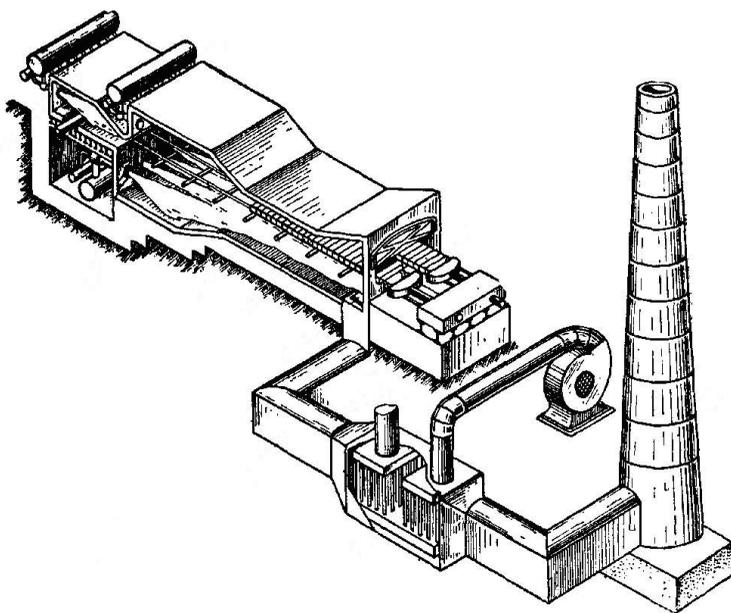


**А.В. Бараков В.Ю. Дубанин А.А. Надеев**

# **ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ**

**Учебное пособие**



**Воронеж 2017**

ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный технический  
университет»

А.В. Бараков В.Ю. Дубанин А.А. Надеев

## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Утверждено учебно-методическим советом  
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2017

Бараков А.В. Тепловой расчёт методической печи: учеб. пособие / А.В. Бараков, В.Ю. Дубанин, А.А. Надеев. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. 109 с.

В учебном пособии приведена методика теплового расчёта нагревательных печей непрерывного действия, основанная на современных достижениях науки и техники. Даны расчёты теплоутилизирующих устройств.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика»), дисциплине «Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки».

Пособие может быть полезно студентам специальностей технического профиля для выполнения курсового проекта, а также студентам неэнергетических специальностей при изучении дисциплины «Теплотехника».

Табл. 11. Ил. 25. Библиогр.: 9 назв.

Рецензенты: кафедра электротехники, теплотехники и гидравлики Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (зав. кафедрой д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник О.Р. Дорняк); д-р техн. наук, проф. Н.В. Мозговой

© Бараков А.В., Дубанин В.Ю.,  
Надеев А.А., 2017

© Оформление. ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный  
технический университет», 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Методические нагревательные печи непрерывного действия предназначены для нагрева металла перед обработкой давлением. В этих печах нагревают слитки для сортовых прокатных станов толщиной от 60 до 400 мм, шириной от 60 до 400 мм и длиной от 1 до 12 м, для листовых прокатных станов толщиной от 90 до 350 мм, шириной от 400 до 2000 мм и длиной от 1 до 12 м, для трубопрокатных станов - круглую заготовку диаметром от 40 до 600 мм и длиной от 1 до 12 м. Величина температуры нагрева для каждого конкретного случая задаётся технологией прокатки и характеристиками прокатного стана и составляет от 1150 до 1250 °С. Неравномерность нагрева заготовки по сечению зависит от вида стали и условий её прокатки и составляет от 15 до 20 °С на 100 мм расчётной толщины нагреваемого слитка.

Наряду с тепловым и температурным режимами работы большое значение для работы этих печей имеет способ транспортировки металла вдоль рабочего пространства печи. По этому признаку нагревательные печи непрерывного действия делятся на толкательные, с роликовым подом и с шагающими балками. Последние представляют собой более совершенную и перспективную конструкцию, однако капитальные затраты на их сооружение на 40...50 % выше, чем для толкательных печей аналогичной производительности.

При выполнении конструктивного теплового расчёта печи данного типа обычно задано начальное и конечное температурные состояние металла и производительность печи. Требуется определить продолжительность тепловой обработки и размеры рабочего пространства печного агрегата. Расчёт производят в следующей последовательности:

- составляется материальный и тепловой баланс процесса горения топлива, определяется действительная температура горения топлива;

- строится температурный график печи и выбирается профиль её рабочего пространства;
- определяется время нагрева металла, основные размеры печи и напряжённость пода;
- составляется тепловой баланс печи и определяется расход топлива;
- выполняется конструктивный или поверочный тепловой расчёт теплоутилизационного устройства (воздухоподогревателя или котла-утилизатора).

# 1. РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Для достижения необходимой температуры в печи калориметрическая температура горения топлива должна составлять более 1800°C и может быть достигнута при использовании:

- высококалорийного топлива с теплотой сгорания выше 12570 кДж/м<sup>3</sup> без предварительного подогрева топлива и воздуха;

- газообразного топлива с теплотой сгорания не менее 8400 кДж/м<sup>3</sup> с предварительным подогревом воздуха до температуры 450...500°C;

- топлива с теплотой сгорания от 5000 до 5800 кДж/м<sup>3</sup> с подогревом топлива до температуры 250...300 °С и воздуха до 450...500°C.

Основные виды газообразных топлив, используемых в нагревательных печах непрерывного действия, приведены в приложениях 1-3 [1].

