в топке и перед дымососом;  $\Delta\alpha_{\text{т}}$ ,  $\Delta\alpha_{\text{пл}}$  – присос воздуха в топке и в системе пылеприготовления;  $\Delta\alpha_{\text{вп}}$  – переток воздуха в воздухоподогревателе;  $t_{\text{х.в}}$ ,  $\vartheta_{\text{д}}$  – значения температуры холодного воздуха (30 °С) и газов у дымососа, °С.

Расчётная подача тягодутьевой машины, м<sup>3</sup>/с:

$$Q_p = \beta_1 \frac{V}{z}.$$

Расчётное давление (разряжение) тягодутьевой машины, Па:

$$p_p = \beta_2 \Delta p_{\Pi}.$$

Здесь:  $V$  – расход газа (воздуха), м<sup>3</sup>/с;  $\Delta p_{\Pi}$  – перепад полных давлений, Па;  $z$  – число параллельно работающих тягодутьевых машин на

котле, шт.;  $\beta_1, \beta_2$  – коэффициенты запаса по подаче и давлению, равные 1,1 и 1,2.

Установленная мощность электродвигателей тягодутьевых машин, кВт:

$$N_{эл} = \beta_3 \frac{Q_p P_p}{\eta_3^p} \cdot 10^{-3}.$$

Здесь:  $\beta_3$  – коэффициент запаса мощности электродвигателей (принимают равным 1,1);  $\eta_3^p$  – эксплуатационный КПД тягодутьевой машины при расчётном режиме.

Как правило, на один котёл устанавливают два вентилятора и два дымососа, а в случае наддува – два вентилятора. Для мощных котлов допускается установка трёх-четырёх машин.

## 1.4. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ КОТЛА

### 1.4.1. Гидравлический расчёт котла с естественной циркуляцией

Целью гидравлического расчёта котла с естественной циркуляцией является определение действительной скорости циркуляции, полезного напора, возможности застоя и опрокидывания циркуляции при заданной нагрузке котла.

Определение полезных напоров ( $S_{пол}$ ) подъёмных элементов и гидравлических сопротивлений опускной системы контура производится при нескольких (обычно трёх) предварительно задаваемых расходах (скоростях) циркулирующей в нём воды. Рекомендуемые для этих расчётов значения скоростей циркуляции приведены в табл. 4-1 [9].

Полезный напор (кгс/м<sup>2</sup>) в элементах определяется как разность движущего напора и гидравлического сопротивления:  $S_{пол} = S_{эл} - \Delta p_{эл}$ .

Движущие напоры контура подсчитываются отдельно для каждого элемента или его участков. Для расчёта движущих напоров необходимо определить (п. 4-18 – 4-31 [9]) следующие характеристики.

Высоты экономайзерной ( $h_{эк}$ ) и испарительной частей контура ( $h_{и}$ ) (и их участков)

$$h_{иi} = h_{д.о} + h_i - h_{эк}.$$

Здесь:  $h_i$  – высота  $i$ -го участка, м;  $h_{д.о}$  – высота начального необогреваемого участка трубы, м.



Скорости смеси

$$\bar{\omega}_{\text{см}} = \omega_0 + \bar{\omega}_0'' \left( 1 - \frac{\gamma''}{\gamma'} \right),$$

где  $\omega_0$  – скорость циркуляции, м/с;  $\bar{\omega}_0''$  – среднее значение скорости пара, м/с;  $\gamma'$  – плотность воды на линии насыщения, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma''$  – плотность пара на линии насыщения, кг/м<sup>3</sup>.

Расходные паросодержания

$$\bar{\beta} = \frac{\bar{\omega}_0''}{\bar{\omega}_{\text{см}}}.$$

Движущий напор участка, кгс/м<sup>2</sup>:

$$S_{\text{п}} = h_{\text{п}} \bar{\Phi}_{\text{п}} (\gamma' - \gamma''),$$

где  $h_{\text{п}}$  – высота паросодержащей части рассчитываемого участка;  $\bar{\Phi}_{\text{п}}$  – среднее напорное паросодержание в рассчитываемом участке труб.

Полный движущий напор элемента определяется как сумма движущих напоров отдельных участков.

Гидравлическое сопротивление элемента определяется как сумма всех потерь:

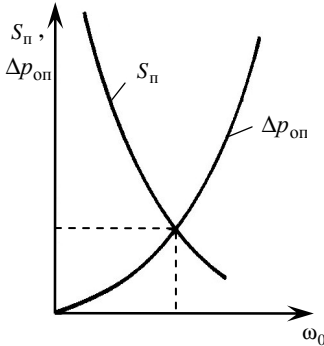
$$\Delta p_{\text{эл}} = \Delta p_{\text{эк}} + \Delta p_{\text{пар}} + \Delta p_{\text{п.о}} + \Delta p_{\text{в.у}},$$

где  $\Delta p_{\text{эк}}$  – гидравлическое сопротивление экономайзерного участка, кгс/м<sup>2</sup>;  $\Delta p_{\text{пар}}$  – гидравлическое сопротивление испарительного участка, кгс/м<sup>2</sup>;  $\Delta p_{\text{п.о}}$  – гидравлическое сопротивление в участке после обогрева, кгс/м<sup>2</sup>;  $\Delta p_{\text{в.у}}$  – потери на подъём пароводяной смеси выше уровня в трубах, выведенных в паровой объём, кгс/м<sup>2</sup>.

Действительные расходы циркулирующей в контурах воды и их полезный напор определяются графически по точке пересечения гидравлических характеристик подъёмной системы труб и общих элементов опускной системы или паропроводящих труб.

Сопротивление опускных и рециркуляционных труб подсчитывается как сумма гидравлических сопротивлений  $\Delta p$  и уменьшения веса столба среды в этих трубах из-за сноса в них пара  $\Delta S_{\text{нив}}$ .

$$\Delta p_{\text{оп}} = \Delta p + \Delta S_{\text{нив}}.$$



**Рис. 1.1. Зависимости**  
 $S_{п} = f(\omega_0)$  и  $\Delta p_{оп} = f(\omega_0)$

Застоя циркуляции не произойдет, если будет выполняться условие безопасности:

$$S_{заст}/S_{пол} = 1,1 \quad (1,2),$$

где  $S_{заст}$  – напор в застое, кгс/м<sup>2</sup>.

$$S_{заст} = (h_{об} \bar{\varphi}_3 + h_{п.о} \varphi_3)(\gamma' - \gamma''),$$

где  $h_{об}$  – сумма высот всех обогреваемых паросодержащих участков, м;  $h_{п.о}$  – высота участков после обогрева, м;  $\bar{\varphi}_3$  – среднее напорное паросодержание застоя в трубе [9, номограмма 12], определяемое по средней скорости пара в наименее обогреваемой трубе;  $\varphi_3$  – напорное паросодержание застоя в трубе [9, номограмма 13], определяемое по средней скорости пара в наименее обогреваемой трубе.

Проверка опрокидывания потока производится по формуле

$$S_{опр}/S_{пол} = 1,1 \quad (1,2),$$

где  $S_{опр}$  – напор опрокидывания для элемента, кгс/м<sup>2</sup>.

Напор опрокидывания для элемента определяется по средней приведенной скорости пара в наименее обогреваемой трубе

$$S_{опр} = S_{опр}^{уд} (h - h_{п.о}),$$

где  $S_{опр}^{уд}$  – удельный напор опрокидывания [9, номограмма 14] определяется по средней приведенной скорости пара в наименее обогреваемой трубе, кг/(м<sup>2</sup>·м);  $h$  – высота элемента, м.

Для построения зависимостей  $S_{п} = f(\omega_0)$  и  $\Delta p_{оп} = f(\omega_0)$  задают несколько значений скорости  $\omega_0$  циркуляции (обычно  $\omega_0 = 0,5; 1,0; 1,5$  м/с) (рис. 1.1).

Для сложных контуров с общей опускной системой строятся отдельно гидравлические характеристики каждого из параллельных контуров и опускных труб [9, рис. 4-4].

При некоторых режимах работы испарительных поверхностей нагрева пароводяная смесь в обогреваемых подъемных трубах может остановиться или пойти вниз, а не вверх.

### 1.4.2. Гидравлический расчёт прямоточного котла

При гидравлическом расчёте прямоточных котельных агрегатов определяют массовые скорости среды, запасы надёжности по устойчивости потока гидравлическим и температурным развёрткам, а также температурный режим труб, потери давления в элементах и котле в целом, необходимость установки дроссельных шайб и их размеры [9].

Перепады давления в прямоточном контуре равны сумме перепадов в его последовательных элементах. Перепад давления в элементе определяется как сумма перепадов давлений в отдельных участках:

$$\Delta p_{\text{эл}} = \sum \Delta p_{\text{уч}}.$$

Перепад давления на участке определяется по формуле

$$\Delta p_{\text{уч}} = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{нив}} + \Delta p_{\text{уск}},$$

где  $\Delta p_{\text{тр}}$  – потеря давления от трения, кгс/м<sup>2</sup>;  $\Delta p_{\text{м}}$  – потеря давления в местных сопротивлениях, кгс/м<sup>2</sup>;  $\Delta p_{\text{нив}}$  – нивелирный перепад давления, кгс/м<sup>2</sup>;  $\Delta p_{\text{уск}}$  – потеря давления на ускорение среды, кгс/м<sup>2</sup> [9, п. 5-24 – 5-32].

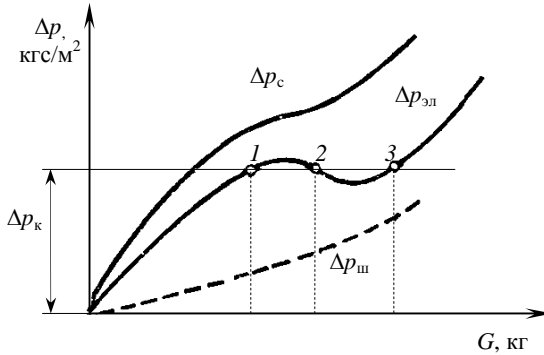
Уравнение гидродинамической характеристики:

$$\Delta p_{\text{эл}} = AG^3 - BG^2 + CG,$$

где  $\Delta p_{\text{эл}} = f(G)$ .

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\zeta \bar{\psi} \Delta h_{\text{вх}}^2}{16qr\gamma'} \left( \frac{\gamma'}{\gamma''} - 1 \right); \\ B &= \frac{\zeta L}{2d\gamma'} \left[ 1 - \frac{\bar{\psi} \Delta h_{\text{вх}}}{r} \left( \frac{\gamma'}{\gamma''} - 1 \right) \right]; \\ C &= \frac{\zeta L^2 q \bar{\psi}}{d^2 r \gamma'} \left( \frac{\gamma'}{\gamma''} - 1 \right), \end{aligned} \right\}$$

где  $\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения гомогенного потока;  $\bar{\psi}$  – относительный коэффициент гидравлического сопротивления пароводяной смеси [10, рис. 3];  $\Delta h_{\text{вх}} = h_1 - h_{\text{вх}}$  – недогрев воды до кипения на входе, кДж/кг;  $\bar{q}$  – средняя удельная тепловая нагрузка, кВт/м<sup>2</sup>;  $r$  – теплота парообразования, кДж/кг.



**Рис. 1.2.** Гидродинамическая характеристика прямооточного котла

Если при некотором перепаде давления между коллекторами, объединяющими трубы котла, равно  $\Delta p_k$ , кривая  $\Delta p_{эл} = f(G)$  пересекается с прямой  $\Delta p_k = \text{const}$  в нескольких точках, то данная гидродинамическая характеристика является неустойчивой (рис. 1.2). Её выравнивание достигается путём установки дроссельных шайб на входе трубы. Сопротивление дроссельной шайбы:

$$\Delta p_{ш} = \psi_{ш} G^2,$$

где  $\psi_{ш} = 0,81(\zeta_{ш} \nu_{вод}) / d_{ш}^4$ ;  $\zeta$  – коэффициент сопротивления шайбы (рис. 2 – 8 [9]);  $\nu_{вод}$  – удельный объём среды при входе в трубы,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $d_{ш}$  – диаметр отверстия дроссельной шайбы, м.

Складывая перепады в трубе и дроссельной шайбе, получаем суммарную кривую:

$$\Delta p_c = \Delta p_{эл} + \Delta p_{ш}.$$

При этом нужно выбрать такое сопротивление шайбы, при котором характеристика движения потока среды в трубе будет устойчивой.

Массовая скорость среды,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ :

$$\omega = \frac{G_{см}}{f_0},$$

где  $G_{см}$  – массовый расход пароводяной смеси через систему труб,  $\text{кг}/\text{с}$  (при поступлении воды через парогенерирующие трубы  $G_{см} = G_B$ );  $f_0$  – поперечное сечение трубы,  $\text{м}^2$ .

Расчёт потерь давления в пароводяном тракте котла ведётся в пределах от запорной арматуры на питательной линии до главной паровой задвижки паропровода острого пара.

Потери давления в пароводяном тракте котельного агрегата включают в себя сопротивление запорной арматуры, обратного и регулирующего питательного клапанов (или дифференциального регулятора) питательной линии.

