

В.М.Токарев

**ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ  
КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА**

Учебное пособие  
к курсовому проекту

**Челябинск  
2006**

---

## ВВЕДЕНИЕ

Целью курсового проекта является усвоение знаний, полученных при изучении курсов «Теплогенерирующие установки», «Основы теплообмена», «Элементы теории горения» и «Гидрогазодинамика гомогенных и газо-жидкостных потоков». Для выработки навыков и умений в выполнении инженерных расчетов, согласно учебному плану студентами специальности 290700 в 6-м семестре дневной и в 8-м семестре вечерней формы обучения выполняется поверочно-конструкторский расчет теплогенератора малой или средней мощности. В настоящем учебном пособии излагаются методики и рекомендации для поверочного и поверочно-конструктивного расчета водогрейных котельных агрегатов.

В процессе выполнения курсового проекта студент должен самостоятельно решить поставленные перед ним задачи с использованием рекомендуемой литературы и настоящего руководства.

Расчеты должны быть оформлены пояснительной запиской со всеми необходимыми схемами, описаниями и ссылками на использованную литературу. Графические материалы должны включать чертежи продольного, поперечного и горизонтального разрезов котельного агрегата.

## 1. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ

### 1.1. Исходные данные

Техническое задание для теплового расчета водогрейного котла должно содержать следующие исходные данные.

1. Наименование котла (серия и типоразмер).
2. Тепловая мощность  $Q$  [МВт, Гкал/ч].
3. Температурный график источника теплоснабжения.
4. Вид топлива и его характеристики.
5. Способ сжигания топлива и тип топки.
6. Вид хвостовых поверхностей нагрева и их компоновка.
7. Температура уходящих газов  $\nu_{ух}$ .
8. Температура воздуха на входе и выходе из воздухоподогревателя.

Дополнительные исходные данные, необходимые для выполнения расчетов принимаются самостоятельно с учетом рекомендаций нормативных источников [1, 2, 4, 6].

## 1.2. Рекомендации к выполнению работы

В практике выполнения тепловых расчетов теплоэнергетического оборудования различают конструктивный и поверочный тепловой расчет. Конструктивный расчет выполняется в процессе проектирования котельного агрегата на заданную тепловую мощность, вид сжигаемого топлива, параметры теплоносителя. Результаты расчета должны содержать, в том числе, величины поверхностей теплообмена, их конструктивное оформление и компоновку.

Поверочный расчет выполняется для существующих конструкций котельных агрегатов. Величины поверхностей теплообмена, геометрия и их компоновка в этом случае заданы. Целью расчета является определение параметров рабочих сред на границах отдельных элементов котельного агрегата формулирующихся в нештатных условиях эксплуатации.

Целью настоящей курсовой работы является выполнение в соответствии с заданием поверочного расчета водогрейного котла и конструктивного расчета хвостовой поверхности нагрева. Необходимость конструктивной проработки хвостовой поверхности нагрева определяется тем, что котлы малой и средней мощности поставляются котлостроительными заводами без комплектации их экономайзерами или воздухоподогревателями. Компоновки, геометрия и поверхность теплообмена определяются в процессе разработки проекта.

В выполняемой студентом курсовой работе вид хвостовой поверхности оговаривается в задании на проектирование. В большинстве случаев для котлов, работающих на твердом топливе, задается воздухоподогреватель. Котлы, работающие на газообразном, жидком и высококалорийном твердом топливе, комплектуются экономайзерами.

При комплектации котельного агрегата воздухоподогревателями рекомендуется температуру воздуха, подаваемого в топочную камеру, принимать в соответствии с табл. 1.1.

Рекомендуемые температуры воздуха  $t_{в}$ , °С,  
подаваемого в топку

№ п/п	Тип топки и вид топлива	Тепловая мощность теплогенератора N, МВт		
		< 10	10 ÷ 20	> 20
Слоевые топки				
1	Тощие угли и антрацит	25 – 30	100 – 150	150 – 200
2	Каменные угли и бурые угли марки Б2 и Б3	25 – 30	150 – 200	150 – 200
3	Бурые угли марки Б1	100 – 150	150 – 200	150 – 250
4	Торф и древесные отходы	200 – 210	200 – 250	200 – 250
Камерные топки с твёрдым шлакоудалением				
5	Антрациты и тощие угли	–	–	350 – 400
6	Каменные угли маловлажные ( $W^п < 1,5$ )	–	–	250 – 300
7	Каменные и бурые угли влажные ( $W^п = 1,5 ÷ 5$ )	–	–	300 – 350
8	Высоковлажные бурые угли ( $W^п > 5$ )	–	–	350 – 400
9	Фрезерный торф	200 – 210	250 – 300	380 – 420
10	Камерные топки с жидким шлакоудалением, независимо от вида сжигаемого топлива	–	–	380 – 420
Газомазутные топки				
11	Природный газ и мазут	25 – 30	100 – 120	200 – 300
12	Доменный газ	25 – 30	150 – 200	250 – 300

Температура воздуха на входе в воздухоподогреватель  $t_{вп}$  обычно принимается 25 – 30 °С. Однако при сжигании высоковлажных  $W^п > 3,6$  и сернистых топлив для предотвращения конденсации водяных паров воздух целесообразно подавать на вход воздухоподогревателя предварительно разогретым до температуры 60 – 80 °С. Для предварительного подогрева воздуха используются калориферы или рециркуляция части горячего воздуха во всасывающий патрубок вентилятора.

## 2. ТОПЛИВО. ВОЗДУХ. ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ

### 2.1. Основные характеристики топлива

Основные характеристики указанного в задании топлива выписываются из табл. 1: состав рабочей массы, низшая теплота сгорания  $Q_H^P$ , выход летучих и характеристики золы (для твёрдого топлива), физические характеристики (для мазута). Характеристики для газообразного топлива выписываются из табл. 2 – состав газа по объёму, теплота сгорания  $Q_H^C$ , КДж/м<sup>3</sup>, плотность при нормальных условиях.

Приведённые характеристики топлива  $A^H$ ,  $W^H$ , (% кг/МДж), определяются по формулам:

$$A^H = 10^3 A^P / Q_H^P; \quad W^H = 10^3 W^P / Q_H^P.$$

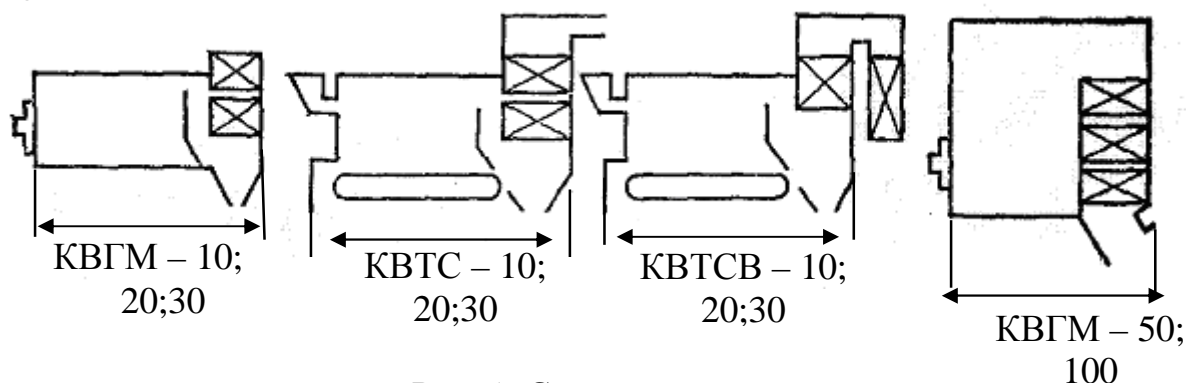


Рис. 1. Схемы компоновок

### 2.2. Выбор коэффициента избытка воздуха и присосов в газоходах котельного агрегата

В реальных топочных камерах для эффективного сжигания топлива приходится подавать воздуха больше, чем это теоретически необходимо:

$$V_d = V^0 \cdot \alpha_T, \quad (1)$$

где  $V_d$  – объём подаваемого в топку воздуха, м<sup>3</sup>/кг;

$V^0$  – объём теоретически необходимого для осуществления процесса горения воздуха, м<sup>3</sup>/кг;

$\alpha_T$  – коэффициент избытка воздуха на выходе из топки.

По мере движения продуктов сгорания по газоходам коэффициент избытка увеличивается за счёт присосов воздуха в газовый тракт агрегата через неплотности в обмуровке.

При тепловом расчёте коэффициент избытка воздуха на выходе из топки  $\alpha_T$  и присосы воздуха в отдельных элементах котлоагрегата  $\Delta\alpha_T$  принимают на основе обобщённых данных эксплуатации агрегатов.