Расчёт гидравлического сопротивления котельного агрегата производится при его номинальной нагрузке по выражению

$$\Delta p_{\kappa} = \sum \Delta p_{\text{эл}} + \sum \Delta p_{\text{арм}} + \Delta p_{\text{охл}} + \Delta p_{\text{р.п.к}},$$

где  $\sum \Delta p_{\text{эл}}$  – сумма перепадов давления во всех элементах пароводяного тракта, кгс/м<sup>2</sup>;  $\sum \Delta p_{\text{арм}}$  – суммарная потеря давления в котельной арматуре, кгс/м<sup>2</sup>;  $\Delta p_{\text{охл}}$  – потеря давления в пароохладителях, кгс/м<sup>2</sup>;  $\Delta p_{\text{р.п.к}}$  – перепад давления в регулирующем питательном клапане или дифференциальном регуляторе, кгс/м<sup>2</sup>.

### 1.4.3. Гидравлический расчёт котла с многократной принудительной циркуляцией

Задачами гидравлического расчёта котельных агрегатов с многократной принудительной циркуляцией могут являться обеспечение надёжности испарительных поверхностей нагрева и работы циркуляционных насосов, разработка мероприятий по повышению их надёжности, определение производительности и напора циркуляционных насосов [9].

Перепады давления равны сумме перепадов в его последовательных элементах. Перепад давления в элементе определяется как сумма перепадов давлений в отдельных участках:

$$\Delta p_{\text{эл}} = \sum \Delta p_{\text{уч}}.$$

Перепад давления на участке определяется по формуле

$$\Delta p_{\text{уч}} = \Delta p_{\text{ш}} + \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{нив}}.$$

Здесь:  $\Delta p_{\text{ш}}$  – потери давления в дроссельных шайбах, кгс/м<sup>2</sup>;  $\Delta p_{\text{тр}}$  – потеря давления от трения, кгс/м<sup>2</sup>;  $\Delta p_{\text{м}}$  – потеря давления в местных сопротивлениях, кгс/м<sup>2</sup>;  $\Delta p_{\text{нив}}$  – нивелирный перепад давления, кгс/м<sup>2</sup>.

Построим гидравлическую характеристику для одной из панелей боковых экранов. Панель состоит из подводящих труб от нагнетательного коллектора циркуляционного насоса до коллектора экрана (первый участок), экранных труб (второй участок) и пароотводящих труб (третий участок). Перепады давлений на каждом из участков, соответственно:  $\Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_3$  [10, п. 10.3].

Для каждого параллельно включённого элемента (панели) строятся гидродинамические характеристики при различных расходах. При этом задаются линейными скоростями на входе в подъёмные трубы (0,5, 1,0, 1 м/с). Пример построения характеристик (линии 1 – 5) и их графического сложения (линия *A*) дан на рис. 1.3. На этом же рисунке показан перепад давлений в опускной системе от барабана до насоса.

$$\Delta p_{\text{оп}} = z \frac{\omega^2}{2\gamma'} - gH_{\text{оп}}\gamma',$$

где  $z$  – суммарный коэффициент сопротивления,  $z = \lambda l + \zeta$ ;  $H_{\text{оп}}$  – высота от уровня в барабане до оси насосов, м.

В данном уравнении нивелирный напор будет отрицательным (движение среды сверху вниз) и постоянным по значению (линия *D*). Гидравлические сопротивления будут положительными и будут изменяться пропорционально квадрату величины расхода. Суммарный перепад давлений в опускной линии будет выражаться кривой *B*. А так как опускная линия последовательно включена с подъёмными элементами контура, то суммарная характеристика всего контура графически будет определяться как алгебраическая сумма линий *A* и *B* (линия *C*).

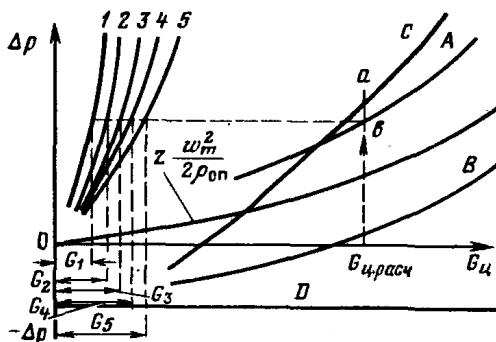


Рис. 1.3. Графоаналитический расчёт циркуляции в паровом котле с многократной принудительной циркуляцией

Задаваясь кратностью циркуляции ( $K = 8 \dots 10$ ), откладываем на оси абсцисс расход  $G_{ц,расч} = 1/2 K D_{ном}$ , проводим перпендикуляр до пересечения с линией  $C$ . Точка пересечения  $a$  даёт параметры для выбора циркуляционного насоса (напор, производительность). Пересечение этого перпендикуляра с линией  $A$  даёт точку  $b$ . Линия, проведённая из этой точки, параллельная оси абсцисс в местах её пересечения с характеристиками контуров, определяет расходы по этим контурам (рис. 1.3).

Для предотвращения вскипания воды перед насосом (запаривание насоса) должно выполняться условие

$$\gamma' g H_{оп} - \Delta p_{оп} > 1,1 \Delta p_{вс},$$

где  $\Delta p_{вс}$  – величина напора насоса, кгс/м<sup>2</sup> (устанавливается изготовителем).

## 1.5. РАСЧЁТ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ КОТЕЛЬНОЙ

Отпуск пара технологическим потребителям часто производится от котельных, называемых производственными. Расчёт тепловой схемы производственной котельной с учётом технологии получения теплоносителя заданных параметров рекомендуется производить в следующей последовательности [1].

1. Определить расход воды на подогрев сетевой воды, т/ч:

$$G = \frac{860Q}{t_1 - t_2}.$$

Здесь:  $Q$  – расчётная тепловая нагрузка потребителей системы теплоснабжения, МВт;  $t_1$  и  $t_2$  – температура воды перед сетевыми подогревателями и после них, °С.

2. Определить расход пара на подогреватели сетевой воды

$$D_{п.с.в} = \frac{4,2G(t_1 - t_2)}{(h''_{рОУ} - h_k)\eta}.$$

Здесь:  $h''_{рОУ}$  – энтальпия редуцированного пара перед подогревателями сетевой воды, кДж/кг;  $h_k$  – энтальпия конденсата после подогревателя сетевой воды, кДж/кг;  $\eta$  – КПД сетевого подогревателя ( $\eta = 0,98$ ).

3. Определить расход редуцированного пара внешними потребителями, т/ч:

$$D''_{рОУ} = D_T + D_{п.с.в},$$

где  $D_T$  – расход редуцированного пара внешними технологическими потребителями, т/ч.

4. Определить суммарный расход свежего пара внешними потребителями, т/ч:

$$D_{\text{вн}} = D'_{\text{РОУ}} + D'_T$$

$$D'_{\text{РОУ}} = D''_{\text{РОУ}} \frac{h'_{\text{РОУ}} - h_{\text{п.в}}}{h''_{\text{РОУ}} - h_{\text{п.в}}}$$

Здесь:  $D'_T$  – расход свежего пара, т/ч;  $h'_{\text{РОУ}}$  – энтальпия свежего пара кДж/кг;  $h_{\text{п.в}}$  – энтальпия питательной воды, кДж/кг;  $D'_{\text{РОУ}}$  – расход пара перед РОУ, т/ч.

5. Определить количество воды, впрыскиваемой в редуционно-охладительную установку, т/ч:

$$G_{\text{РОУ}} = D''_{\text{РОУ}} \frac{h'_{\text{РОУ}} - h''_{\text{РОУ}}}{h'_{\text{РОУ}} - h_{\text{п.в}}}$$

6. Расход пара на собственные нужды котельной, т/ч:

$$D'_{\text{с.н}} = 0,01K_{\text{с.н}}D_{\text{вн}},$$

где  $K_{\text{с.н}}$  – расход пара на собственные нужды котельной в процентах расхода пара внешними потребителями (рекомендуется принимать 5...10%).

7. Расход пара на мазутное хозяйство, т/ч:

$$D_{\text{м}} = 0,01K_{\text{м}}D_{\text{вн}},$$

где  $K_{\text{м}}$  – процент расхода пара внешними потребителями (рекомендуется принимать при отсутствии данных 3%).

8. Расход пара на покрытие потерь в котельной, т/ч:

$$D_{\text{п}} = 0,01K_{\text{п}}(D_{\text{вн}} - D'_{\text{с.н}} + D_{\text{м}}),$$

где  $K_{\text{п}}$  – процент расхода пара внешними потребителями (рекомендуется принимать при отсутствии конкретных данных 2...3%).

9. Суммарный расход пара на собственные нужды, мазутное хозяйство и покрытие потерь котельной, т/ч:

$$D_{\text{с.н}} = D'_{\text{с.н}} + D_{\text{м}} + D_{\text{п}}$$

10. Суммарная производительность котельной, т/ч:

$$D = D_{\text{с.н}} + D_{\text{вн}}$$



11. Потери конденсата в оборудовании внешних потребителей и внутри котельной, т/ч:

$$G_K^{\text{пот}} = (1-\beta)(D_T + D'_T) + 0,01K_K D.$$

Здесь:  $\beta$  – доля конденсата, возвращаемого внешними потребителями;  $K_K$  – потери конденсата в цикле котельной установки (рекомендуется принимать их равными 3%).

12. Определить расход химически очищенной воды, т/ч:

$$F_{\text{х.о.в}} = G_K^{\text{пот}} + 0,01K_{\text{т.с}} G,$$

где  $K_{\text{т.с}}$  – потери воды в тепловой сети (рекомендуется принимать их равными 2...3%).

13. Определить расход сырой воды, т/ч:

$$G_{\text{х.в}} = K_{\text{х.о.в}} G_{\text{х.о.в}},$$

где  $K_{\text{х.о.в}}$  – коэффициент, учитывающий расход сырой воды на собственные нужды химводоочистки (рекомендуется принимать его равным 1,25).

14. Определить количество воды, поступающей с непрерывной продувкой в расширитель, т/ч:

$$G_{\text{пр}} = 0,01p_{\text{пр}} D,$$

где  $p_{\text{пр}}$  – процент продувки (принимается 2...5%).

15. Количество пара, получаемого в расширителе непрерывной продувки, т/ч:

$$D_{\text{расш}} = \frac{G_{\text{пр}}(h_{\text{к.в}} - h'_{\text{расш}})}{x(h''_{\text{расш}} - h'_{\text{расш}})}.$$

Здесь:  $h_{\text{к.в}}$  – энтальпия котловой воды, кДж/кг;  $h''_{\text{расш}}$  – энтальпия пара, получаемого в расширителе непрерывной продувки, кДж/кг;  $h'_{\text{расш}}$  – энтальпия воды, получаемой в расширителе непрерывной продувки, кДж/кг;  $x$  – степень сухости пара (принимается равной 0,98).

16. Количество воды на выходе из расширителя непрерывной продувки, т/ч:

$$G_{\text{расш}} = G_{\text{пр}} - D_{\text{расш}}.$$

17. Определить температуру сырой воды после охладителя непрерывной продувки, °C:

$$t'_{c.в} = \frac{G_{расш}(h'_{расш}\eta - h''_{пр})}{4,2G_{c.в}} + t_{c.в},$$

где  $h''_{пр}$  – энтальпия воды после охладителя непрерывной продувки, принимается равной 210 кДж/кг.

18. Расход пара на подогреватель сырой воды, т/ч:

$$D_{c.в} = G_{c.в} \frac{h'_{x.o.в} - h'_{c.в}}{h''_{POY} - h_k^{POY}}.$$

Здесь:  $h'_{x.o.в}$  – энтальпия сырой воды после подогревателя, определяется для температуры воды, принимаемой 20...30 °C, кДж/кг;  $h'_{c.в}$  – энтальпия сырой воды после охладителя непрерывной продувки, определяется по температуре  $t'_{c.в}$ , кДж/кг;  $h''_{POY}$  – энтальпия редукционного пара, кДж/кг;  $h_k^{POY}$  – энтальпия конденсата редуцированного пара, определяется по температуре конденсата, принимаемой равной 70...85 °C.

19. Определить температуру химически очищенной воды после охладителя деаэрированной воды, °C:

$$t''_{x.o.в} = t'_{x.o.в} + \frac{0,01K_{т.с}G(t_{п.в} - t_2)\eta}{G_{x.o.в}}.$$

Здесь:  $t'_{x.o.в}$  – температура химически очищенной воды на входе в охладитель деаэрированной воды, °C;  $t_{п.в}$  – температура питательной (деаэрированной) воды на входе в охладитель, °C;  $t_2$  – температура деаэрированной воды после охладителя, принимаемой равной 70 °C;  $0,01K_{т.с}G$  – расход подпиточной воды для покрытия утечек в системе теплоснабжения, т/ч.

20. Определить расход пара на подогрев химически очищенной воды в подогревателе перед деаэратором, т/ч:

$$D_{x.o.в} = G_{x.o.в} \frac{h_k - h''_{x.o.в}}{h''_{POY} - h_k^{POY}}.$$

Здесь:  $h_k$  – энтальпия химически очищенной воды после подогревателя, определяется по температуре, равной температуре конденсата,

кДж/кг;  $h''_{x.o.b}$  – энтальпия химически очищенной воды перед подогревателем, определяется по температуре химически очищенной воды после охладителя деаэрированной воды, кДж/кг.

21. Суммарное количество воды и пара, поступающее в деаэратор, за вычетом греющего пара деаэратора, т/ч:

$$G_d = G_{x.o.b} + \beta(D_T + D'_T) + D_{x.o.b} + D_{c.b} + D_{п.с.в} + D_{расш}.$$

22. Определить среднюю температуру воды в деаэраторе, °С:

$$t'_d = \frac{G_{x.o.b} h_k + \beta(D_T + D'_T) h_k + D_{x.o.b} h_k^{POY}}{G_d} + \frac{D_{c.b} h_k^{POY} + D_{п.с.в} h_k + D_{расш} h''_{расш}}{G_d}.$$

23. Определить расход греющего пара на деаэратор, т/ч:

$$D_d = G_d \frac{h_{п.в} - 4,2t'_d}{(h''_{POY} - h_{п.в})\eta}.$$

24. Определить расход редуцированного пара на собственные нужды котельной, т/ч:

$$D_{c.н}^{POY} = D_d + D_{x.o.b} + D_{c.в}.$$

25. Определить расход свежего пара на собственные нужды котельной, т/ч:

$$D_{c.н}^c = D_{c.н}^{POY} \frac{h''_{POY} - h_{п.в}}{h_{POY} - h_{п.в}}.$$

26. Действительная паропроизводительность котельной с учётом расхода пара на собственные нужды, т/ч:

$$D_k = (D_{вн} + D_{c.н}^c) + 0,01K_{п}(D_{вн} + D_{c.н}^c).$$

27. Невязка с предварительно принятым значением паропроизводительности котельной, %:

$$\Delta D = \frac{D_k - D}{D_k} \cdot 100.$$

Если невязка получится меньше 3%, то расчёт тепловой схемы считается законченным. При большей невязке расчёт следует повторить, изменив расход пара на собственные нужды.

Уточнённый расход редуцированного пара, т/ч:

$$D''_{y. POY} = D_T + D_{п.с.в} + D_{с.н}^{POY}.$$

Расход свежего пара на РОУ

$$D'_{y. POY} = D''_{y. POY} \frac{h''_{POY} - h_{п.в}}{h'_{POY} - h_{п.в}}.$$

Суммарная паропроизводительность котельной с учётом уточнения расхода на собственные нужды (т/ч)

$$D_K^y = D'_T + D'_{y. POY} + 0,01K_{п}(D_T + D'_T).$$

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРОЕКТА

Графическая часть курсового проекта состоит из трёх листов формата А1 (594×841), на которых вычерчивают:

- котлоагрегат в двух (или трех) проекциях, характеризующих конструкцию котла [1, 2, 7, 11];
- принципиальную тепловую схему котельной, показывающую технологию получения теплоносителя заданных параметров [1];
- схему газового тракта котла [2];
- горелочное устройство;
- схему подготовки топлива к сжиганию (определяется типом применяемого топлива).

Чертежи выполняются согласно ЕСКД.

Спецификации вшиваются в пояснительную записку (в приложения).

Исходными геометрическими параметрами для выполнения чертежей являются величины, полученные при выполнении теплового, аэродинамического и гидравлического расчётов.

В качестве пособий, облегчающих выполнение курсового проекта, используются иллюстрации в литературных источниках [1 – 12].

Чертежи должны содержать габаритные, присоединительные и сборочные размеры. На отдельных поверхностях нагрева обозначают габариты, шаги труб, число и диаметр труб и т.п.

На чертежах проекций должны быть изображены лазы, предохранительные клапаны и другая арматура, входные и выходные коллекторы пучков, сепарационные и продувочные устройства.

Студент должен детально разобраться в конструкциях узлов и дать в пояснительной записке объяснения по их исполнению, условиям работы, сборке и разборке, а также назначению и месту в конструкции котлоагрегата. Кроме того, необходимо проанализировать условия эксплуатации отдельных узлов и причины выхода их из строя.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эстеркин, Р.И. Котельные установки. Курсовое и дипломное проектирование / Р.И. Эстеркин. – СПб. : Интеграл, 2011. – 280 с.

2. Фокин, В.М. Теплогенераторы котельных / В.М. Фокин – М. : Машиностроение-1, 2005 – 106 с.

3. Тепловой расчёт котлов (нормативный метод). – 2-е изд. – СПб. : Изд-во НПО ЦКТИ, 1998.

4. Сидельковский, Л.Н. Котельные установки промышленных предприятий / Л.Н. Сидельковский, В.Н. Юренев. – М. : ООО «БАС-ТЕТ», 2009. – 528 с.

5. Котельные установки и парогенераторы / Е.А. Бойко, И.С. Деринг, С.А. Михайленко. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 606 с.

6. Ляшков, В.И. Теоретические основы теплотехники / В.И. Ляшков. – М. : Высш. шк., 2008. – 318 с.

7. Тепловые и атомные электростанции : справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М. : Издательство МЭИ, 2003. – 645 с.

8. Аэродинамический расчёт котельных установок (нормативный метод) / под ред. С.И. Мочана. – 3-е изд. – Л. : Энергия, 1977.

9. Гидравлический расчёт котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. В.А. Локшина, Д.Ф. Петерсона, А.Л. Шварца. – М. : Энергия, 1978.

10. Лебедев, И.К. Гидродинамика паровых котлов / И.К. Лебедев. – М. : Энергия, 1978. – 240 с.

11. Роддатис, К.Ф. Справочник по котельным установкам малой производительности / К.Ф. Роддатис, А.Н. Полтарецкий. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.

12. Рабинович, О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1969. – 376 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### П1. Характеристики твёрдого топлива по рабочей массе

№ п/п	Месторождение и марка топлива	Состав рабочей массы, %							
		W <sup>p</sup>	A <sup>p</sup>	S <sub>к</sub> <sup>p</sup>	S <sub>о</sub> <sup>p</sup>	C <sup>p</sup>	H <sup>p</sup>	N <sup>p</sup>	O <sup>p</sup>
1	Подмосковный, Б2	32,0	25,2	1,5	1,2	28,7	2,2	0,6	8,6
2	Донецкий, Д	13	15,7	1,5	1,5	53,9	3,9	1,1	9,4
3	Донецкий, Г	7	18,1	2	1,3	60,7	4	1,1	5,8
4	Воркутинское, Ж	5	18,1	0,8		64,8	4,1	1,4	5,8
5	Кизеловское, Г	5	26,6	2,6	2,1	52,6	3,9	0,9	6,3
6	Челябинское, Б3	17	28,2	1,5		39,2	2,8	0,9	10,4
7	Кузнецкий, Д	10,5	8,5	0,3		63,7	4,5	1,8	10,7
8	Кузнецкий, Т	6,5	16,8	0,5		68,4	3,3	1,5	3
9	Ирша-Бородинский, Б2	3	6	0,2		43,7	3	0,6	13,5
10	Азейское, Б3	22,5	10,1	0,4		49,9	3,6	0,9	12,6
11	Ургальское, Г	6,5	29,9	0,4		50,9	3,8	0,6	7,9
12	Сучанское, Г	5,5	28,8	0,4		54,2	3,5	0,8	6,8
13	Липовецкое, Д	6,5	26,6	0,4		51,6	4	0,5	10,4
14	Березовское месторождение, Б2	33,0	4,7	0,2		44,3	3,0	0,4	14,4
15	Норильское месторождение, СС	4,0	26,8	0,5		59,2	3,3	1,2	4,9
16	Артемовский, Б3	24,5	24,3	0,5		35,7	2,9	0,7	12,1
17	Интинское, Д	11,5	25,4	2,0	0,6	47,7	3,2	1,3	8,8
18	Сланцы	13	40	1,3	0,3	24,4	3,1	0,1	3,7
19	Торф	48	7	0,1		25,7	2,7	1,1	15,4
20	Древесина	30	0,7	-		35,4	4,2	0,4	29,3
21	Пеллеты из соломы	2,5	5,0	0,08		46,0	5,9	0,5	40,0

## П2. Характеристики жидкого топлива

Наименование топлива	Состав топлива, %					
	C <sup>c</sup>	H <sup>c</sup>	N <sup>c</sup> + O <sup>c</sup>	S <sub>об</sub> <sup>c</sup>	A	W
Мазут малосернистый 40	85,00	10,9	0,55	0,5	0,12	1,5
Мазут малосернистый 100	84,75	10,8	0,90	0,5	0,14	1,5
Мазут сернистый 40	83,80	11,2	0,80	2,0	0,12	1,5
Мазут сернистый 100	83,80	11,2	1,00	2,0	0,14	1,5
Мазут высокосернистый 40	84,10	10,7	0,75	3,5	0,12	1,5
Мазут высокосернистый 100	83,10	10,3	0,45	3,5	0,14	1,5
Соляровое масло	86,30	13,3	0,10	0,3	0,02	0
Дизельное топливо	86,30	13,3	0,10	0,3	0,0025	0,09
Моторное топливо	86,5	12,6	0,5	0,4	0,05	0

## П3. Характеристики газообразного топлива

Газопровод	Состав газа по объёму, %							
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Саратов–Москва	78,2	4,4	2,2	0,41	0,09	0,12	14	0,10
Бухара–Урал	94,3	2,4	0,3	0,3	0,2	2,6		
Брянск–Москва	92,8	3,9	1,1	0,4	0,1	–	0,6	0,10
Ставрополь–Грозный	98,2	0,35	1,15	0,06	0,01	0,02	1,0	0,20
Первомайск–Сторожевка	62,4	3,6	2,6	0,9	0,2	–	30,2	0,1
Ярино–Пермь	38,0	25,1	12,5	3,3	1,3	2,1	18,7	–
Биогаз	63,0	–	–	–	–	1,0	–	33,0

#### П4. Расчётный коэффициент избытка воздуха на выходе из топки

Топка	Топливо	Коэффициент $\alpha_t$
Камерная топка с твёрдым шлакоудалением	Антрацит, полуантрацит, тощий уголь	1,2...1,25*
	Остальное твёрдое топливо	1,15...1,2
Камерная топка с жидким шлакоудалением	Антрацит, полуантрацит, тощий уголь	1,2...1,25
	Остальное твёрдое топливо	1,15...1,2
Камерная	Природный газ	1,05...1,1**
	Мазут	1,02...1,05***

Пр и м е ч а н и я.

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

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

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

#### П5. Величина присоса воздуха

Элементы газового тракта котла		Величины присоса $\Delta\alpha$
Топочные камеры пылеугольных и газомазутных котлов	Газоплотные	0,02
	С металлической обшивкой труб экрана	0,05
	С обмуровкой и металлической обшивкой	0,07
	С обмуровкой и без обшивки	0,10
Топочные камеры слоевых топок	Механические и полумеханические	0,10
	Ручные	0,30
Газоходы конвективных поверхностей нагрева	Газоплотный газоход от топки до воздухоподогревателя (величина присоса распределяется равномерно по расположенным в газоходе поверхностям нагрева)	0,02