Значение расчётного коэффициента избытка воздуха в отдельных сечениях газохода  $\alpha$  определяют суммированием коэффициента избытка воздуха в топке с присосами воздуха в газоходах, расположенных между топкой и рассматриваемым сечением, т.е.

$$\alpha = \alpha_T + \Sigma \Delta \alpha_i. \quad (2)$$

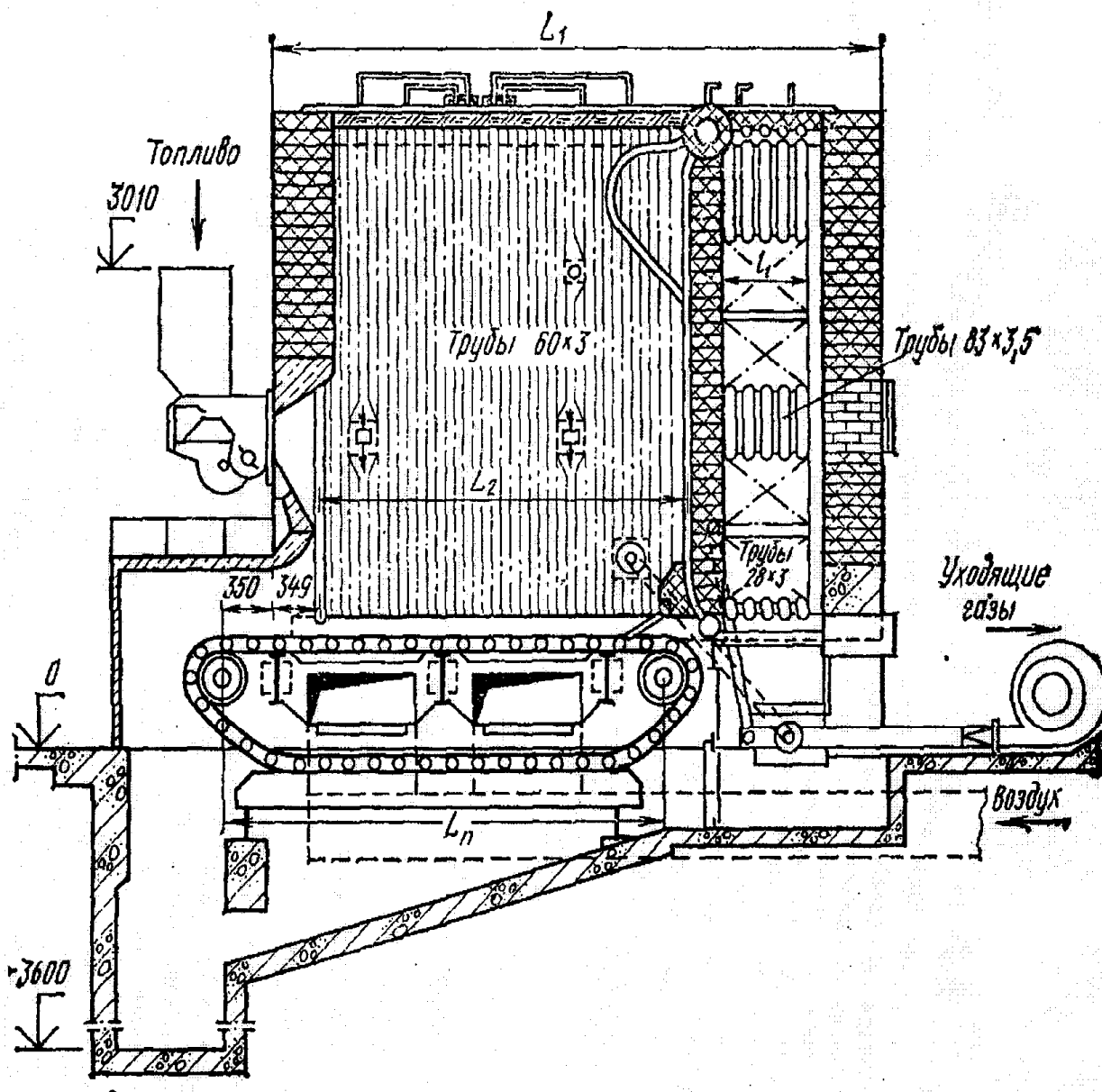


Рис. 2. Общий вид водогрейных котлов (теплогенераторов) КВ – ТС – 4 и 6, 5

Для котла типа КВ – ТС – 20 (см. рис. 1) определение коэффициента избытка воздуха производится согласно табл. 2.

### 2.3. Расчёт объёмов воздуха и продуктов сгорания топлива

Расчётные значения теоретически необходимого количества воздуха  $V^0$ , азота  $V_{N_2}$ , трехатомных газов  $V_{RO_2}$ , водяных паров  $V_{H_2O}$  и объёма образующихся продуктов сгорания  $V^0_{\Gamma}$  отнесённые к 1 кг твёрдого, жидкого и к 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива для конкретного вида топлива приведены в табл. 8, 9. Действительные значения определяемых величин для конкретного участка газохода рассчитываем в табличной форме.

Таблица 2

Характеристика продуктов сгорания по ходу газов

№ п/п	Величины	$V^0, \text{ м}^3/\text{кг}; V^0_{H_2O}, \text{ м}^3/\text{кг};$ $V_{RO_2}, \text{ м}^3/\text{кг}; V^0_{N_2}, \text{ м}^3/\text{кг}$			
		Ед. изм.	Топка, фестон	Конвектив- ные пакеты	Воздухо- подогре- ватель
1	Средний коэффициент избытка воздуха $\alpha_i^{cp}$		$\alpha_T$	$\alpha_{кп}^{cp}$	$\alpha_{вп}^{cp}$
2	Объём водяных паров $V_{H_2O} = V^0_{H_2O} + (\alpha_i^{cp} - 1) \cdot V^0 \cdot 0,0161$	$\text{м}^3/\text{м}^3,$ $\text{м}^3/\text{кг}$	—	—	—
3	Полный объём продуктов сгорания $V_{\Gamma} = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V^0_{N_2} + (\alpha_i^{cp} - 1) \cdot V^0$	$\text{м}^3/\text{кг},$ $\text{м}^3/\text{кг}$	—	—	—
4	Объёмная доля водяных паров $r_{H_2O} = V_{H_2O}/V_{\Gamma}$	—	—	—	—
5	Объёмная доля трехатомных газов $r_{RO_2} = V_{RO_2}/V_{\Gamma}$	—	—	—	—
6	Суммарная доля трехатомных газов $r_{п} = r_{H_2O} + r_{RO_2}$	—	—	—	—
7	Концентрация золы в дымовых газах $\mu = 10A^p a_{yn}/V_{\Gamma}$ $\mu = A^p a_{yn}/1,3V_{\Gamma} 100$	$\text{г}/\text{м}^3,$ $\text{кг}/\text{кг}$	—	—	—

$a_{yn}$  – здесь и далее доля золы в уносе.

## 2.4. Энтальпия воздуха и продуктов сгорания

Энтальпии теоретического объема воздуха  $I_B^0$  и продуктов сгорания  $I_r^0$ , отнесенные к 1 кг или 1 м<sup>3</sup> топлива при соответствующей температуре приводятся в табл. 8, 9. Энтальпию продуктов сгорания для соответствующих участков газового тракта определяют по формуле

$$I_i = I_{ri} + I_{зл} = I_r^0 + (\alpha_i^{cp} - 1) I_B^0 + I_{зл}. \quad (3)$$

Расчет удобно вести в табличной форме. Количество расчетных участков должно соответствовать схеме проектируемого агрегата. Энтальпия подсчитывается в отмеченном диапазоне температур.

Таблица 3

Энтальпии продуктов сгорания в газоходах

t, °С	$\frac{I_B^0, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{I_r^0, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{I_{зл}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	Участки газового тракта					
				Топка фестон		Конвектив- ные пакеты		Воздухоподог- реватель	
				I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI
100						—		—	
200						—		—	
300						—		—	
400						—		—	
500						—		—	
600						—			
700						—			
800				—		—			
900				—		—			
1000				—		—			
1100				—		—			
1200				—					
1400				—					
1600				—					
1800				—					
2000				—					
2200				—					



$I_{\text{зл}}$  – энтальпия золы учитывается, если

$$\frac{A^p a_{\text{ун}}}{Q_{\text{н}}^p} > 1,5 \text{ [\% кг/кДж]}, \quad (4)$$

$$I_{\text{зл}} = 4,18 (\text{с}\vartheta)_{\text{зл}} A^p a_{\text{ун}} / 100, \quad (5)$$

где  $(\text{с}\vartheta)_{\text{зл}}$  – определяется по табл. 8.

По данным табл. 2. на миллиметровой бумаге строится график зависимости энтальпии от температуры  $I - \vartheta$ .

### 3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОТЛОАГРЕГАТА

#### 3.1. Располагаемая теплота топлива

Тепловой баланс котлоагрегата выражает количественное соотношение между поступившей в агрегат теплотой (располагаемой теплотой топлива  $Q_p^p$ ) и суммой полезно использованной теплоты  $Q_1$  и тепловых потерь  $Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$ .

$$Q_p^p = Q_{\text{н}}^p + i_{\text{тл}}, \text{ кДж/кг}, \quad (6)$$

$Q_{\text{в.вн}}$  – количество теплоты, внесенное воздухом – учитывается лишь в случае подогрева воздуха вне котлоагрегата.

Физическая теплота топлива  $i_{\text{тл}}$  учитывается для жидкого топлива

$$i_{\text{тл}} = c_{\text{м}} t_{\text{м}}, \quad (7)$$

где  $c_{\text{м}}$  – теплоемкость мазута, кДж/кгК, вычисляется по формуле

$$c_{\text{м}} = 1,74 + 0,0025 t_{\text{м}}, \quad (8)$$

$t_{\text{м}}$  – температура подогрева мазута, принимается 120 – 130 °С.

#### 3.2. Статьи теплового баланса и КПД котлоагрегата

Общее уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \text{ кДж/кг}, \quad (9)$$

или в относительных величинах (процентах от располагаемой теплоты  $Q_p^p$ )

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6. \quad (10)$$

## Тепловой баланс теплогенератора

№ п/п	Определяемая величина	Обозначение	Ед.изм.	Расчетная формула, способ определения	Расчет	Величина
1	Располагаемая теплота	$Q_p^p$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Формула (6)		
2	Потеря теплоты от химической неполноты сгорания	$q_3$	%	Табл. 1		
3	Потеря теплоты от механической неполноты сгорания	$q_4$	–	Там же		
4	Температура уходящих газов	$\vartheta_{yx}$	$^{\circ}\text{C}$	См. раздел 1		
5	Энтальпия уходящих газов	$I_{yx}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По табл. 2		
6	Температура воздуха в котельной	$t_{xv}$	$^{\circ}\text{C}$	Принимается $30^{\circ}\text{C}$		
7	Энтальпия воздуха в котельной	$I_{xv}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$39,8 V^{\circ}$		
8	Потеря теплоты с уходящими газами	$q_2$	%	Формула (11)		
9	Потеря теплоты от наружного охлаждения	$q_5$	%	Табл. 5		
10	Потеря с теплом шлака	$q_6$	%	$\frac{A^p a_{\text{шл}} (c\vartheta)_{\text{шл}}}{Q_p^p}$		
11	Сумма тепловых потерь	$\Sigma q$	%	–		
12	КПД агрегата	$\eta_{ka}$	%	$100 - \Sigma q$		
13	Коэффициент сохранения теплоты	$\varphi$	–	$1 - \frac{q_5}{\eta_{ka} + q_5}$		
14	Тепловая мощность котлоагрегата	$Q_{ka}$	МВт	Из задания		
15	Полный расход топлива	$B$	кг/с	$\frac{Q_{ka} \cdot 10^5}{Q_p^p q_{ka}}$		
16	Расчетный расход топлива	$B_p$	кг/с	$B \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right)$		

Потеря теплоты с уходящими газами определяется по формуле:

$$q_2 = \frac{(I_{yx} - \alpha_{yx} I_{xb}^0)(100 - q_4)}{Q_p^p} \quad (11)$$

## 4. РАСЧЕТ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ

При проектировании и эксплуатации котельных установок чаще всего выполняется поверочный расчет топочных устройств, при этом считаются известными конструктивные характеристики топки и экранных поверхностей. В результате расчета определяются: температура продуктов сгорания на выходе из топочной камеры, удельные нагрузки колосниковой решетки и топочного объема. Полученные значения сравниваются с допустимыми, рекомендуемыми в нормативном методе.

### 4.1. Основные конструктивные и тепловые характеристики топки

1. По чертежам котла следует выполнить эскиз топки с указанием границ внутреннего объема, конструктивных характеристик поверхностей нагрева: длины, диаметра, шага труб, расположения горелки или размеров решетки.

2. Определяется объем топки и полная поверхность стен топки как сумма площадей ограждающих ее стен:

$$F_{ст} = F_{фр.ст.} + F_{задн.ст.} + 2F_{бок.ст.} + 2F_{пов.кам.} + F_{кол.реш.} \quad (12)$$

Определяется тепловое напряжение топочного объема и площади зеркала горения согласно п. 3.2, 3.2 [1] и сравниваются с максимально допустимыми, приведенными в [1].

### 4.2. Полная и лучевоспринимающая поверхность топки

Под площадью лучевоспринимающей поверхности участка  $H_{л}$  ( $m^2$ ) понимают площадь непрерывной поверхности, эквивалентной по тепловосприятию действительной незагрязненной площади поверхности экрана

$$H_{л} = F_{пл} x, \quad (13)$$

где  $F_{пл} = bl$  (14)

– площадь, занятая лучевоспринимающей поверхностью,  $m^2$ ;

$$b = s(z - 1) \text{ – расчетная ширина экрана, м} \quad (15)$$

$s$  – шаг труб, м;  
 $z$  – количество труб в экране;  
 $l$  – средняя освещенная длина труб, м;  
 $x$  – угловой коэффициент, зависящий от конструкции экрана, определяется по номограмме Ia [1].

Для определения площади суммарной лучевоспринимающей поверхности топки  $H_{л}^T$  учитывают площади всех лучевоспринимающих участков топки

$$H_{л}^T = \Sigma H_{лi}. \quad (16)$$

Расчет ведется в табличной форме.

Таблица 5

Расчет полной площади стен и суммарной лучевоспринимающей поверхности топки

№ п/п	Определяемая величина	Обозначение	Единица измерения	Фронтальная стена	Боковая стена	Задняя стена	Поворотная камера	Суммарное значение
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Полная площадь стены	$F_{ст.}$	$м^2$					
2	Расстояние между осями крайних труб	$b$	м					
3	Освещенная длина труб	$l$	м					
4	Площадь, занятая лучевоспринимающей поверхностью (формула 14)	$F_{пл}$	$м^2$					
5	Наружный диаметр труб	$d$	мм					
6	Шаг труб	$s$	мм					
7	Расстояние от оси труб до стены	$e$	мм					
8	Отношение $s/d$							
9	Отношение $e/d$							
10	Угловой коэффициент	$x$						

11	Площадь лучевос- принимающих по- верхностей экранов (формула 13)	$H_{лi}$	$m^2$					
12	Площадь лучевос- принимающей по- верхности топки (формула 16)	$H_{лT}$	$m^2$					
13	Степень экранирова- ния топки	$\alpha = H_{лT} / F_{ст.}$						
14	Коэффициент загряз- нения экранов [1, табл. 6 – 2]	$\zeta_i$						
15	Коэффициент тепло- вой эффективности экрана	$\psi_i$						
16	Средний коэффици- ент тепловой эффек- тивности топки	$\psi_{ср} = \sum \zeta_i H_{лi} / F_{ст.}$						

### 4.3. Расчет теплообмена в топке

При поверочном расчете температуру газов на выходе из топки  $\vartheta_T''$  определяют по серии номограмм, представленных в нормативном методе. Для этого необходимо знать следующее.

1. Ориентировочное значение температуры газов на выходе из топки  $\vartheta_T''$ .
2. Адиабатную температуру горения  $\vartheta_a$ .
3. Среднее значение коэффициента тепловой эффективности топки  $\psi_{ср}$ .
4. Параметр  $M$ , характеризующий распределение температур в топке.
5. Тепловую нагрузку стен топки  $B_p Q_T / F_{ст.}$  (кВт/м<sup>2</sup>).
6. Степень черноты факела  $a_f$ .
7. Параметр  $\rho = R / F_{ст.}$ .

Расчет теплообмена в топке ведется в табличной форме.

*Ориентировочное значение температуры газов на выходе из топки  $J_m''$*

Для твердого топлива принимается 900 – 1000 °С (на 60 – 100 °С меньше температуры начала деформации золы), для жидкого топлива 950 – 1050 °С, для газа 1000 – 1100 °С [1, 2, 6]. В результате расчета топки эта температура уточняется,

затем проверяется на условие устойчивого горения (нижний предел) и на предотвращение шлакования (верхний предел температур).

*Полезное тепловыделение в топке. Адиабатная температура горения*

Полезное тепловыделение в топке  $Q_{п\tau}$ , кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>)

$$Q_{п\tau} = Q_p^p \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_b, \quad (17)$$

где  $Q_p^p$  – располагаемая теплота топлива;

$Q_b$  – количество теплоты, вносимой в топку воздухом;

– при наличии воздухоподогревателя,

$$Q_b = (\alpha_T - \Delta \alpha_T - \Delta \alpha_{пл}) I_{ГВ}^0 + (\Delta \alpha_T + \Delta \alpha_{пл}) I_{ХВ}^0; \quad (18)$$

– при отсутствии воздухоподогревателя

$$Q_b = \alpha_T I_{ХВ}^0. \quad (19)$$

Значения присосов воздуха в топке и пылеприготовительной установке определяются по табл. 6.

Адиабатная температура горения определяется по  $I - \vartheta$ -диаграмме, если за эн- тальпию принять полезное тепловыделение  $Q_{п\tau}$ . Адиабатная температура (теоре- тическая) – максимально возможная температура, которой обладали бы продукты сгорания в топке при отсутствии теплообмена с поверхностями нагрева.

*Учет характера распределения температуры в топке*

Для учета характера распределения температуры в топке служит параметр  $M$ :

$M = 0,54 - 0,2 x_T$  – при сжигании газа и мазута,

$M = 0,59 - 0,5 x_T$  – при камерном сжигании высокорекреакционных топлив и слое- вом сжигании всех топлив,

$M = 0,56 - 0,5 x_T$  – при камерном сжигании тощих углей и антрацитов, а также каменных углей с повышенной зольностью;

$x_T$  – относительное положение в топке максимума температуры:

$x_T = 0,1$  – для слоевых топок с пневмомеханическим забрасывателем,

$x_T = x_r + \Delta x$  – для камерных топок с горизонтальным расположением горелок, где  $x_r = h_r / H_T$  – относительный уровень расположения горелок,  $h_r$  – уровень рас- положения оси горелки от пода топки,  $H_T$  – общая высота топки от пода (среди- ны холодной воронки) до середины выходного окна, м,

$\Delta x$  – поправка, учитывающая смещение максимума температуры в топке от- носительно уровня расположения горелок.

Для газомазутных топок при  $Q_{\text{ка}} > 20$  Гкал/ч  $\Delta x = 0$ , при  $Q_{\text{ка}} < 20$  Гкал/ч  $\Delta x = 0,15$ .

При сжигании угольной пыли рекомендуется  $\Delta x = 0,1$  для прямооточных горелок и  $\Delta x = 0$  для вихревых.

Величина  $M$  не должна приниматься больше 0,5 для камерных топок.

### Степень черноты факела

При сжигании твердого топлива эффективная степень черноты факела зависит от излучательной способности трехатомных газов и твердых частиц золы и кокса. Расчет ведется с учетом данных табл. 6. в последовательности, указанной в табл. 7.

Таблица 6

Значения  $k_{\text{кокс}}$  для различных способов сжигания углей

№ п/п	Вид топлива	Величина $k_{\text{кокс}}$ при:	
		слоевом сжигании	камерном сжигании
1	Тощий уголь, полуантрацит, антрацит	0,3	1,0
2	Бурый, каменный уголь, торф	0,15	0,5

При сжигании газа и мазута происходит частичное термическое разложение углеводородов с образованием сажистых частиц. Суммарная излучательная способность газомазутного факела определяется излучательной способностью светящейся части пламени (раскаленные сажистые частицы и трехатомные газы) и не светящейся части пламени (трехатомные газы).

Эффективная степень черноты газомазутного факела

$$a_{\text{ф}} = \tau a_{\text{св}} + (1 - \tau) a_{\text{г}}, \quad (20)$$

где  $a_{\text{св}}$ ,  $a_{\text{г}}$  – степень черноты которой обладал бы факел при заполнении всей топki только светящимся пламенем или только несветящимися газами,

$\tau$  – коэффициент, учитывающий заполнение объема топki светящимся пламенем.

При тепловом напряжении топki  $q_v = V_p Q_p^p \leq 400$  кВт/м<sup>3</sup> независимо от нагрузки  $\tau = 0,1$  для газа и  $\tau = 0,55$  для мазута. При  $q_v \geq 1000$  кВт/м<sup>3</sup>,  $\tau = 0,6$  для газа и  $\tau = 1,0$  для мазута.