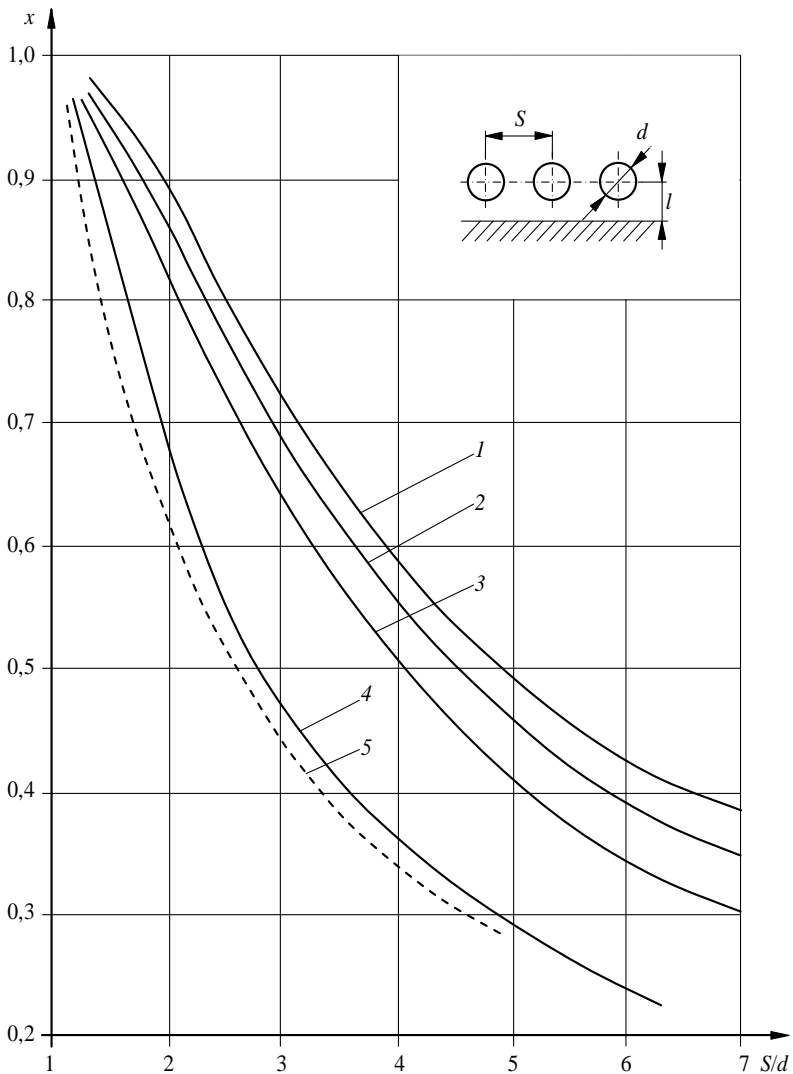


Элементы газового тракта котла		Величины присоса Δα
Газоходы конвективных поверхностей нагрева	Негазоплотные газоходы:	
	Фестон, ширмовый перегреватель	0
	Первый котельный пучок котлов производительностью ≤ 50 кг/с	0,05
	Второй котельный пучок котлов производительностью ≤ 50 кг/с	0,10
	Первичный перегреватель	0,03
	Промежуточный перегреватель	0,03
	Переходная зона прямоточного котла	0,03
	Экономайзер котлов производительностью > 50 кг/с (каждая ступень)	0,02
	Экономайзер котлов производительностью ≤ 50 кг/с:	
	стальной	0,08
	чугунный с обшивкой	0,10
	чугунный без обшивки	0,20
	Трубчатые воздухоподогреватели:	
	котлов производительностью > 50 кг/с (каждая ступень)	0,03
	котлов производительностью ≤ 50 кг/с (каждая ступень)	0,06
	Регенеративные воздухоподогреватели (вместе «горячая» и «холодная» набивки)	
	котлов производительностью > 50 кг/с (каждая ступень)	0,15
	котлов производительностью ≤ 50 кг/с (каждая ступень)	0,20
	Пластинчатые воздухоподогреватели (каждая ступень)	0,10
Золоуловители	Электрофильтры:	
	котлов производительностью > 50 кг/с (каждая ступень)	0,10
	котлов производительностью ≤ 50 кг/с (каждая ступень)	0,15
	Циклонные и батарейные	0,05
	Скрубберы	0,05
Газоходы за котлом	Стальные (каждые 10 п. м)	0,01
	Кирпичные борова (каждые 10 п. м)	0,05

**Пб. Энтальпия 1 м<sup>3</sup> газов, воздуха , 1 кг золы**

θ, °С	(сθ) <sub>CO<sub>2</sub></sub>	(сθ) <sub>N<sub>2</sub></sub>	(сθ) <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	(сθ) <sub>в</sub>	(сθ) <sub>зл</sub> , кДж/кг
	кДж/м <sup>3</sup>				
100	171,7	130,1	150,5	132,7	80,8
200	360,0	261,0	304,0	267,0	169,1
300	563	394	463	403	264
400	776	529	626	542	360
500	999	667	795	685	458
600	1231	808	969	830	560
700	1469	952	1149	979	662
800	1712	1098	1334	1129	767
900	1961	1247	1526	1283	875
1000	2213	1398	1723	1438	984
1100	2458	1551	1925	1595	1097
1200	2717	1705	2132	1754	1206
1300	2977	1853	2344	1914	1361
1400	3239	2009	2559	2076	1583
1500	3503	2166	2779	2239	1759
1600	3769	2324	3002	2403	1876
1700	4036	2484	3229	2567	2064
1800	4305	2644	3458	2732	2186
1900	4574	2804	3690	2899	2387
2000	4844	2965	3926	3066	2512
2100	5115	3127	4163	3234	
2200	5386	3289	4402	3402	
2300	5658	3452	4643	3571	
2400	5930	3615	4888	3740	
2500	6203	3778	5132	3910	

## П7. Угловой коэффициент однорядного гладкотрубного экрана

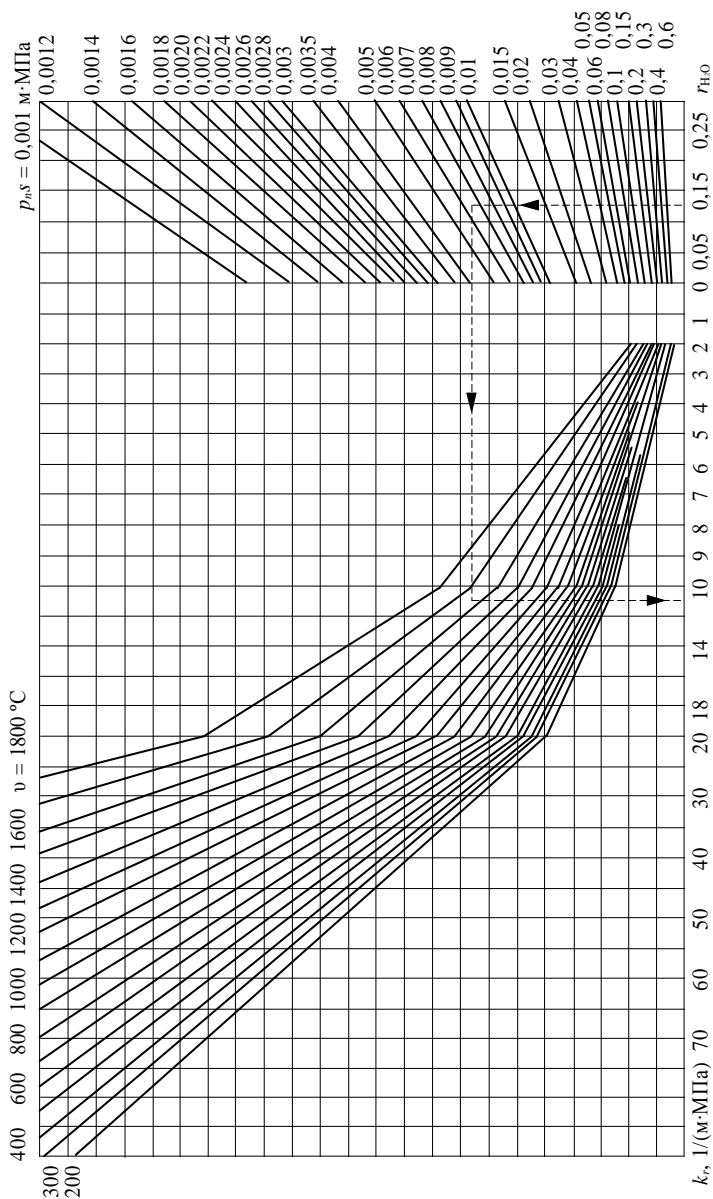


1 – при расстоянии от стенки  $l > 1,4d$ ; 2 – при  $l = 0,8d$ ; 3 – при  $l = 0,5d$ ;  
 4 – при  $l = 0$ ; 5 – без учёта излучения обмуровки при  $l > 0,5d$

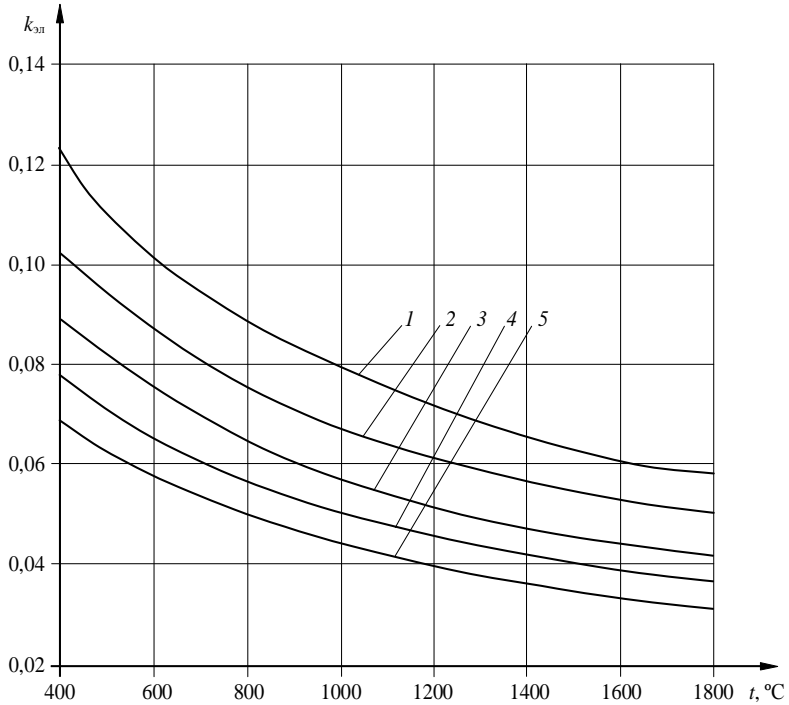
### П8. Коэффициент загрязнения топочных экранов

Экраны	Топливо	Значение $\xi$
Открытые гладкотрубные и плавниковые настенные	Газообразное	0,65
	Мазут	0,55
	АШ и ПА при $\Gamma_{\text{ун}} \geq 12\%$ , тощий уголь при $\Gamma_{\text{ун}} \geq 8\%$ , каменные и бурые угли, фрезерный торф	0,45
	Экибастузский при $R_{\text{эф}} \leq 15\%$	0,35...0,40
	Бурые угли с $W \geq 3,5\%$ при газовой сушке и прямом вдувании	0,55
	Сланцы северо-западных месторождений	0,25
	Все виды топлива при слоевом сжигании	0,60
Ошипованные, покрытые огнеупорной массой в топках с твёрдым шлакоудалением	Любое	0,20
Закрытые огнеупорным кирпичом		0,10

### П9. Номограмма для определения коэффициента ослабления лучей трёхатомными газами

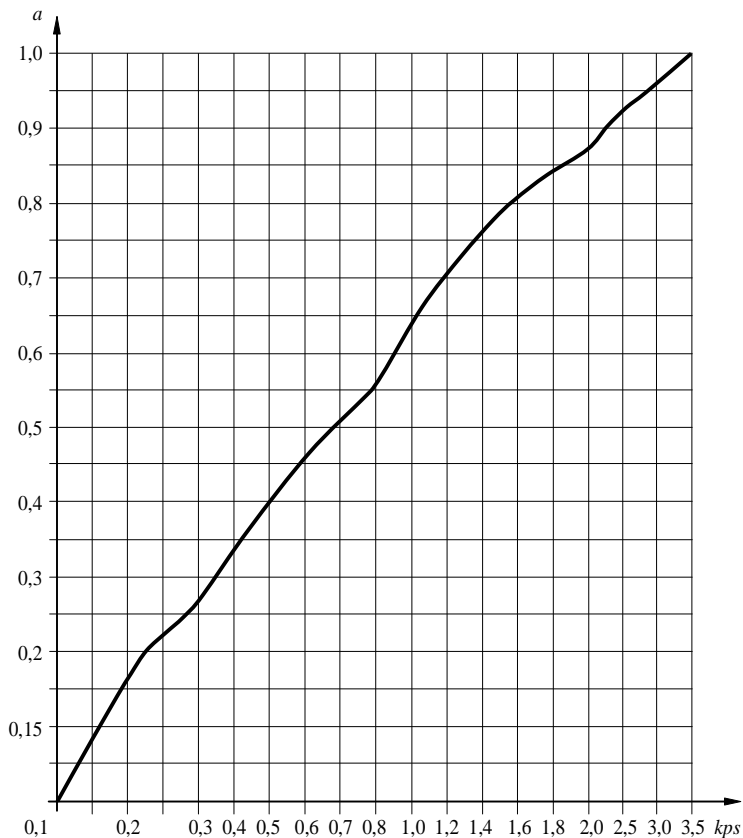


## П10. Коэффициент ослабления лучей золовыми частицами



1 – при сжигании пыли в циклонных топках; 2 – при сжигании углей, размолотых в шаровых барабанных мельницах; 3 – при сжигании углей, размолотых в среднеходных и молотковых мельницах и в мельницах-вентиляторах; 4 – при сжигании дроблёнки в циклонных топках и топлива в слоевых топках; 5 – при сжигании торфа в камерных топках