При  $400 < q_v < 1000$ , значение  $\tau$  находят линейной интерполяцией.

Степень черноты светящейся  $a_{\text{св}}$  и несветящейся  $a_{\text{г}}$ , частей факела находят по формулам:

$$a_{\text{св}} = 1 - e^{-K_{\text{св}}PS}, \quad a_{\text{г}} = 1 - e^{-K_{\text{г}}cPS}. \quad (21)$$

Коэффициент ослабления лучей несветящимися газами

$$K_{Hc} = K_r \Gamma_{II}, \quad (22)$$

а коэффициент ослабления лучей светящейся частью пламени

$$K_{св} = K_{Hc} + K_c, \quad (23)$$

где  $k_c$  – коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами,

$$k_c = 0,3 (2 - \alpha_T) \cdot (1,6 T_T / 1000 - 0,5) \frac{C^p}{H^p}, \quad (24)$$

$C_p, H_p$  – содержание углерода и водорода в топливе, для газообразного топлива:

$$\frac{C^p}{H^p} = 0,12 \sum \frac{T}{H} C_T H_{II} = 0,12 \left( \frac{1}{4} CH_4 + \frac{2}{6} C_2H_6 + \frac{3}{8} C_3H_8 + \dots \right). \quad (25)$$

#### *Определение температуры газов на выходе из топки*

Расчетная температура на выходе из топки определяется по номограмме 7 [1]. Последовательность определения  $\vartheta_T''$  обозначена штриховой линией.

Таблица 7

#### Поверочный расчет теплообмена в топке

№ п/п	Определяемая величина	Обозначение	Ед.изм	Способ определения	Результат
1	2	3	4	5	6
1	Среднее значение коэффициента тепловой эффективности топки	$\Psi_{ср}$		Из табл. 4	
2	Эффективная толщина излучающего слоя	S	м	$3,6 V_T / F_{см}$	
3	Полная высота топки	$H_T$	м	По конструктивным размерам	
4	Высота расположения горелок	$h_r$	м	По конструктивным размерам	



Продолжение табл. 7

1	2	3	4	5	6
5	Относительный уровень расположения горелок	$x_T$		$h_T / H_T$	
6	Параметр, учитывающий распределение температуры в топке	M	I	П. 4	
7	Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки	$\alpha_m$			
8	Присос воздуха в топке	$\Delta\alpha_m$			
9	Присос воздуха в системе пылеприготовления (при пылеугольном сжигании)	$\Delta\alpha_{пл}$		Табл. 5	
10	Температура горячего воздуха (при наличии воздухоподогревателя)	$t_{гв}$	$^{\circ}\text{C}$	По предварительному выбору табл. 1.1	
11	Энтальпия горячего воздуха	$I_{гв}^0$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Табл. 3	
12	Энтальпия холодного воздуха	$I_{хв}^0$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Табл. 4	
13	Количество теплоты, вносимое в топку воздухом	$Q_{в.}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Формулы (18), (19)	
14	Полезное тепловыделение в топке	$Q_{пт}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Формула (17)	
15	Адиабатическая температура горения	$\vartheta_a$	$^{\circ}\text{C}$	П. 4	
16	Температура газов на выходе из топки	$\vartheta_T //$	$^{\circ}\text{C}$	По предварительному выбору п. 4	
17	Энтальпия газов на выходе из топки	$I_T //$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Табл. 3	
18	Объемная доля: – водяных паров – трехатомных газов	$\Gamma_{\text{H}_2\text{O}}$ $\Gamma_{\text{RO}_2}$		Табл. 2	

Продолжение табл. 7

1	2	3	4	5	6
19	Суммарная объемная доля трехатомных газов	$r_{\text{П}}$		Табл. 2	
20	Произведение	$P_{\text{п}}S$	м.мПа		
21	Коэффициент ослабления лучей: – трехатомными газами – золовыми частицами – коксовыми частицами	$K_{\text{Г}}$ $K_{\text{ЗЛ}}$ $K_{\text{КОКС}}$		Номограмма 3 [1] НОМОГРАММА 4 [1] табл. 6	
22	Концентрация золы в газах	$\mu_{\text{ЗЛ}}$		Табл. 2	
23	Коэффициент ослабления лучей топочной средой (для твердого топлива)	$K$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{мПа}}$	$K_{\text{Г}}r_{\text{П}} + K_{\text{ЗЛ}}\mu_{\text{ЗЛ}} + K_{\text{КОКС}}$	
24	Суммарная сила поглощения топочного объема	$KPS$			
25	Степень черноты факела (для твердого топлива)	$a_{\text{ф}}$		Номограмма 2 [1] $1 - e^{-KPS}$	
26	Коэффициент, учитывающий заполнение топки светящимся пламенем)	$m$		П. 4	
27	Коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами	$K_{\text{с}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{мПа}}$	П. 4 формула 24	
28	Коэффициент ослабления лучей несветящимися газами	$K_{\text{НС}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{мПа}}$	$K_{\text{Г}} r_{\text{П}}$	
29	Произведение			$K_{\text{НС}} P S$	
30	Степень черноты несветящейся части факела	$a_{\text{Г}}$		Номограмма 2 [1] $1 - e^{-K_{\text{НС}} PS}$	

1	2	3	4	5	6
31	Коэффициент ослабления лучей светящейся частью пламени	$K_{CB}$	$\frac{1}{M \cdot \text{МПа}}$	$K_{HC} + K_C$	
32	Степень черноты светящейся части факела	$a_{CB}$		Номограмма 2 [1] $1 - e^{-K_{CB} PS}$	
33	Эффективная степень черноты газомазутного факела	$a_{\phi}$		$m a_{CB} + (1 - m)a_r$	
34	Тепловая нагрузка стен топки	$q_F$		$\frac{B_p Q_T}{F_{CT}}$	
35	Отношение площади зеркала горения к площади стен (для слоевой топки)	$\rho$		$R/F_{CT}$	
36	Температура газов на выходе из топки	$\vartheta_T''$	$^{\circ}\text{C}$	Номограмма 7 [1]	
37	Энтальпия газов на выходе из топки	$I_T''$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Табл. 5	
38	Общее тепловосприятие топки	$Q_L$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\varphi(Q_{\text{ПТ}} - I_T'')$	

*Проверка правильности определения  $J_m''$  и ее соответствия условиям эксплуатации*

Если расчетная температура  $\vartheta_T''$  отличается от предварительно принятой не более чем на  $100^{\circ}\text{C}$ , то она (расчетная) принимается за действительную. Если отличие превышает  $100^{\circ}\text{C}$ , то найденную в результате расчета  $\vartheta_T''$  следует принять за исходную и расчет повторить.

## 5. РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

Конвективными называются такие поверхности, в которых процесс передачи теплоты осуществляется путем конвективного теплообмена. Для водогрейных котлов это фестоны, конвективные пакеты (пучки), воздухоподогреватели. Расчет конвективных поверхностей осуществляется по законам конвективного теплообмена.

При установившемся тепловом состоянии количество теплоты, отданное греющим теплоносителем (газами)  $Q_{\Gamma}$ , равно количеству теплоты, воспринятому нагреваемым теплоносителем (водой, воздухом)  $Q_{\Gamma}$ .

Тепло, отданное продуктам сгорания, определяется уравнением теплового баланса:

$$Q_{\Gamma} = \varphi (I' - I'' + \Delta\alpha I_{\text{прс}}), \quad \text{кДж/кг (кДж/м}^3\text{)}, \quad (26)$$

где  $\varphi$  – коэффициент сохранения теплоты,

$I'$ ,  $I''$  – энтальпия газов на входе в рассчитываемую поверхность нагрева и на выходе из нее,

$\Delta\alpha$  – присос воздуха на рассчитываемом участке газохода,

$I_{\text{прс}}$  – энтальпия присасываемого воздуха, определяется по диаграмме  $I - \vartheta$  при температуре присасываемого воздуха ( $30^{\circ}\text{C}$ ), или по формуле:

$$I_{\text{прс}}^0 = 39,8 V^0. \quad (27)$$

Тепло, воспринятое рассчитываемой поверхностью, определяется уравнением теплопередачи:

$$Q_{\Gamma} = K N \Delta t / B_p, \quad \text{кДж/кг (кДж/м}^3\text{)}, \quad (28)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт/м}^2 \text{K}$ ;

$N$  – Расчетная площадь поверхности нагрева,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta t$  – Средний температурный напор,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$B_p$  – Расчетный расход топлива,  $\text{кг/с}$ .

Расчет конвективных поверхностей нагрева может быть конструктивным и поверочным. Поверочный расчет является общим и выполняется для определения температур по тракту продуктов сгорания. В результате конструктивного расчета определяется величина поверхности нагрева, и выбираются ее конструктивные элементы.

### **5.1. Определение конструктивных характеристик и расчетной скорости продуктов сгорания**

1. Выполняется эскиз рассчитываемой конвективной поверхности нагрева и описывается ее конструкция: характер расположения труб (коридорный, шахматный), способ омывания (продольный, поперечный), диаметр и количество труб, продольный и поперечный шаги, число труб по ходу газов и т.д.

2. Рассчитывается площадь поверхности нагрева,  $\text{м}^2$ :

$$N = \pi d l z, \quad (29)$$

где  $d$  – наружный диаметр трубы,  $\text{м}$ ;

$l$  – средняя длина труб в свету,  $\text{м}$ ;

$z$  – общее число труб, расположенных в газоходе.

3. Площадь живого сечения  $F$ ,  $m^2$ , равную разности между полной площадью поперечного сечения газохода в свету и частью этой площадью, занятой трубами, рассчитывают по формулам:

$$F = av - z_1 d_H l \quad (30)$$

– при поперечном омывании гладкотрубных пучков,

$$F = av - z \pi d_H^2 / 4 \quad (31)$$

– при продольном омывании и течении среды между трубами,

$$F = z \pi d_{вн}^2 / 4 \text{ – при течении среды внутри труб,} \quad (32)$$

где  $a$  и  $v$  – поперечные размеры газохода между его внутренними стенками, м;

$z_1$  – количество труб в одном ряду поперек хода газов;

$l$  – омываемая длина труб, м.

Если в газоходе имеются участки с одинаковым характером омывания, но с различными живыми сечениями, то рассчитывается среднее живое сечение:

$$F_{cp} = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_n}{\frac{H_1}{F_1} + \frac{H_2}{F_2} + \dots + \frac{H_n}{F_n}} \quad (33)$$

4. Расчетная скорость рабочего тела определяется по формуле:

$$w = V_c / F, \quad (34)$$

где  $F$  – площадь живого сечения,  $m^2$ ;

$V_c$  – средний объемный секундный расход среды,  $m^3$ , определяемый

– для продуктов сгорания

$$V_c = B_p V_r \left( \frac{273 + \vartheta_r^{cp}}{273} \right); \quad (35)$$

– для воздуха

$$V_c = B_p V^0 \beta_{вп}'' \left( \frac{273 + \vartheta_r^{cp}}{273} \right) \quad (36)$$

где  $B_p$  – расчётный расход топлива, кг/с;

$V_r$  – объём газов в пределах рассчитываемого участка, определяемый по среднему значению коэффициента избытка воздуха,  $m^3/kg$  ( $m^3/m^3$ );

$\beta_{вп}''$  – отношение действительного количества воздуха в рассчитываемом участке воздушного тракта к теоретически необходимому

$$\beta''_{\text{вп}} = \alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{пл}}; \quad (37)$$

$\vartheta_{\text{г}}^{\text{ср}}$ ,  $\vartheta_{\text{в}}^{\text{ср}}$  – средняя температура газов и воздуха в рассчитываемом участке, вычисляется как средняя арифметическая величина в начале и в конце участка.

## 5.2. Определение коэффициента теплопередачи

Коэффициент теплопередачи  $K$  (Вт/м<sup>2</sup>К) определяется по следующим формулам:

– для поперечного омывания шахматных пучков при сжигании твёрдого топлива

$$K = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon\alpha_1}; \quad (38)$$

– в коридорных пучках при сжигании твёрдых топлив, во всех гладкотрубных пучках (шахматных и коридорных) при сжигании газа и мазута, а также во всех гладкотрубных продольно омываемых пучках при сжигании всех видов топлив

$$K = \psi \cdot \alpha_1, \quad (39)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент загрязнения (м<sup>2</sup>К/Вт), рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot C_d \cdot C_{\text{фр}} + 0,003, \quad (40)$$

где  $\varepsilon_0$  – исходный коэффициент загрязнения, определяемый по рис. 7 – 1 [1].

$C_{\text{фр}}$  – поправка на фракционный состав золы (для углей  $C_{\text{фр}} = 1$ , для торфа  $C_{\text{фр}} = 0,7$ );

$C_d$  – поправка на диаметр труб;

$\psi$  – коэффициент тепловой эффективности поверхности нагрева.

*Определение коэффициента теплоотдачи от газов к стенке  $\alpha_1$*

$$\alpha_1 = \xi(\alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}), \quad (41)$$

где  $\xi$  – коэффициент использования конвективного пучка, учитывающий уменьшение тепловосприятия поверхности нагрева вследствие неравномерного омывания её газами. Для поперечного омывания пучков  $\xi = 1$ . Для смешанно – омываемых  $\xi = 0,95$ ;

$\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>К, определяется по номограммам в зависимости от конструкции пучков, способа омывания, скорости газового потока и от физических свойств теплоносителя

$$\alpha_{\text{к}} = \alpha_{\text{н}} \cdot C_z \cdot C_s \cdot C_{\text{ф}}, \quad (42)$$

– при поперечном омывании шахматных и коридорных гладкотрубных пучков;

$$\alpha_k = \alpha_n \cdot C_1 \cdot C_\phi (C_\phi'), \quad (43)$$

– при продольном омывании;

$\alpha_n$  – номинальный коэффициент теплоотдачи, определяемый по скорости потока  $W$  и диаметру труб пучка  $d$ ;

$C_s$  – поправка на геометрию пучка, зависящая от относительного продольного  $\sigma_1 = S_1/d$  и поперечного  $\sigma_2 = S_2/d$  шагов;

$C_z$  – поправка на количество рядов труб ( $Z_2$ ) по ходу газов;

$C_1$  – поправка на относительную длину пучка  $l/d_3$ ;

$C_\phi(C_\phi')$  – поправка на физические характеристики потока при изменении температуры и состава теплоносителя.

При определении  $C_\phi$  и  $C_\phi'$  принимается среднеарифметическая температура потока в пределах рассчитываемой поверхности  $\vartheta = 0,5(\vartheta' + \vartheta'')$ .

$\alpha_{л}$  – коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания, учитывается при температуре газового потока выше  $350^\circ\text{C}$ . Рассчитывается по формуле:

$\alpha_{л} = \alpha_n \cdot a$  – при пылеугольном сжигании;

$\alpha_{л} = \alpha_n \cdot a \cdot C_r$  – при сжигании газа и мазута и при слоевом сжигании топлива;

$\alpha_n$  – номинальная величина коэффициента теплоотдачи излучением,  $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$ , зависящий от температуры стенки и средней температуры газового потока;

$C_r$  – поправка, вводимая в случае отсутствия золовых частиц в продуктах сгорания,

$t_{ст}$  – средняя температура загрязнённой стенки,  $^\circ\text{C}$

$$t_{ст} = t_{cp} + \Delta t, \quad (44)$$

$t_{cp}$  – средняя температура среды, протекающей в трубах,  $^\circ\text{C}$ ;

$\Delta t$  – температурный перепад между температурой загрязнённой стенки и температурой среды в трубе,  $^\circ\text{C}$ , значение которого зависит от вида сжигаемого топлива, типа поверхности нагрева и температуры газового потока.

При сжигании газа для всех поверхностей нагрева  $\Delta t = 25^\circ\text{C}$ . При сжигании твёрдых и жидких топлив для фестона  $\Delta t = 80^\circ\text{C}$ , для конвективных пакетов  $\Delta t = 60^\circ\text{C}$ .

$a$  – степень черноты излучающей среды, определяется по формуле  $a = 1 - e^{-KPS}$ , или по номограмме.

### 5.3. Определение температурного напора

Температурный напор – есть средняя по всей поверхности нагрева разность температур сред, участвующих в теплообмене. Для прямотока и противотока, а также при постоянстве температуры одной из сред температурный напор определяется

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \Delta t_{\text{б}} / \Delta t_{\text{м}}}, \quad (45)$$

где  $\Delta t_{\text{б}}$  – разность температуры продуктов сгорания и температуры нагреваемой жидкости на том конце поверхности нагрева, где она наибольшая;

$\Delta t_{\text{м}}$  – разность температур сред на том конце поверхности нагрева, где она наименьшая, °С.

В тех случаях, когда  $\Delta t_{\text{б}} / \Delta t_{\text{м}} \leq 1,7$ , температурный напор можно считать с достаточной степенью точности по формуле

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}}{2}. \quad (46)$$

Для сложных схем включения поверхностей нагрева при меняющихся значениях температур сред, температурный напор определяют по соответствующим номограммам нормативного метода.

#### **5.4. Рекомендации к расчёту конвективных поверхностей водогрейных котлов**

Целью поверочного расчёта, как выше указывалось, является определение температуры на выходе из рассчитываемого участка. Температура на входе  $\vartheta'$  известна из расчёта предыдущей поверхности.

Расчёт конвективных поверхностей нагрева выполняют совместным решением 2-х уравнений – уравнения теплового потока от газов к рассчитываемой поверхности  $Q_{\text{г}}$  и уравнения теплопередачи  $Q_{\text{т}}$  методом последовательных приближений. Для решения указанных уравнений предварительно задаются искомой температурой  $\vartheta''$  на выходе из рассчитываемого участка. Её можно принять, исходя из рекомендуемого значения температурного перепада газового потока  $\Delta\vartheta = \vartheta' - \vartheta''$ :

- для фестона с количеством рядов труб не больше трёх  $\Delta\vartheta = 20 \div 60$  °С;
- больше трёх  $\Delta\vartheta = 40 \div 100$  °С;
- для конвективных пакетов –  $\Delta\vartheta = 500 \div 700$  °С.

Правильность расчёта оценивают по величине расхождения процента тепловосприятий, определяемых по формуле (26) и (27)

$$\Delta Q = \frac{Q_{\text{г}} - Q_{\text{т}}}{Q_{\text{г}}} \cdot 100\%.$$

Если расхождение не превышает 2% для конвективных ширм и 5% для фестона, то расчет считается выполненным правильно. При больших расхождениях принимают новое значение температуры на выходе из рассчитываемой поверхности и расчет повторяют.



Если при повторном расчете расхождение будет больше требуемой величины, можно применить графический метод линейной интерполяции согласно рис. 3.

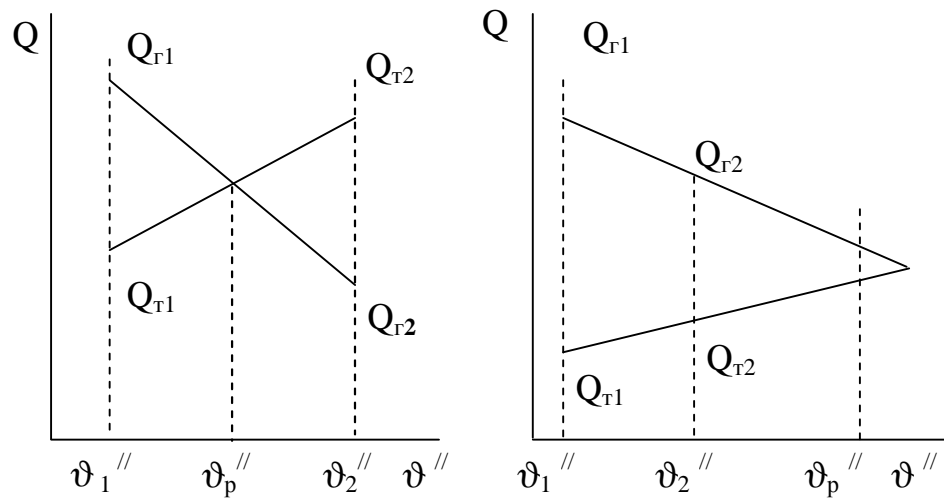


Рис.3. Графическое определение температуры газов на выходе из рассчитываемой поверхности

## 6. РАСЧЕТ ФЕСТОНА

Большинство водогрейных котлов имеет фестон, который служит для уменьшения аэродинамического сопротивления потока на входе в конвективную шахту.