**П11. Степень черноты продуктов сгорания  $a$  в зависимости от суммарной оптической толщины среды  $kps$**

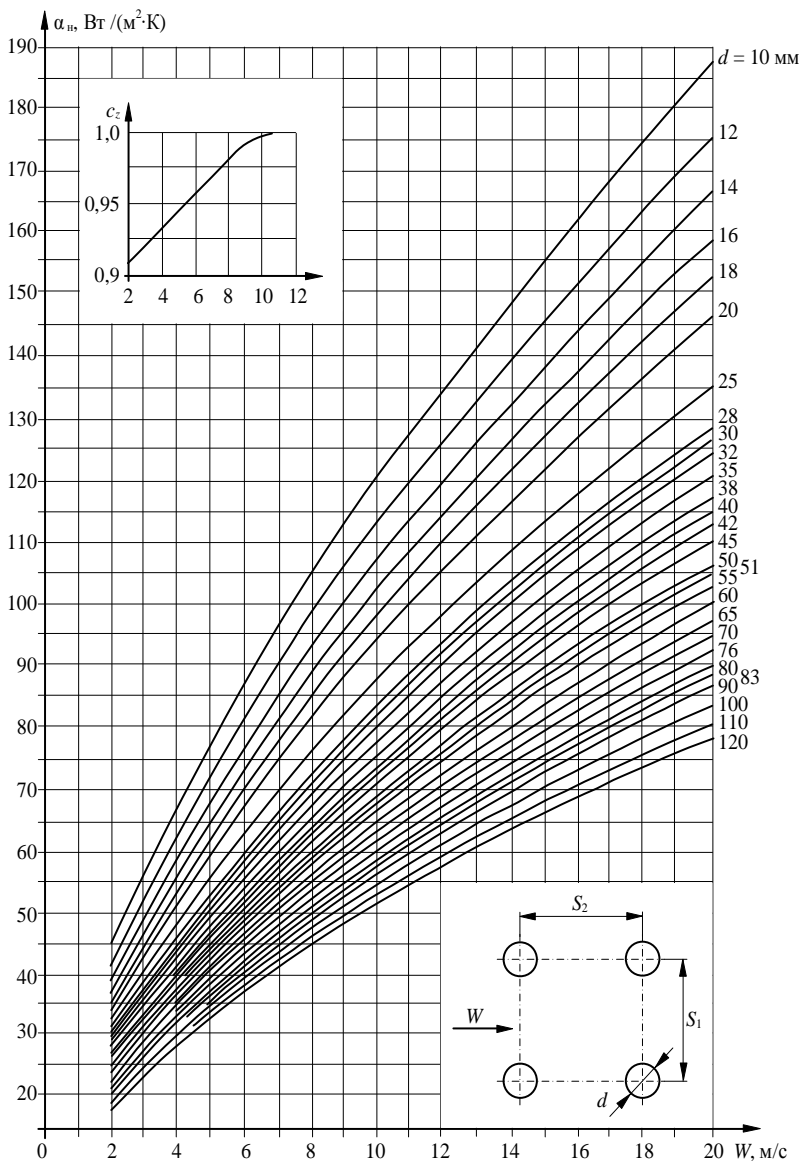


**П12. Доля топочного объема, заполненная светящейся частью факела**

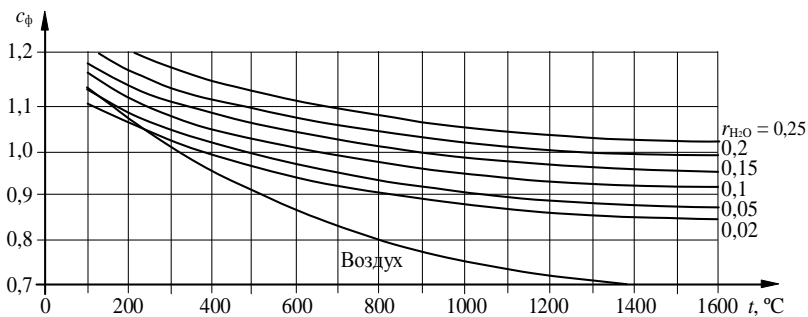
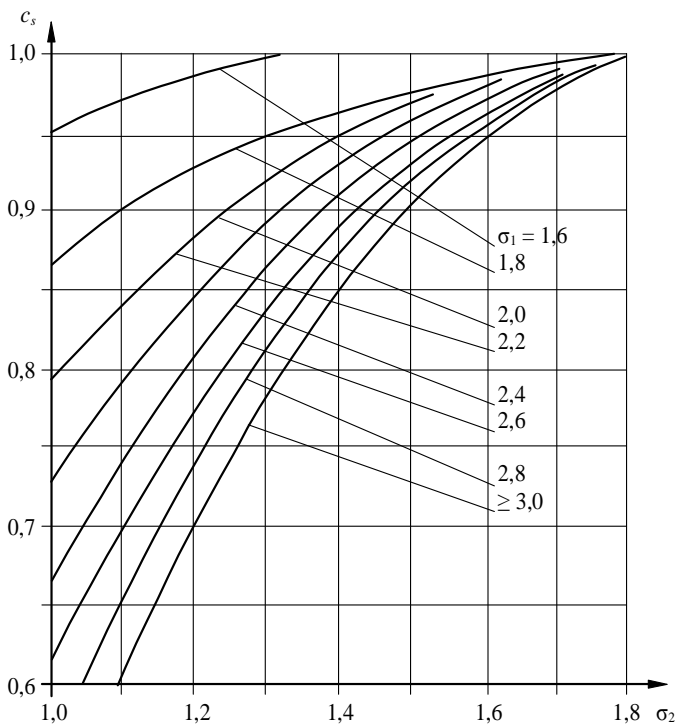
Вид сжигаемого топлива и удельная нагрузка топочного объема	Коэффициент $m$
Газ при сжигании светящимся факелом с $q_v \leq 400$ кВт/м <sup>2</sup>	0,1
То же при $q_v \geq 1000$ кВт/м <sup>2</sup>	0,6
Мазут при $q_v \leq 400$ кВт/м <sup>2</sup>	0,55
То же при $q_v \geq 1000$ кВт/м <sup>2</sup>	1,0

Примечание. При удельных нагрузках топочного объема больше 400 и меньше 1000 кВт/м<sup>2</sup> коэффициент  $m$  определяется линейной интерполяцией.

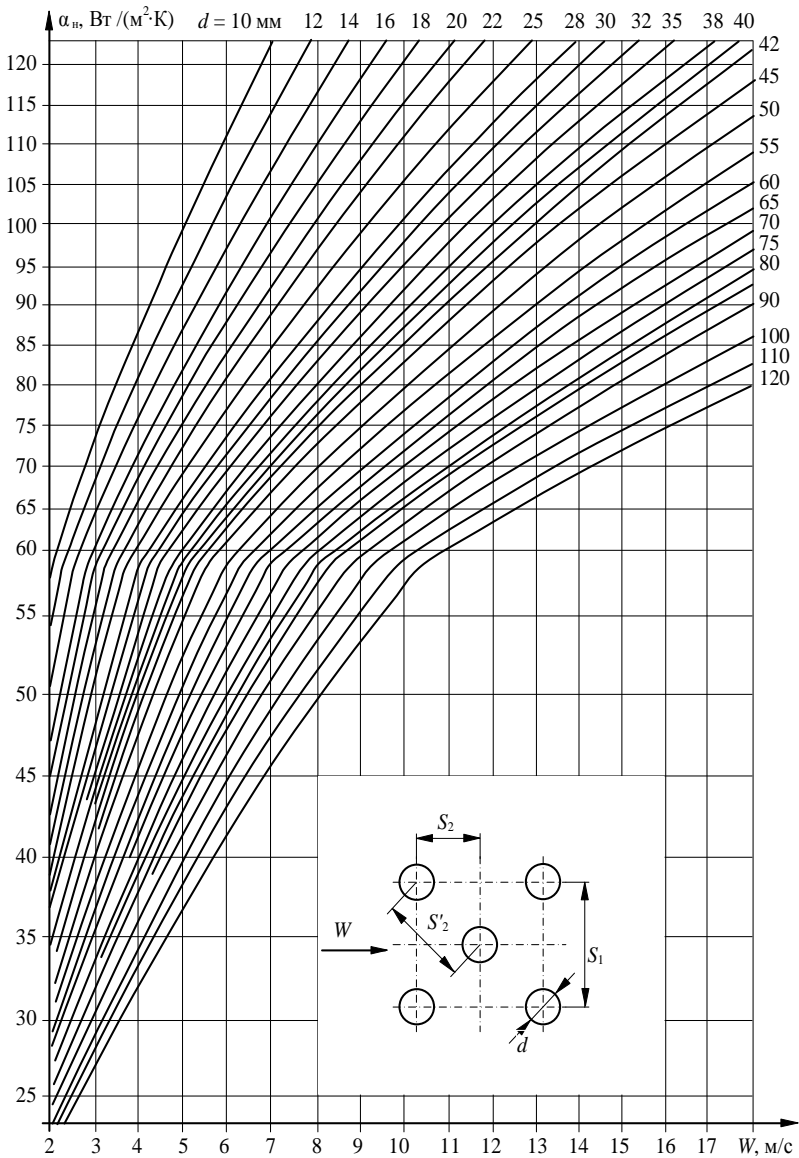
**П13. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией при поперечном омывании коридорных гладкотрубных пучков**

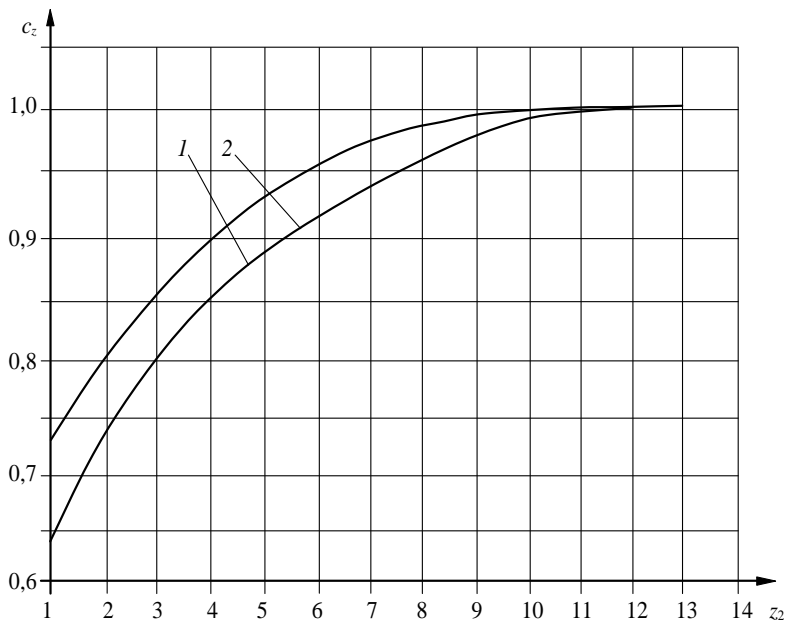




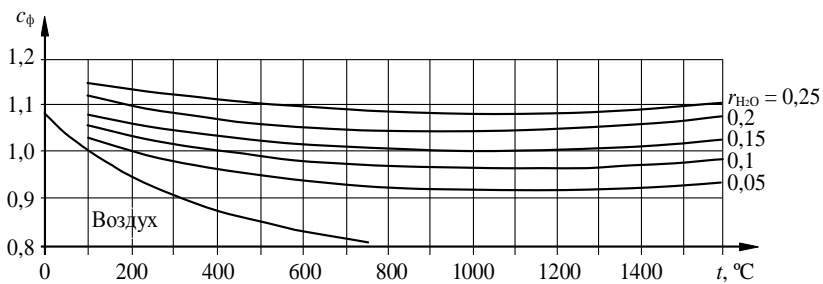


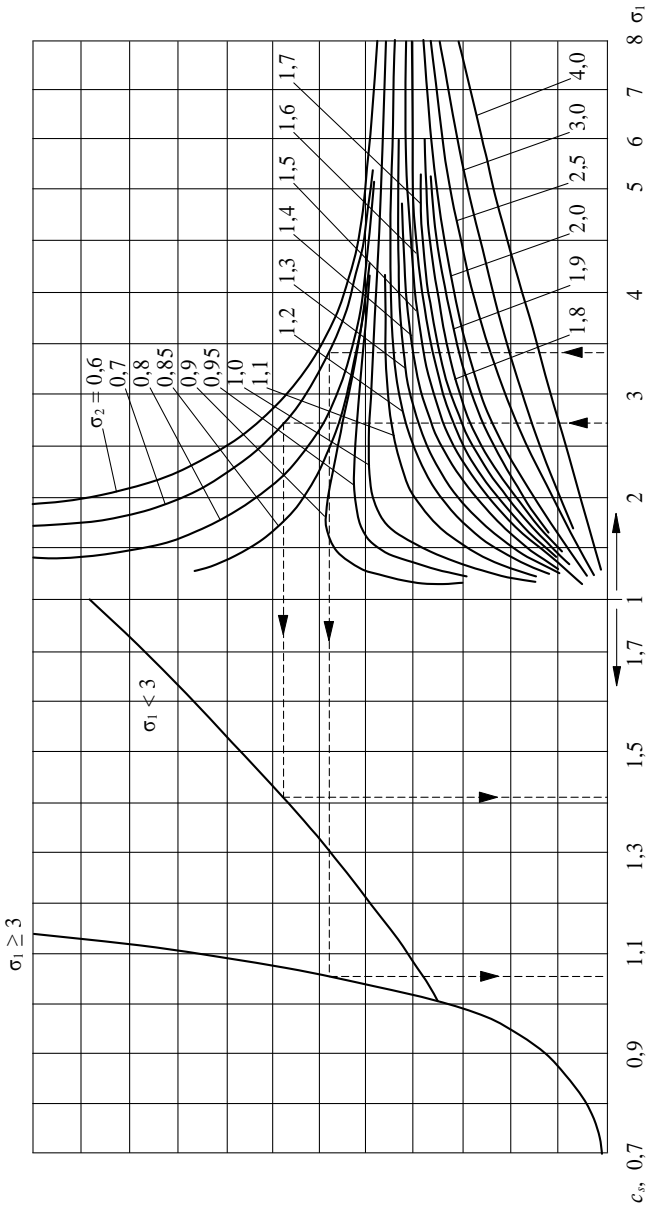
**П14. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией при поперечном омывании шахматных гладкотрубных пучков**