Фестон является первой конвективной поверхностью по ходу газов и для котлов серии КВ – ГМ и КВ – ТС расположен в нижней части конвективной шахты. Фестон образуется разведением экранных труб задней стенки топки (передней стенки конвективной шахты) в четырехрядный шахматный пучок труб диаметром 60 мм с шагами  $S_1 = 256$  мм и  $S_2 = 180$  мм.

Расчет фестона ведется в табличной форме.

Таблица 8

### Поверочный расчет фестона

№ п/п	Наименование определяемой величины	Обозначение	Ед. изм.	Расчетная формула или способ определения	Результат
1	2	3	4	5	6
1	Наружный диаметр труб	d	м	По чертежу	
2	Количество труб в ряду	$z_1$	шт.	По чертежу	

Продолжение табл.8

1	2	3	4	5	6
3	Количество рядов труб	$z_2$	шт.	По чертежу	
4	Общее количество труб	$z$	шт.	По чертежу	
5	Средняя длина трубы	$l_{cp}$	м	По чертежу	
6	Расчетная площадь поверхности нагрева	$H$	$м^2$	$\pi d l_{cp} z$	
7	Характер расположения труб			Конструктивно	
8	Шаги труб – поперек хода газов – по ходу газов	$S_1$ $S_2$	мм мм	Конструктивно	
8	Относительные шаги – поперечный – продольный	$\sigma_1$ $\sigma_2$		$S_1/d$ $S_2/d$	
10	Размеры се газохода поперек движения газов	$A$ $B$	м м	По чертежу и схеме фестона	
11	Длина проекции трубы	$l_{пр}$	м	По чертежу	
12	Площадь живого сечения для прохода газов	$F$	$м^2$	$AB - l_{пр} dz_1$	
13	Температура газов перед фестоном	$\vartheta_{\phi}'$	$^{\circ}C$	Из расчета топки	
14	Энтальпия газов перед фестоном	$I_{\phi}'$	$\frac{кДж}{кг}$	Из расчета топки	
15	Температура газов за фестоном	$\vartheta_{\phi}''$	$^{\circ}C$	По предварительному выбору	
16	Энтальпия газов перед фестоном	$I_{\phi}'$	$\frac{кДж}{кг}$	По табл.5	

Продолжение табл.8

1	2	3	4	5	6
17	Количество теплоты, отданное фестону	$Q_{\Gamma}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\varphi(I_{\phi}' - I_{\phi}'' + \Delta\alpha I_{xв})$	
18	Средняя температура газов	$\vartheta_{cp}$	$^{\circ}\text{C}$	$0,5(\vartheta_{\phi}' + \vartheta_{\phi}'')$	
19	Теплопроизводительность котла	$N$	мВт	По заданию	
20	Температура воды – на входе – на выходе	$t$ $t''$	$^{\circ}\text{C}$	По заданию	
21	Расход воды через котел	$G_{\kappa}$	кг/с	$\frac{10^3 N}{4,18(t'' - t')}$	
22	Нагрев воды в экранах топки	$\Delta t_{\text{л}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{Q_{\text{л}}^{\text{т}} B_{\text{п}}}{4,18 G_{\kappa}}$	
23	Температура воды на входе в фестон	$t_{\phi}'$	$^{\circ}\text{C}$	$t' + \Delta t_{\text{л}}$	
24	Температура воды на выходе из фестона	$t_{\phi}''$	$^{\circ}\text{C}$	$t_{\phi}' + \frac{Q_{\Gamma} B_{\text{п}}}{4,18 G_{\kappa}}$	
25	Средняя температура воды в фестоне	$t_{\phi}^{\text{cp}}$	$^{\circ}\text{C}$	$0,5(t_{\phi}' + t_{\phi}'')$	
26	Температурный напор на входе в фестон	$\Delta t_{\phi}$	$^{\circ}\text{C}$	$\vartheta_{\phi}' - t_{\phi}^{\text{cp}}$	
27	Температурный напор на выходе из фестона	$\Delta t_{\text{м}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\vartheta_{\phi}'' - t_{\phi}^{\text{cp}}$	
28	Среднелогарифмический температурный напор	$\Delta t_{\text{cp}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{\Delta t_{\phi} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\phi}}{\Delta t_{\text{м}}}}$	
29	Секундный объем газов	$V_{\text{с}}$	$\text{м}^3/\text{с}$	$B_{\text{п}} V_{\Gamma} \left( \frac{273 + \vartheta_{\phi}^{\text{cp}}}{273} \right)$	
30	Расчетная скорость газов	$w$	м/с	$V_{\text{с}} / F$	

Продолжение табл.8

1	2	3	4	5	6
31	Коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha_k$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	П. 5.2.1 номограмма 13 [1]	
32	Толщина излучающего слоя	S	м	$0,9d\left(\frac{4S_1S_2}{\pi d^2} - 1\right)$	
33	Коэффициент ослабления лучей трехатомными газами	$K_r$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	Номограмма 3 [1]	
34	Суммарная поглощательная способность трёхатомных газов	$P \cdot K \cdot S$	м · МПа	$p \cdot r_H \cdot S$	
35	Концентрация золы в газовом потоке	$\mu_3$	г/м <sup>3</sup>	$\frac{10 \cdot A_p \cdot \alpha_{yH}}{V_r}$	
36	Коэффициент ослабления лучей золовыми частицами (только для твёрдого топлива)	$K_3$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	Номограмма 4 [1]	
37	Суммарная оптическая толщина запылённого газового потока	KPS		$(K_r \cdot r_r + K_3 \cdot \mu_3) \cdot P \cdot S$	
38	Степень черноты излучающей среды	a		Номограмма 2 [1]	
39	Температура загрязненной стенки труб	$t_3$	°С	$t_{cp} + \Delta t$	
40	Коэффициент теплоотдачи излучением		$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	П. 5 номограмма 19 [1]	
41	Коэффициент использования поверхности нагрева	$\xi$		Для фестонов $\xi = 1$ табл. 7–1 [1]	
42	Коэффициент теплоотдачи от газов стенке	$\alpha_1$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	$\xi(\alpha_k + \alpha_l)$	
43	Коэффициент тепловой эффективности	$\Psi$		Табл. 7	

Окончание табл. 8					
1	2	3	4	5	6
44	Коэффициент загрязнения	$\varepsilon$		Формула (39)	
45	Коэффициент теплопередачи	K	$\frac{Вт}{м^2К}$	Формула (37) или (38)	
46	Тепловосприятие по уравнению теплопередачи	$Q_T$	$\frac{Вт}{м^2К}$	Формула (27)	
47	Расхождение расчетных тепловосприятий	$\Delta Q$	%	$\frac{Q_T - Q_r}{Q_T} \cdot 100$	

## 7. РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНЫХ ПУЧКОВ

Конвективная поверхность нагрева водогрейных котлов представляет собой U – образные ширмы из змеевиков диаметром 28 \* 3 мм, собранные в один или два пакета. Змеевики привариваются в два ряда к каждому стояку и образуют шахматный пучок с шагами  $S_1 = 64$  и  $S_2 = 40$  мм.

Поверочный расчет конвективных ширм ведется в табличной форме.

Таблица 9

### Поверочный расчет конвективных ширм

№ п/п	Наименование определяемой величины	Обозначение	Ед. изм.	Расчетная формула или способ определения	Результат
1	2	3	4	5	6
<b>Боковые стены конвективной шахты</b>					
1	Количество стояков	$z_{ст}$	шт.	По чертежу	
2	Диаметр труб стояков	$d_{ст}$	м	По чертежу	
3	Длина труб стояков	$l_{ст}$	м	По чертежу	
4	Расчетная площадь поверхности нагрева	$H_{ст} м^2$		$0,5 \pi d_{ст} z_{ст}$	
<b>Конвективные ширмы</b>					
5	Наружный диаметр труб	$d$		По чертежу	

Продолжение табл. 9

1	2	3	4	5	6
6	Шаги труб	$S_1$ $S_2$	мм мм	Конструктивно	
7	Относительные шаги	$\sigma_1$ $\sigma_2$		$S_1/d$ $S_2/d$	
8	Количество ширм по ширине газохода	$z_1$	шт.	$2 z_{ст}$	
9	Количество пакетов в газоходе	$n$	шт	По конструкции котла	
10	Количество петель в ширме	$z_{пет}$	шт	По чертежу	
11	Количество рядов труб	$z_2$	шт.	$4 n z_{пет}$	
12	Длина ширмы	$l_{ш}$	м	По чертежу	
13	Длина трубы поперек газохода	$l_{п}$	м	По чертежу	
14	Поверхность нагрева ширмы	$H_{ш}$	$м^2$	$\pi d l_{ш}$	
15	Поверхность нагрева конвективных пакетов	$H_{кп}$	$м^2$	$H_{ш} z_1 n$	
16	Количество труб задней и передней стены	$z_{1ст}$	шт	Конструктивно	
17	Длина труб	$l_1$	м	Конструктивно	
18	Поверхность нагрева стен	$H_1$	$м^2$	$0,5 \pi d_1 l_1 z_{1ст}$	
19	Суммарная поверхность нагрева пучка	$H$	$м^2$	$H_{кп} + H_{ст} + H_1$	
20	Размеры се газохода поперек движения газов	$A$ $B$	м м	По чертежу	
21	Живое сечение газохода	$F$	$м^2$	$AB - d l_{п} z_{ст} - 0,5 d_{ст}^2 z_{ст} - 0,5 d^2 z_{1ст}$	
22	Температура газов перед конвективным пучком (КП)	$\vartheta_{кп} /$	$^{\circ}C$	Из расчета фестона	
23	Энтальпия газов перед КП	$I_{кп} /$	$\frac{кДж}{кг}$	Из расчета фестона	
24	Температура газов за КП	$\vartheta_{кп} //$	$^{\circ}C$	Согласно тепловой схеме котла	

Продолжение табл. 9

1	2	3	4	5	6
25	Энтальпия газов за КП	$I_{\text{кп}}^{\prime}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По табл. 3	
26	Количество теплоты, отданное фестоу	$Q_{\text{г}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\varphi(I_{\text{кп}}^{\prime} - I_{\text{кп}}^{\prime\prime} + \Delta\alpha I_{\text{х в}})$	
27	Средняя температура газов	$\vartheta_{\text{ср}}$	$^{\circ}\text{C}$	$0,5(\vartheta_{\text{ф}}^{\prime} + \vartheta_{\text{ф}}^{\prime\prime})$	
28	Температура воды на входе в КП	$t_{\text{кп}}^{\prime\prime}$	$^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\prime\prime}$	
29	Температура воды на выходе из КП	$t_{\text{кп}}^{\prime\prime}$	$^{\circ}\text{C}$	По заданию	
30	Средняя температура воды в КП	$t_{\text{кп}}^{\text{ср}}$	$^{\circ}\text{C}$	$0,5(t_{\text{кп}}^{\prime} + t_{\text{кп}}^{\prime\prime})$	
31	Температурный напор на входе в КП.	$\Delta t_{\text{б}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\vartheta_{\text{кп}}^{\prime} - t_{\text{кп}}^{\text{ср}}$	
32	Температурный напор на выходе из КП.	$\Delta t_{\text{м}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\vartheta_{\text{кп}}^{\prime\prime} - t_{\text{кп}}^{\text{ср}}$	
33	Среднелогарифмический температурный напор	$\Delta t_{\text{ср}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,31\lg \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}$	
34	Секундный объем газов	$V_{\text{с}}$	$\text{м}^3/\text{с}$	$V_{\text{р}} V_{\text{г}} \left( \frac{273 + \vartheta_{\text{кп}}^{\text{ср}}}{273} \right)$	
35	Расчетная скорость газов	$w$	$\text{м}/\text{с}$	$V_{\text{с}} / F$	
36	Коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha_{\text{к}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	Номограмма 13 [1]	
37	Толщина излучающего слоя	$S$	$\text{м}$	$0,9d \left( \frac{4S_1 S_2}{\pi d^2} - 1 \right)$	
38	Коэффициент ослабления лучей трехатомными газами	$\kappa_{\text{г}}$	$\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$	Номограмма 3[1]	

1	2	3	4	5	6
39	Суммарная поглоща- тельная способность трёхатомных газов	$P \cdot K \cdot S$	МПа	$p \cdot r_H \cdot S$	
40	Концентрация золы в га- зовом потоке (для газа и мазута $\mu_3=0$ )	$\mu_3$	г/м <sup>3</sup>	$\frac{10 \cdot A_p \cdot d_{yn}}{V_r}$	
41	Коэффициент ослабле- ния лучей золовыми час- тицами (только для твёрдого топлива)	$K_3$	$\frac{1}{m \cdot \text{МПа}}$	Номограмма 4 [1]	
42	Суммарная оптическая толщина запылённого газового потока	$KPS$		$(K_r \cdot r_r + K_3 \cdot \mu_3) \cdot P \cdot S$	
43	Степень черноты излу- чающей среды	$a$		Номограмма 2 [1]	
44	Температура загрязнен- ной стенки труб	$t_3$	°С	$t_{cp} + \Delta t$	
45	Коэффициент теплоот- дачи излучением	$\alpha_L$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	номограмма 19 [1]	
46	Коэффициент использо- вания пов. нагрева	$\xi$		$\xi = 0,95$ табл. 7	
47	Коэффициент теплоот- дачи от газов стенке	$\alpha_1$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	$\xi (\alpha_k + \alpha_L)$	
48	Коэффициент тепловой эффективности	$\Psi$		Табл. 7, табл. 6	
49	Коэффициент загрязне- ния	$\varepsilon$		Формула (39)	
51	Коэффициент теплопе- редачи	$K$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	Формула (37) или (38)	
52	Тепловосприятие по уравнению теплопереда- чи	$Q_T$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	Формула (27)	
53	Расхождение расчетных теповосприятий	$\Delta Q$	%	$\frac{Q_r - Q_{r_1}}{Q_r} \cdot 100$	



## 8. РАСЧЁТ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Воздухоподогреватель служит для повышения экономичности котлоагрегата и интенсификации процесса сжигания. Водогрейные котлы, сжигающие высоко-влажные бурые угли, имеют воздухоподогреватели.

В выпускаемой серии водогрейных котлов КВ – ТСВ применяются трубчатые воздухоподогреватели одноходовые по воздуху и газам с диаметром труб  $\varnothing 40 \times 1,6$ . Трубы расположены вертикально в шахматном порядке с шагами  $S_1 = 60$  мм,  $S_2 = 42$  мм. Воздухоподогреватель является последней конвективной поверхностью нагрева по ходу газов и располагается в вертикальной шахте, при общей П – образной компоновке водогрейного котла. Воздухоподогреватель работает по схеме продольного омывания труб газами и поперечного омывания воздухом.

Температура воздуха на входе в воздухоподогреватель  $t_{вп}^{\prime}$  выбирается в зависимости от вида топлива в соответствии с табл. 10 из условия отсутствия конденсации водяных паров на поверхности нагрева.

Таблица 10

Температура воздуха на входе в воздухоподогреватель

№ п/п	Топливо	$t_{вп}^{\prime}, ^\circ\text{C}$
1	Сухое $W^{\text{п}} \leq 3$	30
2	Влажное $W^{\text{п}} = 4 \div 20$	45 ÷ 55
3	Сильновлажное $W^{\text{п}} > 20$	60 ÷ 70
4	Природный газ	30
5	Мазут малосернистый $S^{\text{п}} \leq 0,5\%$	30
6	Мазут сернистый $S^{\text{п}} = 0,5 \div 20\%$	50 ÷ 70
7	Мазут высокосернистый $S^{\text{п}} > 20\%$	80 ÷ 100

**Примечание:** подогрев воздуха до  $t_{вп}^{\prime}$  учитывается от уровня  $t_{хв} = 30$  °С. Подогрев до 60 ÷ 70 °С может осуществляться за счёт рециркуляции горячего воздуха, более высокий подогрев – в паровых или водяных калориферах.

Расчет воздухоподогревателя ведется в табличной форме.

Таблица 11

Расчет воздухоподогревателя.

№ п/п	Наименование определяемой величины	Обозначение	Ед. изм.	Расчетная формула или способ определения	Результат
1	2	3	4	5	6
1	Диаметр труб: наружный внутренний средний	$d$ $d_{вн}$ $d_{ср}$	мм мм мм	$0,5(d + d_{вн})$	

1	2	3	4	5	6
2	Шаги труб: поперечный продольный	$S_1$ $S_2$	мм мм	Конструктивно	
3	Относительные шаги	$\sigma_1$ $\sigma_2$		$S_1/d$ $S_2/d$	
4	Эквивалентный диаметр	$d_3$	мм	$d_3 = d_{вн}$	
5	Температура воз- духа на входе в воздухоподогрева- тель	$t_{вп} /$	°С	В зависимости от вида топлива табл. 10	
6	Энтальпия воздуха на входе ввозду- хоподогреватель	$I_{вп}^0 /$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По I – $\vartheta$ диагр. или по формуле $I_{вп}^0 / = V_c^0 C' t'$	
7	Температура воз- духа на выходе из воздухоподогрева- теля	$t_{вп}''$	°С	Табл. 2	
8	Энтальпия воздуха на выходе из воз- духоподогревателя	$I_{вп}^{0''}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	По I – $\vartheta$ диагр. или по формуле $I_{вп}^{0''} = V^0 C'' t''$	
9	Коэффициент из- бытка воздуха на выходе из возду- хоподогревателя	$\beta_{вп}''$		$\alpha_t - \Delta\alpha_t + \Delta\alpha_{пл}$	
10	Доля рециркули- рующего воздуха (в случае наличия рециркуляции)	$\beta_{рц}$		$(\beta_{вп}'' + \Delta\alpha_{вп}) \frac{t' - t_{хв}}{t'' - t'}$	
11	Количество тепло- ты, полученное воздухом	$Q_{вп}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\left( \beta_{вп}'' + \frac{\Delta\alpha_{вп}}{2} + \beta_{рц} \right) (I_{вп}^{0''} - I_{вп}^{0'})$	
12	Коэффициент со- хранения тепла	$\varphi$		Из табл. 4	
13	Энтальпия и тем- пература газов на входе в воздухо- подогреватель	$I_{вп} /$ $\vartheta_{вп} /$	°С	Из расчёта предыдущей поверхности	