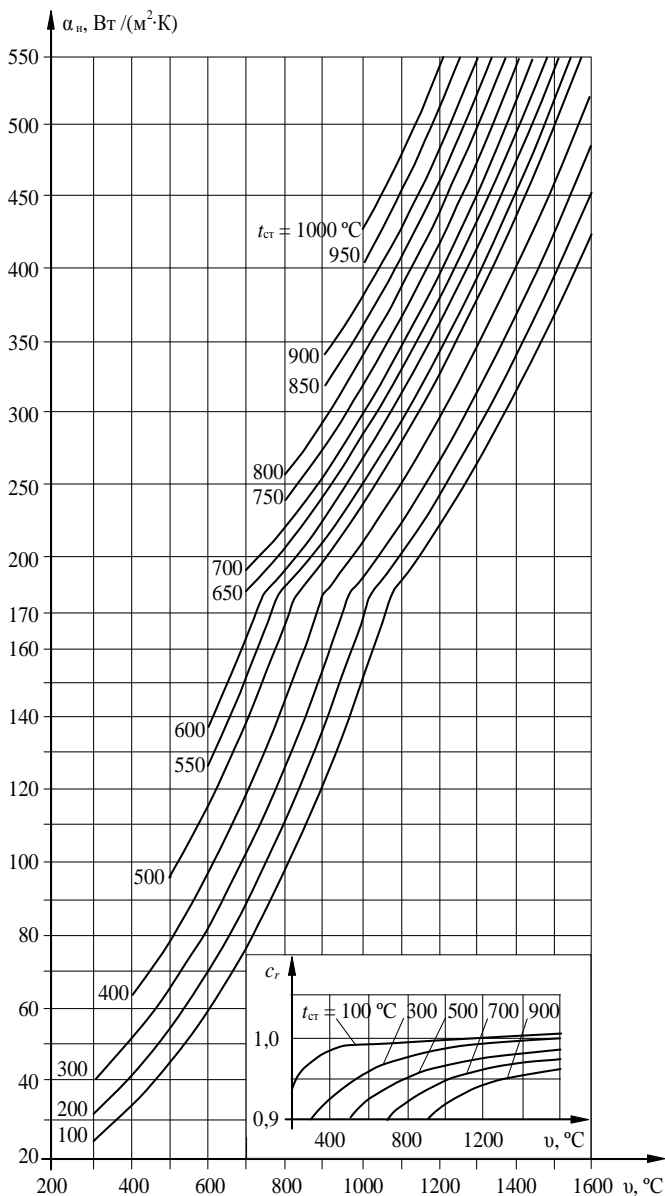


1 – при  $\sigma_1 \geq 3$ ; 2 – при  $\sigma_1 < 3$





### П15. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи излучением



**П16. Коэффициент тепловой эффективности  $\psi$  для конвективных поверхностей нагрева\* при сжигании различных твёрдых топлив**

Топливо	Значение $\psi$
АШ и тощие угли	0,6
Каменные, бурые угли (кроме подмосковных и канско-ачинских), промпродукты каменных углей	0,65
Подмосковный уголь	0,7
Бурые угли Канско-Ачинского месторождения, фрезерный торф и древесное топливо	0,6
Сланцы (северо-западные, кашпирские)	0,5

Примечание. Для всех топлив, кроме подмосковного угля, требуется очистка конвективных поверхностей нагрева.

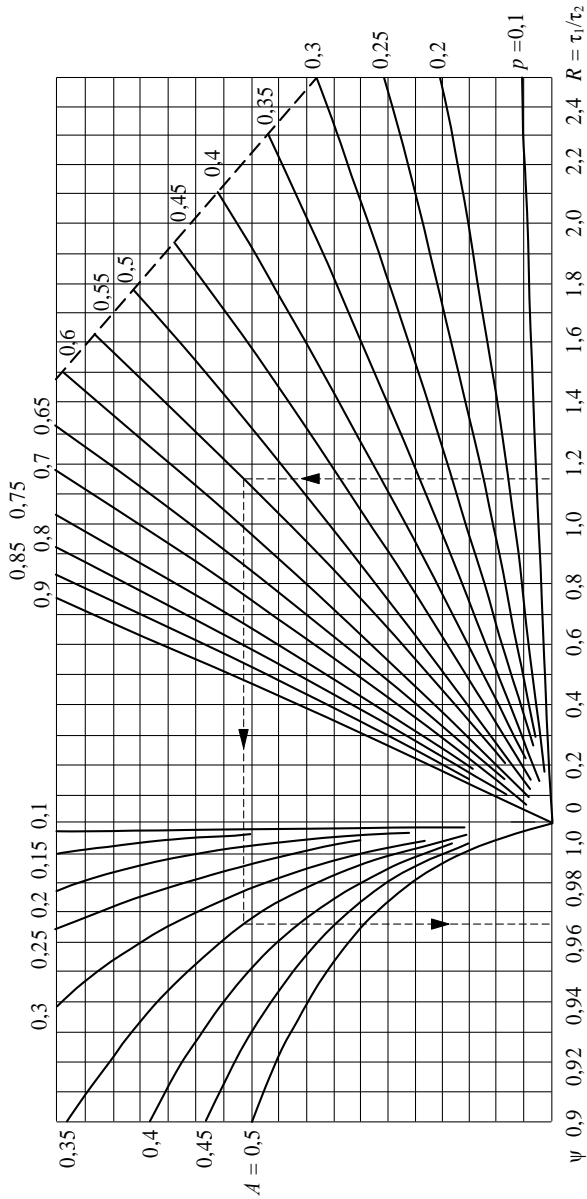
\* Фестоны паровых котлов большой мощности, развитые котельные пучки котлов малой мощности, конвективные пароперегреватели и экономайзеры с коридорным расположением труб.

**П17. Коэффициент тепловой эффективности  $\psi$  для конвективных поверхностей нагрева при сжигании мазута и газа**

Поверхность нагрева	Скорость продуктов сгорания, м/с	Значение $\psi$
При сжигании мазута		
Первые и вторые ступени экономайзеров с очисткой поверхности нагрева дробью	12...20	0,65...0,6
	4...12	0,7...0,65
Пароперегреватели, расположенные в конвективной шахте, при очистке дробью, а также коридорные пароперегреватели в горизонтальном газоходе, без очистки; котельные пучки котлов малой мощности, фестоны	12...20	0,6
	4...12	0,65...0,6
Экономайзеры котлов малой мощности (при температуре воды на входе 100 °С и ниже)	4...12	0,55...0,5
При сжигании газа		
Первые ступени экономайзеров и одноступенчатые экономайзеры, в том числе плавниковые и ребристые, при температуре продуктов сгорания на входе в них $\vartheta \leq 400$ °С	–	0,9
Вторые ступени экономайзеров, пароперегреватели и другие конвективные поверхности нагрева, в том числе плавниковые и ребристые, при температуре продуктов сгорания на входе в них $\vartheta > 400$ °С	–	0,85

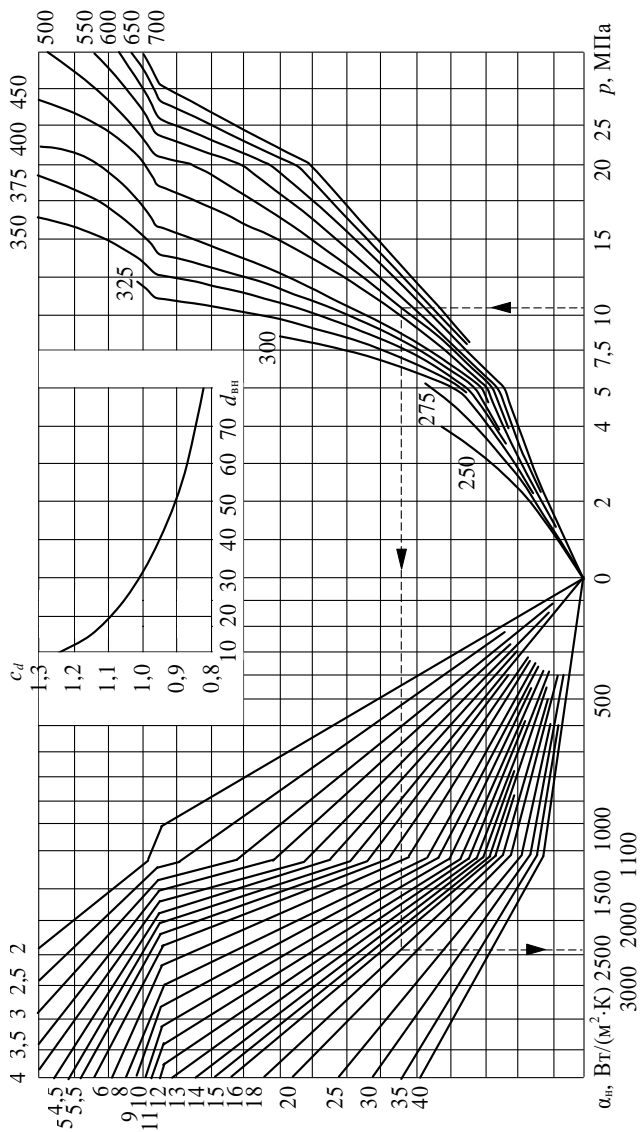
Примечания. 1. При сжигании газа после сжигания мазута коэффициент тепловой эффективности принимается средним между значениями для газа и мазута. 2. При сжигании газа после сжигания твёрдого топлива (без остановки котла) коэффициент тепловой эффективности принимается как для твёрдого топлива. 3. Большой коэффициент тепловой эффективности принимается для меньшей скорости.

**П18. Номограмма для определения температурного напора при последовательно-смешанном токе продуктов сгорания**





**П19. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией от продуктов сгорания к перегретому пару при продольном омывании змеевиков пароперегревателя**



## П20. Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
0	1,013	999,9	0,00	4,121	55,1	13,1	1788	1,789
10	1,013	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1306	1,306
20	1,013	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006
30	1,013	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805
40	1,013	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659
50	1,013	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556
60	1,013	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478
70	1,013	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415
80	1,013	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365
90	1,013	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326
100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217
150	4,76	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203
160	6,18	907,4	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191
170	7,92	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181
180	10,03	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173
190	12,55	876,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165
200	15,55	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158
210	19,08	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153
220	23,20	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148
230	27,98	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145
240	33,48	813,6	1037,5	4,766	62,8	16,2	114,8	0,141
250	39,78	799,0	1085,7	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137
260	46,94	784,0	1135,1	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135
270	55,05	767,9	1185,3	5,070	59,0	15,1	102,0	0,133
280	64,19	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	98,1	0,131
290	74,45	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129
300	85,92	712,5	1344,9	5,736	54,0	13,2	91,2	0,128
310	98,70	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128
320	112,90	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128
330	128,65	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127
340	146,08	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127
350	165,37	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,88	72,6	0,126
360	186,74	528,0	1761,5	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126
370	210,53	450,5	1892,5	40,321	33,7	1,86	56,9	0,126

## П21. Физические свойства водяного пара на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho'', \text{кг/м}^3$	$h'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$C_p^{\text{пр}}, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,372	18,58	20,02
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	15,07
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	11,46
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,672	8,85
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	6,89
150	4,76	2,547	2746,7	2114,4	2,395	2,884	4,728	5,47
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	4,39
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,583	3,128	2,939	3,57
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	2,93
190	12,55	6,394	2786,4	1978,8	2,856	3,419	1,872	2,44
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,023	3,547	1,492	2,03
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	1,71
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,983	1,45
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	1,24
240	33,48	16,76	2803,2	1765,6	3,881	4,291	0,658	1,06
250	39,78	19,98	2801,1	1715,8	4,158	4,512	0,544	0,913
260	46,94	23,72	2796,5	1661,4	4,468	4,803	0,453	0,794
270	55,05	28,09	2789,8	1604,4	4,815	5,106	0,378	0,688
280	64,19	33,19	2779,7	1542,9	5,234	5,489	0,317	0,600
290	74,45	39,15	2766,4	1476,3	5,694	5,827	0,261	0,526
300	85,92	46,21	2749,2	1404,3	6,280	6,268	0,216	0,461
310	98,70	54,58	2727,4	1325,2	7,118	6,838	0,176	0,403
320	112,90	64,72	2700,2	1238,1	8,206	7,513	0,141	0,353
330	128,65	77,10	2665,9	1139,7	9,881	8,257	0,108	0,310
340	146,08	92,76	2621,9	1027,1	12,35	9,304	0,0811	0,272
350	165,37	113,6	2564,5	893,1	16,24	10,70	0,0580	0,234
360	186,74	144,0	2481,2	719,7	23,03	12,79	0,0386	0,202
370	210,53	203,0	2330,9	438,4	56,52	17,10	0,0150	0,166