1	2	3	4	5	6
14	Энтальпия присасываемого воздуха	$I_{\text{прс}}^0$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$V_0 \cdot C \cdot \frac{t'_{\text{вп}} + t''_{\text{вп}}}{2}$	
15	Энтальпия газов на выходе из воздухоподогревателя	$I_{\text{вп}}''$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$I_{\text{вп}}' - Q_{\text{вп}}/\varphi + \Delta\alpha_{\text{вп}} \cdot I_{\text{прс}}^0$	
16	Температура газов на выходе из воздухоподогревателя	$\vartheta_{\text{вп}}''$	$^{\circ}\text{C}$	По I – $\vartheta$ диаграмме	
17	Температурный напор на горячем конце воздухоподогревателя	$\Delta t_{\text{м}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\vartheta_{\text{вп}}' - t_{\text{вп}}''$	
18	Средняя температура газов	$\vartheta_{\text{ср}}$	$^{\circ}\text{C}$	$0,5 (\vartheta_{\text{кп}}' + \vartheta_{\text{кп}}'')$	
19	Средняя скорость газов	$w_{\text{г}}$	м/с	Принимается предварительно	
20	Средний объём газов	$V_{\text{г}}$	$\text{м}^3/\text{кг}$	Табл. 3	
21	Площадь живого сечения труб для прохода газов	$F_{\text{г}}$	$\text{м}^2$	$\frac{V_{\text{п}} \cdot V_{\text{г}} \cdot (273 + \vartheta)}{w_{\text{г}} \cdot 273}$	
22	Коэффициент теплоотдачи с газовой стороны	$\alpha_1$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	$C_{\text{ф}} \cdot C_1 \cdot \alpha_{\text{н}}$	
23	Средняя температура воздуха	$t_{\text{вп}}$	$^{\circ}\text{C}$	$0,5(t_{\text{вп}}' + t_{\text{вп}}'')$	
24	Средняя скорость воздуха	$w_{\text{в}}$	м/с	Принимается из условия: $w_{\text{в}} = 0,5 \cdot w_{\text{г}}$	
25	Площадь живого сечения для прохода воздуха	$F_{\text{в}}$	$\text{м}^2$	$\frac{V_{\text{п}} \cdot V^0 \cdot (\beta'' + \frac{\Delta\alpha}{2} + \beta_{\text{рц}})(t_{\text{вп}} + 273)}{w_{\text{г}} \cdot 273}$	
26	Коэффициент теплоотдачи с воздушной стороны	$\alpha_2$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	$\alpha_2 = \alpha_{\text{к}}$	

1	2	3	4	5	6
27	Коэффициент использования воздухоподогревателя	$\xi_{\text{ВП}}$		Табл.7	
28	Коэффициент теплопередачи	K	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	$\xi_{\text{ВП}} \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$	
29	Разность температур между средами: наибольшая наименьшая	$\Delta t_{\text{б}}$ $\Delta t_{\text{м}}$	$^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$	$\vartheta_{\text{ВП}}^{\prime\prime} - t_{\text{ВП}}^{\prime}$ $\vartheta_{\text{ВП}}^{\prime} - t_{\text{ВП}}^{\prime\prime}$ (см.п.17)	
30	Средний температурный напор при противотоке	$\Delta t_{\text{прт}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,31\text{lg} \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}$	
31	Перепад температур: наибольший наименьший	$\tau_{\text{б}}$ $\tau_{\text{м}}$	$^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{ВП}}^{\prime\prime} - t_{\text{ВП}}^{\prime}$ $\vartheta_{\text{ВП}}^{\prime\prime} - \vartheta_{\text{ВП}}^{\prime}$	
32	Безразмерный параметр	P		$\tau_{\text{м}} / (\vartheta_{\text{ВП}}^{\prime} - t_{\text{ВП}}^{\prime})$	
33	Безразмерный параметр	R		$\tau_{\text{б}} / \tau_{\text{м}}$	
34	Коэффициент пересчёта от противоточной схемы к перекрёстной	$\psi$	$^{\circ}\text{C}$	Номограмма 31 [1]	
35	Температурный напор	$\Delta t_{\text{ВП}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\psi \cdot \Delta t_{\text{прт}}$	
36	Поверхность нагрева	H	$\text{м}^2$	$\frac{Q_{\text{ВП}} \cdot B_{\text{р}} \cdot 10^3}{K \cdot \Delta t}$	
37	Общее число труб для прохода газов	Z	шт.	$\frac{4 \cdot F_{\text{г}} \cdot 10^6}{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}$	
38	Длина труб (высота шахты воздухоподогревателя)	L	м	$\frac{H \cdot 10^3}{\pi \cdot d_{\text{ср}} \cdot Z}$	
39	Число рядов труб поперёк хода воздуха (по глубине)	$Z_1$	шт.	$\frac{F_{\text{г}} \cdot 10^3}{(S_1 - d) \cdot L}$	

1	2	3	4	5	6
40	Число рядов по ходу воздуха	$Z_2$	шт.	$Z/Z_1$	
41	Глубина шахты	$b$	м	$S_1 \cdot (Z_1 - 1) + d$	
42	Ширина шахты воздухоподогревателя			$S_2 \cdot (Z_2 - 1) + d$	

### 9. СВОДНАЯ ТАБЛИЦА ТЕПЛООВОГО РАСЧЁТА И РАСЧЁТНАЯ НЕВЯЗКА ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА

В результате теплового расчёта водогрейного котла определяют температуру уходящих газов, а при наличии воздухоподогревателя – и температуру горячего воздуха.

Если расчётная температура уходящих газов отличается от принятой в начале расчёта не более чем на  $\pm 10$  °С, а температура горячего воздуха – не более чем на  $\pm 40$  °С, то расчёт теплообмена в котле считается законченным, а найденные температуры – окончательными.

По расчётной температуре уходящих газов  $\vartheta_{yx}$  уточняют потерю теплоты с уходящими газами  $q_2$ , КПД котла  $\eta_{ка}$  и расход топлива  $V_p$ . Далее, по расчётному значению температуры горячего воздуха уточняют полезное тепловыделение в топке  $Q_{пт}$  и тепловосприятие лучевоспринимающих поверхностей топки  $Q_{т}^л$ .

После уточнения балансовых величин составляют сводную таблицу теплового расчёта котла (табл. 12). По данным этой таблицы находят расчётную невязку теплового баланса котла, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>),

$$\Delta Q = Q_p^p \cdot \eta_{ка} - (Q_{т}^л + Q_{ф} + Q_{кп} + Q_{эк}) \cdot (1 - q_4/100),$$

где  $Q_{т}^л, Q_{ф}, Q_{кп}, Q_{эк}$  – количество теплоты, воспринимаемое поверхностями нагрева топки, фестона, конвективных пакетов и экономайзера (при наличии). Значение невязки при правильно выполненном расчёте не должно превышать 0,5% от  $Q_p^p$ .

Сводная таблица теплового расчёта котла

№ п/п	Наименование	Обозначение	Ед. изм.	Величина
Тепловой баланс				
1	Располагаемая теплота топлива	$Q_p^p$	кДж/кг	
2	Температура уходящих газов	$\vartheta_{yx}$	°С	
3	Потеря теплоты с уходящими газами	$q_2$	%	
4	КПД котла	$\eta_{ка}$	%	
5	Расход топлива	$B$	кг/с (м <sup>3</sup> /с)	
Топка				
6	Температура подогрева воздуха	$t_{г.в}$	°С	
7	Теплота, вносимая воздухом	$Q_в$	кДж/кг	
8	Полезное тепловыделение	$Q_{пт}$	кДж/кг	
9	Температура газов на выходе	$\vartheta_T''$	°С	
10	Тепловосприятие топки	$Q_T^п$	кДж/кг	
11	Энтальпия газов на выходе	$I_T''$	кДж/кг	
Конвективные поверхности нагрева (составляется отдельно для каждой поверхности нагрева)				
12	Температура газов на входе	$\vartheta_i'$	°С	
13	Температура газов на выходе	$\vartheta_i''$	°С	
14	Энтальпия газов на входе	$I_i'$	кДж/кг	
15	Энтальпия газов на выходе	$I_i''$	кДж/кг	
16	Тепловосприятие поверхности нагрева	$Q_i$	кДж/кг	

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бузников Е.Ф. Роддатис К.Ф. Производственные и отопительные котельные. – М.: Энергия, 1984. – 230 с.
2. Гусев Ю.Л. Основы проектирования котельных установок. – М.: Стройиздат, 1973. – 248 с.
3. Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б.А. Теплогенерирующие установки. – М.: Стройиздат, 1986. – 560 с.
4. Котлы малой и средней мощности и топочные устройства. Каталог-справочник. – М.: НИИЭ ИНФОРМЭНЕРГОМАШ, 1983. – 200 с.
5. Либерман Н.Б., Няньковская М.Т. Справочник по проектированию котельных установок систем централизованного теплоснабжения. – М.: Энергия, 1979. – 224с.
6. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. – М.: Энергия, 1973. – 295с.
7. Частухин В.И. Тепловой расчет промышленных парогенераторов. – Киев: Вища школа, 1980. – 184 с.
8. Эстеркин Р.И. Котельные установки: курсовое и дипломное проектирование. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 279 с.
9. Хмельницкий П.Е., Ершова М.И. Тепловой расчет теплогенератора. – Новосибирск: НГАСУ, 2002. – 54 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ.....	3
1.1. Исходные данные.....	4
1.2. Рекомендации к выполнению работы.....	4
2. ТОПЛИВО. ВОЗДУХ. ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ.....	6
2.1. Основные характеристики топлива.....	6
2.2. Выбор коэффициента избытка воздуха и присосов в газоходах котельного агрегата.....	6
2.3. Расчёт объёмов воздуха и продуктов сгорания топлива.....	8
2.4. Энтальпия воздуха и продуктов сгорания.....	9
3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОТЛОАГРЕГАТА.....	10
3.1. Располагаемая теплота топлива.....	10
3.2. Статьи теплового баланса и КПД котлоагрегата.....	10
4. РАСЧЕТ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ.....	12
4.1. Основные конструктивные и тепловые характеристики топки.....	12
4.2. Полная и лучевоспринимающая поверхность топки.....	12
4.3. Расчет теплообмена в топке.....	16
5. РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА.....	20
5.1. Определение конструктивных характеристик и расчетной скорости продуктов сгорания.....	21
5.2. Определение коэффициента теплопередачи.....	23
5.3. Определение температурного напора.....	24
5.4. Рекомендации к расчёту конвективных поверхностей водогрейных котлов.....	25
6. РАСЧЕТ ФЕСТОНА.....	26
7. РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНЫХ ПУЧКОВ.....	30
8. РАСЧЁТ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ.....	34
9. СВОДНАЯ ТАБЛИЦА ТЕПЛООВОГО РАСЧЁТА И РАСЧЁТНАЯ НЕВЯЗКА ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА.....	38
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	40