**П22. Вода и перегретый водяной пар**

<i>p</i> , ат	<i>t</i> , °С	20	40	60	80	100	120	140
0,04	<i>v</i>	0,0010018	36,79	39,16	41,51	43,87	46,23	48,58
	<i>h</i>	20,0	614,9	623,9	633,0	642,1	651,1	660,2
	<i>s</i>	0,0708	2,0412	2,0684	2,0949	2,1199	2,1436	2,1661
0,08	<i>v</i>	0,0010018	0,0010079	19,56	20,74	21,92	23,10	24,28
	<i>h</i>	20,0	40,0	623,8	632,9	642,1	651,1	660,1
	<i>s</i>	0,0708	0,1365	1,9919	2,0183	2,0432	2,0669	2,0896
0,10	<i>v</i>	0,0010018	0,0010079	15,64	16,58	17,53	18,47	19,42
	<i>h</i>	20,0	40,0	623,7	632,8	642,0	651,0	660,1
	<i>s</i>	0,0708	0,1365	1,9672	1,9935	2,0186	2,0423	2,0649
0,12	<i>v</i>	0,0010018	0,0010079	13,02	13,81	14,6	15,39	16,18
	<i>h</i>	20,0	40,0	623,6	632,8	641,9	651,0	660,1
	<i>s</i>	0,0708	0,1365	1,9470	1,9733	1,9984	2,0221	2,0448
0,14	<i>v</i>	0,0010018	0,0010079	11,16	11,84	12,51	13,19	13,86
	<i>h</i>	20,0	40,0	623,5	632,7	641,9	650,9	660,0
	<i>s</i>	0,0708	0,1365	1,9300	1,9563	1,9813	2,0050	2,0277
0,16	<i>v</i>	0,0010018	0,0010079	9,759	10,358	10,950	11,540	12,130
	<i>h</i>	20,0	40,0	623,4	632,6	641,8	650,9	660,0
	<i>s</i>	0,0708	0,1365	1,9150	1,9415	1,9666	1,9903	2,0129
0,20	<i>v</i>	0,0010018	0,0010079	7,797	8,277	8,752	9,226	9,699
	<i>h</i>	20,0	40,0	623,2	632,5	641,7	650,8	659,9
	<i>s</i>	0,0708	0,1365	1,8903	1,9166	1,9417	1,9655	1,9882

Продолжение прил. П22

$p$ , ат	$t$ , °C	20	40	60	80	100	120	140
0,30	$v$	0,0010018	0,0010079	0,001071	5,507	5,826	6,143	6,459
	$h$	20,0	40,0	60,0	632,1	641,4	650,6	659,8
	$s$	0,0708	0,1365	0,1984	1,8713	1,8965	1,9204	1,9439
1,0	$v$	0,0010018	0,0010079	0,001070	0,0010289	1,730	1,830	1,926
	$h$	20,1	40,0	60,0	80,0	639,2	649,0	658,4
	$s$	0,0708	0,1365	0,1984	0,2567	1,7603	1,7851	1,8083
1,2	$v$	0,0010018	0,0010078	0,001070	0,0010289	0,0010435	1,521	1,602
	$h$	20,1	40,0	60,0	80,0	100,1	648,5	658,0
	$s$	0,0708	0,1365	0,1984	0,2567	0,3121	1,7640	1,7875
6,0	$v$	0,0010016	0,0010077	0,001068	0,0010287	0,0010432	0,0010513	0,0010696
	$h$	20,2	40,1	60,1	80,1	100,1	110,2	130,5
	$s$	0,0708	0,1365	0,1983	0,2566	0,3120	0,3386	0,3900
8,0	$v$	0,0010015	0,0010076	0,001067	0,0010286	0,0010431	0,0010600	0,0010795
	$h$	20,2	40,2	60,1	80,1	100,2	120,3	140,7
	$s$	0,0708	0,1365	0,1983	0,2565	0,3119	0,3646	0,4149
10,0	$v$	0,0010014	0,0010075	0,001066	0,0010285	0,0010430	0,0010599	0,0010794
	$h$	20,3	40,2	60,1	80,1	100,2	120,4	140,7
	$s$	0,0707	0,1364	0,1982	0,2565	0,3119	0,3646	0,4149
12,0	$v$	0,0010013	0,0010074	0,001065	0,0010284	0,0010429	0,0010598	0,0010793
	$h$	20,3	40,2	60,2	80,2	100,2	120,4	140,8
	$s$	0,0707	0,1364	0,1982	0,2565	0,3119	0,3645	0,4148

Продолжение прил. П22

$p$ , ат	$t$ , °C	20	40	60	80	100	120	140
14,0	$v$	0,0010012	0,0010073	0,001064	0,0010283	0,0010428	0,0010596	0,0010792
	$h$	20,3	40,3	60,2	80,2	100,3	120,4	140,8
	$s$	0,0707	0,1364	0,1982	0,2564	0,3118	0,3644	0,4148
16,0	$v$	0,0010011	0,0010072	0,001063	0,0010282	0,0010427	0,0010595	0,0010791
	$h$	20,4	40,3	60,2	80,2	100,3	120,5	140,8
	$s$	0,0707	0,1364	0,1982	0,2564	0,3118	0,3644	0,4147
18,0	$v$	0,0010010	0,0010071	0,001062	0,0010281	0,0010425	0,0010594	0,0010789
	$h$	20,4	40,4	60,3	80,3	100,3	120,5	140,9
	$s$	0,0707	0,1364	0,1982	0,2564	0,3117	0,3644	0,4147
20,0	$v$	0,0010010	0,0010070	0,001061	0,0010280	0,0010425	0,0010593	0,0010788
	$h$	20,4	40,4	60,3	80,3	100,4	120,5	140,9
	$s$	0,0707	0,1364	0,1981	0,2563	0,3117	0,3643	0,4146
30	$v$	0,0010005	0,0010066	0,0010157	0,0010275	0,0010419	0,010588	0,0010782
	$h$	20,7	40,6	60,5	80,5	100,5	120,7	141,1
	$s$	0,0706	0,1362	0,1980	0,2561	0,3115	0,3641	0,4144
80	$v$	0,0009984	0,0010044	0,0010135	0,0010254	0,0010398	0,0010565	0,0010775
	$h$	21,77	41,66	61,57	81,52	101,48	121,54	141,84
	$s$	0,0703	0,1359	0,1973	0,2553	0,3105	0,3631	0,4133
90	$v$	0,0009980	0,0010039	0,0010130	0,0010250	0,0010394	0,0010560	0,0010750
	$h$	22,00	41,87	61,77	81,70	101,66	121,71	141,99
	$s$	0,0702	0,1357	0,1971	0,2551	0,3103	0,3628	0,4130

Продолжение прил. П22

$p$ , ат	$t$ , °C	20	40	60	80	100	120	140
100	$v$	0,0009976	0,0010034	0,0010126	0,0010246	0,0010390	0,0010555	0,0010745
	$h$	22,22	42,08	61,67	81,89	101,84	121,88	142,15
	$s$	0,0702	0,1356	0,1970	0,2550	0,3101	0,3626	0,4128
120	$v$	0,0009967	0,0010025	0,0010117	0,0010237	0,0010380	0,0010545	0,0010733
	$h$	22,67	42,50	62,37	82,27	102,20	122,23	142,47
	$s$	0,0701	0,1355	0,1967	0,2547	0,3097	0,3623	0,4124
130	$v$	0,0009962	0,0010021	0,00101113	0,0010232	0,0010375	0,0010540	0,0010727
	$h$	22,89	42,72	62,57	82,46	102,38	122,39	142,63
	$s$	0,0700	0,1354	0,1966	0,2545	0,3095	0,3621	0,4122
140	$v$	0,0009958	0,0010016	0,0010109	0,0010227	0,0010370	0,0010535	0,0010721
	$h$	23,11	42,92	62,77	82,65	102,56	122,57	142,80
	$s$	0,0700	0,1352	0,1965	0,2544	0,3094	0,3619	0,4119
160	$v$	0,0009949	0,0010008	0,0010101	0,0010219	0,00110360	0,0010524	0,0010709
	$h$	23,54	43,33	63,16	83,02	102,92	122,92	143,11
	$s$	0,0699	0,1351	0,1962	0,2541	0,3090	0,3615	0,4115
240		0,0009914	0,0009975	0,0010067	0,0010184	0,0010322	0,0010482	0,0010663
		25,31	45,00	64,74	84,53	104,36	124,28	144,39
		0,0695	0,1344	0,1951	0,2528	0,3076	0,3598	0,4097
300		0,0009888	0,0009951	0,0010043	0,0010158	0,0010295	0,0010452	0,0010629
		26,62	46,25	65,93	85,66	105,44	125,32	145,36
		0,0693	0,1338	0,1945	0,2520	0,3066	0,3587	0,4084

Продолжение прил. П22

$p$ , ат	$t$ , °C	160	180	200	220	240	260	280
0,04	$v$	50,94	53,28	55,64	57,99	60,34	62,70	65,05
	$h$	669,4	678,6	687,8	697,0	706,4	715,8	725,3
	$s$	2,1877	2,2085	2,2284	2,2476	2,2661	2,2841	2,3015
0,08	$v$	25,46	26,64	27,82	28,99	30,17	31,35	32,52
	$h$	669,3	678,5	687,8	697,0	706,3	715,7	725,2
	$s$	2,1112	2,1319	2,1518	2,1711	2,1897	2,2076	2,2449
0,10	$v$	20,36	21,30	22,24	23,19	24,13	25,07	26,02
	$h$	669,3	678,5	687,7	697,0	706,3	715,7	725,2
	$s$	2,0865	2,1073	2,1273	2,1465	2,1650	2,1830	2,2003
0,12	$v$	16,96	17,75	18,54	19,32	20,11	20,89	21,68
	$h$	669,3	678,5	687,7	697,0	706,3	711,0	725,2
	$s$	2,0664	2,0872	2,1072	2,1264	2,1450	2,1541	2,1803
0,14	$v$	14,54	15,21	15,88	16,56	17,23	17,90	18,58
	$h$	669,2	678,4	687,7	697,0	706,3	715,7	725,2
	$s$	2,0493	2,0701	2,0901	2,1093	2,1278	2,1458	2,1633
0,16	$v$	12,720	13,310	13,899	14,488	15,076	15,664	16,25
	$h$	669,2	673,4	687,7	696,9	706,2	715,7	725,2
	$s$	2,0347	2,0554	2,0753	2,0946	2,1132	2,1310	2,1484
0,20	$v$	10,172	10,645	11,118	11,591	12,063	12,535	13,007
	$h$	669,1	678,3	687,6	696,9	706,2	715,6	725,2
	$s$	2,0098	2,0306	2,0506	2,0698	2,0885	2,1065	2,1238



Продолжение прил. П22

$p$ , ат	$t$ , °C	160	180	200	220	240	260	280
0,30	$v$	6,776	7,092	7,407	7,722	8,038	8,352	8,667
	$h$	669,0	678,2	687,5	696,8	706,1	715,5	725,1
	$s$	1,9648	1,9856	2,0058	2,0250	2,0436	2,0616	2,0790
1,0	$v$	2,023	2,119	2,214	2,310	2,405	2,500	2,595
	$h$	667,8	677,2	686,6	696,0	705,5	714,9	724,5
	$s$	1,8303	1,8515	1,8717	1,8913	1,9101	1,9284	1,9461
1,2	$v$	1,683	1,763	1,843	1,923	2,002	2,082	2,161
	$h$	667,5	676,9	686,4	695,8	705,3	714,8	724,3
	$s$	1,8097	1,8310	1,8514	1,8710	1,8898	1,9079	1,9258
6,0	$v$	0,3232	0,3416	0,3591	0,3763	0,3932	0,4099	0,4264
	$h$	659,4	670,1	680,6	690,7	700,7	710,7	720,7
	$s$	1,6186	1,6431	1,6655	1,6864	1,7064	1,7254	1,7438
8,0	$v$	0,0011020	0,2524	0,2662	0,2792	0,2925	0,3054	0,3180
	$h$	161,3	667,3	678,2	688,7	699,0	709,2	719,4
	$s$	0,4636	1,6063	1,6300	1,6517	1,6722	1,6916	1,7102
10,0	$v$	0,0011018	0,1987	0,2103	0,2214	0,2321	0,2426	0,2529
	$h$	161,3	663,8	675,4	686,5	697,2	707,6	717,8
	$s$	0,4635	1,5760	1,6008	1,6236	1,6449	1,6650	1,6839
12,0	$v$	0,0011017	0,0011273	0,1728	0,1825	0,1918	0,2007	0,2095
	$h$	161,3	182,3	672,9	648,5	695,3	705,9	716,4
	$s$	0,4635	0,5106	1,5762	1,6000	1,6220	1,6425	1,6618

Продолжение прил. П22

<i>p</i> , ат	<i>t</i> , °С	160	180	200	220	240	260	280
14,0	<i>v</i>	0,0011015	0,0011272	0,1460	0,1547	0,1629	0,1708	0,1784
	<i>h</i>	161,4	182,3	670,0	682,3	693,5	704,2	714,6
	<i>s</i>	0,4634	0,5105	1,5545	1,5796	1,6020	1,6229	1,6426
16,0	<i>v</i>	0,0011014	0,0011270	0,0011565	0,1338	0,1411	0,1482	0,1551
	<i>h</i>	161,4	182,3	203,6	679,9	691,4	702,3	713,2
	<i>s</i>	0,4633	0,5104	0,5562	1,1510	1,5843	1,6056	1,6257
18,0	<i>v</i>	0,0011013	0,0011268	0,0011563	0,1175	0,1242	0,1307	0,1369
	<i>h</i>	161,4	182,3	203,6	677,0	689,3	700,6	711,8
	<i>s</i>	0,4633	0,5103	0,5561	1,5438	1,5681	1,5900	1,6104
20,0	<i>v</i>	0,0011011	0,0011267	0,0011561	0,1043	0,1108	0,1168	0,1225
	<i>h</i>	161,4	182,3	203,6	674,4	687,2	698,9	710,2
	<i>s</i>	0,4632	0,5102	0,5560	1,5280	1,5530	1,5756	1,5967
30	<i>v</i>	0,001104	0,0011259	0,0011552	0,0011892	0,06987	0,07459	0,7889
	<i>h</i>	161,1	182,4	203,6	225,4	675,0	688,9	701,9
	<i>s</i>	0,4629	0,5098	0,5556	0,6006	1,4000	1,5167	1,5405
80	<i>v</i>	0,0010973	0,001222	0,0011506	0,0011835	0,0012223	0,0012691	0,0013280
	<i>h</i>	162,37	183,14	204,21	225,71	247,89	270,9	295,1
	<i>s</i>	0,4614	0,5079	0,5535	0,5981	0,6423	0,6864	0,7308
90	<i>v</i>	0,0010855	0,0011214	0,0011497	0,0011824	0,0012209	0,0012672	0,0013250
	<i>h</i>	152,23	183,28	204,32	225,80	247,94	270,9	295,0
	<i>s</i>	0,4373	0,5075	0,5532	0,5977	0,6417	0,6858	0,7300

Продолжение прил. П22

$p$ , ат	$t$ , °C	160	180	200	220	240	260	280
100	$v$	0,0010961	0,0011207	0,0011488	0,0011813	0,0012195	0,0012653	0,0013222
	$h$	162,67	183,41	204,43	225,89	247,99	270,9	294,4
	$s$	0,4608	0,5072	0,5527	0,5972	0,6412	0,6852	0,7293
120	$v$	0,0010947	0,0011101	0,0011470	0,0011791	0,0012167	0,0012616	0,0013170
	$h$	162,95	183,66	204,64	226,06	248,07	270,8	294,6
	$s$	0,4603	0,5066	0,5520	0,5964	0,6402	0,6839	0,7278
130	$v$	0,0010940	0,0011183	0,0011460	0,0011780	0,0012153	0,0012598	0,0013144
	$h$	163,10	183,79	204,75	226,15	248,11	270,8	294,5
	$s$	0,4601	0,5063	0,5516	0,5959	0,6397	0,6833	0,7271
140	$v$	0,00109	0,0011176	0,0011451	0,0011769	0,0012140	0,0012580	0,0013118
	$h$	163,24	183,92	204,86	226,23	248,16	270,8	294,5
	$s$	0,4598	0,5060	0,5513	0,5955	0,6392	0,6827	0,7263
160	$v$	0,0010811	0,0011160	0,0011433	0,0011747	0,0012113	0,0012544	0,0013069
	$h$	153,29	184,18	205,08	226,40	248,25	270,7	294,4
	$s$	0,4357	0,5054	0,5506	0,5946	0,6382	0,6816	0,7250
240	$v$	0,0010867	0,0011099	0,0011361	0,0011663	0,00121011	0,0012412	0,0012893
	$h$	164,71	185,22	205,97	227,08	248,68	270,7	293,9
	$s$	0,4574	0,5035	0,5481	0,5917	0,6348	0,6772	0,7196
300	$v$	0,0010829	0,0011054	0,0011311	0,0011603	0,0011938	0,0012321	0,0012775
	$h$	165,59	186,01	206,64	227,63	249,06	271,0	293,8
	$s$	0,4559	0,5018	0,5463	0,5897	0,6323	0,6745	0,7162

Продолжение прил. П22

$p$ , ат	$t$ , °C	300	350	400	450	500	600
0,04	$v$	67,41	73,30	79,18	85,06	90,94	102,71
	$h$	734,9	759,0	783,5	808,3	833,6	885,5
	$s$	2,3184	2,3585	2,3963	2,4322	2,4664	2,5303
0,08	$v$	33,70	36,64	39,59	42,53	45,47	51,35
	$h$	734,8	758,9	783,4	808,3	833,6	885,4
	$s$	2,2418	2,2821	2,3198	2,3556	2,3899	2,4539
0,10	$v$	26,96	29,31	31,67	34,02	36,38	41,08
	$h$	734,8	558,9	783,4	808,3	833,6	885,4
	$s$	2,2172	2,2575	2,2953	2,3311	2,3654	2,4293
0,12	$v$	22,46	24,42	26,39	28,35	30,31	34,24
	$h$	734,8	758,9	783,4	808,3	833,6	885,4
	$s$	2,1972	2,2575	2,2752	2,3111	2,3453	2,4092
0,14	$v$	19,25	20,93	22,61	24,30	25,98	29,34
	$h$	734,8	758,9	783,4	808,3	833,6	885,4
	$s$	2,1802	2,2205	2,2582	2,2940	2,3283	2,3922
0,16	$v$	16,84	18,31	19,79	21,25	22,72	25,68
	$h$	734,8	758,9	783,4	808,3	833,6	885,4
	$s$	2,1654	2,2056	2,2435	2,2793	2,3137	2,3775
0,20	$v$	13,478	14,656	15,833	17,00	18,17	20,54
	$h$	734,8	758,9	783,4	808,3	833,6	885,4
	$s$	2,1409	2,1810	2,2189	2,2547	2,2891	2,3529

Продолжение прил. П22

$p$ , ат	$t$ , °C	300	350	400	450	500	600
0,30	$v$	8,983	9,769	10,554	11,339	12,124	13,693
	$h$	734,7	758,9	783,4	808,3	833,6	885,4
	$s$	2,0959	2,1364	2,1741	2,2101	2,2445	2,3082
1,0	$v$	2,690	2,927	3,163	3,399	3,636	4,107
	$h$	734,1	758,3	782,9	807,9	833,2	885,1
	$s$	1,9634	2,0040	2,0421	2,0779	2,1119	2,1749
1,2	$v$	2,240	2,439	2,635	2,832	3,028	3,422
	$h$	733,9	758,1	782,7	807,7	833,0	884,9
	$s$	1,9431	1,9838	2,0218	2,057	2,0918	2,1548
6,0	$v$	0,4428	0,4834	0,5237	0,5637	0,6036	0,6829
	$h$	730,7	755,9	781,1	806,4	831,9	884,0
	$s$	1,7615	1,8035	1,8422	1,8787	1,9131	1,9764
8,0	$v$	0,3305	0,3613	0,3918	0,4219	0,4519	0,5117
	$h$	729,4	754,9	780,3	805,7	831,4	883,6
	$s$	1,7282	1,7705	1,8099	1,8464	1,8808	1,9445
10,0	$v$	0,2630	0,2879	0,3126	0,3369	0,3609	0,4088
	$h$	728,0	753,8	779,5	805,1	830,9	883,2
	$s$	1,7019	1,7448	1,7843	1,8211	1,8558	1,9195
12,0	$v$	0,2181	0,2390	0,2598	0,2801	0,3003	0,3405
	$h$	726,7	752,8	778,7	804,5	830,5	882,8
	$s$	1,6802	1,7235	1,7633	1,8005	1,8351	1,8990

Продолжение прил. П22

<i>p</i> , ат	<i>t</i> , °С	300	350	400	450	500	600
14,0	<i>v</i>	0,1859	0,2041	0,2220	0,2396	0,2570	0,2915
	<i>h</i>	725,1	751,7	777,9	803,9	829,9	882,5
	<i>s</i>	1,6612	1,7052	1,7454	1,7827	1,8177	1,8817
16,0	<i>v</i>	0,1618	0,1779	0,1937	0,2092	0,2245	0,2548
	<i>h</i>	724,0	750,7	777,1	803,2	829,4	882,1
	<i>s</i>	1,6447	1,6893	1,7299	1,7673	1,8024	1,8667
18,0	<i>v</i>	0,1430	0,1577	0,1717	0,1856	0,1992	0,2264
	<i>h</i>	722,8	749,7	776,2	802,5	828,8	881,7
	<i>s</i>	1,6298	1,6750	1,7160	1,7538	1,7889	1,8534
20,0	<i>v</i>	0,1281	0,1412	0,1542	0,1667	0,1790	0,2035
	<i>h</i>	721,3	748,8	775,5	801,9	828,3	881,3
	<i>s</i>	1,6166	1,6621	1,7035	1,7114	1,7767	1,8415
30	<i>v</i>	0,08294	0,09239	0,1013	0,1101	0,1185	0,1350
	<i>h</i>	714,2	743,5	771,4	798,7	825,7	879,6
	<i>s</i>	1,5624	1,6112	1,6542	1,6942	1,7295	1,7950
80	<i>v</i>	0,02503	0,03076	0,03514	0,03903	0,04265	0,04944
	<i>h</i>	667,0	713,9	749,5	781,5	811,8	869,8
	<i>s</i>	1,3875	1,4665	1,5217	1,5676	1,6082	1,6788
90	<i>v</i>	0,0014024	0,02652	0,03070	0,03428	0,03758	0,04372
	<i>h</i>	321,1	706,9	744,6	777,8	809,0	867,8
	<i>s</i>	0,7664	1,4446	1,5031	1,5508	1,5925	1,6642

Окончание прил. П22

$p$ , ат	$t$ , °C	300	350	400	450	500	600
100	$v$	0,0013978	0,02307	0,02709	0,03046	0,03352	0,03916
	$h$	320,7	699,0	739,8	774,4	806,1	865,3
	$s$	0,7751	1,4231	1,4858	1,5353	1,5781	1,6509
120	$v$	0,0013896	0,01780	0,02166	0,02470	0,02740	0,03229
	$h$	320,1	681,5	729,5	766,7	800,1	861,1
	$s$	0,7729	1,3798	1,4537	1,5074	1,5522	1,6273
130	$v$	0,0013857	0,01566	0,01955	0,02248	0,02505	0,02965
	$h$	319,8	671,2	724,0	762,7	797,1	859,0
	$s$	0,7718	1,3570	1,4386	1,4944	1,5406	1,6168
140	$v$	0,0013819	0,01374	0,1772	0,02057	0,02303	0,02739
	$h$	319,5	660,3	718,2	758,8	794,1	856,9
	$s$	0,7709	1,3338	1,4234	1,4820	1,5292	1,6067
160	$v$	0,0013746	0,01032	0,014741	0,01746	0,01974	0,02371
	$h$	319,1	630,0	705,6	750,5	787,8	852,7
	$s$	0,7690	1,2780	1,3937	1,4582	1,5086	1,5886
240	$v$	0,0013489	0,001617	0,00710	0,01006	0,01204	0,1511
	$h$	317,9	388,5	636,1	712,3	760,0	835,2
	$s$	0,7625	0,8808	1,2606	1,3718	1,4367	1,5302
300	$v$	0,0013326	0,001561	0,00306	0,00697	0,00893	0,01171
	$h$	317,4	384,7	525,6	676,4	736,3	821,6
	$s$	3,7580	0,8703	1,0859	1,3071	1,3895	1,4940

## СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ .....	3
ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ .....	4
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАЗДЕ- ЛОВ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ .....	7
1.1. Описание конструкции котла .....	7
1.2. Поверочный тепловой расчёт котла .....	7
1.2.1. Расчёт объёмов и энтальпий воздуха и продуктов сгорания .....	7
1.2.2. Расчётный тепловой баланс и расход топлива .....	10
1.2.3. Расчёт топочной камеры .....	13
1.2.4. Расчёт конвективных поверхностей нагрева .....	17
1.2.4.1. Расчёт конвективных пучков котла .....	17
1.2.4.2. Расчёт конвективных пароперегревателей .....	20
1.2.4.3. Расчёт водяных экономайзеров .....	25
1.2.4.4. Расчёт воздухоподогревателей .....	27
1.3. Аэродинамический расчёт котла .....	30
1.4. Гидравлический расчёт котла .....	32
1.4.1. Гидравлический расчёт котла с естественной циркуляцией .....	32
1.4.2. Гидравлический расчёт прямоточного котла .....	35
1.4.3. Гидравлический расчёт котла с многократной принудительной циркуляцией .....	37
1.5. Расчёт тепловой схемы котельной .....	39
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРОЕКТА .....	44
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	45
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	46