## 1.1. Материальный баланс процесса горения

К основным параметрам процесса полного сгорания органического топлива относятся теоретический и действительный расходы воздуха, теоретический и действительный выход и состав продукта сгорания и коэффициент избытка воздуха. Расход окислителя и выход продуктов сгорания определяется в кубических метрах, отнесённых к нормальным условиям ( $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $P = 0,1013$  МПа) и вычисляются из стехиометрических уравнений горения [2, 3]:

- теоретический расход воздуха

$$V_g^o = 0,0476 \cdot [0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2], \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (1.1)$$

где  $m$  и  $n$  – число атомов углерода и водорода в молекуле углеводорода;

- действительный расход воздуха

$$V_g = \alpha V_g^o, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (1.2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха. По данным, приведённым в работе [2], при сжигании газообразных топлив в зависимости от типа горелочного устройства оптимальное значение коэффициента избытка воздуха находится в пределах от 1,05 до 1,15;

- выход трёхатомных газов

$$V_{RO_2}^o = 0,01(CO_2 + CO + H_2S + \sum m C_m H_n), \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (1.3)$$

- теоретический выход азота

$$V_{N_2}^o = 0,79V_g^o + 0,01N^p, \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (1.4)$$

- теоретический выход водяных паров

$$V_{H_2O}^o = 0,01 \left( H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,0124d_2 \right) + 0,0161 \cdot V_g^o, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (1.5)$$

где  $d_2$  – влагосодержание газообразного топлива, г/м<sup>3</sup>.

При отсутствии справочных данных принимаем  $d_2 = 10$  г/м<sup>3</sup>;

- теоретический выход продуктов сгорания

$$V_c^o = V_{RO_2}^o + V_{N_2}^o + V_{H_2O}^o, \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (1.6)$$

- действительный выход продуктов сгорания

$$V_c = V_c^o + (\alpha - 1)V_g^o, \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (1.7)$$

- объёмная доля трёхатомных газов

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_2}; \quad (1.8)$$

- объёмная доля азота

$$r_{N_2} = \frac{V_{N_2}^o}{V_2}; \quad (1.9)$$

- объёмная доля водяного пара

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}^o}{V_2}. \quad (1.10)$$

## 1.2. Температура горения топлива

Исходя из методики расчёта нагрева металла на каждом участке печи должны быть известны температура продуктов сгорания, начальное температурное состояние металла и продолжительность нагрева. Действительная температура сгорания топлива определяется из соотношения

$$t_d = t_k \cdot \eta_{пир}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1.11)$$

где  $t_k$  – калориметрическая (адиабатная) температура горения,  $^\circ\text{C}$ ;  $\eta_{пир}$  – пирометрический коэффициент печи.

По данным [4] для методических печей непрерывного действия значение пирометрического коэффициента лежит в пределах от 0,65 до 0,80.

Калориметрическая температура горения топлива может быть определена из следующего выражения:

$$t = \frac{Q_n^p + Q_{ф.в.}}{V_2 c_2}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.12)$$

где  $Q_n^p$  – теплота сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup>;  $Q_{ф.в.}$  – физическая теплота, вносимая подогретым воздухом (или топливом) в пересчёте на единицу топлива, кДж/м<sup>3</sup>;  $c_2$  – изобарная объёмная теплоёмкость продуктов сгорания, кДж/(м<sup>3</sup>·К).

Поскольку объём продуктов сгорания зависит от коэффициента избытка воздуха, а их теплоёмкость определяется методом последовательных приближений, то колориметрическую температуру горения удобно определять с помощью  $h-t$  – диаграммы продуктов сгорания. Величина энтальпии продуктов сгорания газообразного топлива, отнесённая к единице количества топлива, определяется по формуле

$$h_2 = h_2^o + (\alpha - 1)h_g^o, \text{ кДж/м}^3, \quad (1.13)$$

где  $h_2^o$  – энтальпия теоретического объёма продуктов сгорания (при  $\alpha = 1$ ), кДж/м<sup>3</sup>;  $h_g^o$  – энтальпия теоретического объёма воздуха, кДж/м<sup>3</sup>.

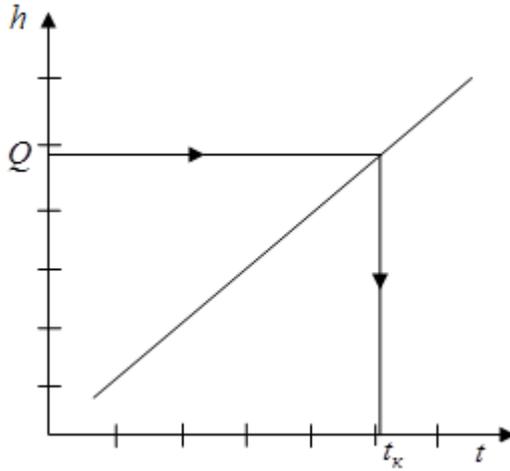
Значения этих энтальпий для заданного значения температуры продуктов сгорания вычисляются по формулам:

$$h_2^o = (V_{RO_2}c_{RO_2} + V_{N_2}c_{N_2} + V_{H_2O}c_{H_2O}) \cdot t, \text{ кДж/м}^3; \quad (1.14)$$

$$h_g^o = V_g^o c_g t, \text{ кДж/м}^3, \quad (1.15)$$

где  $c_{RO_2}$ ,  $c_{N_2}$ ,  $c_{H_2O}$ ,  $c_g$  – изобарные, объёмные теплоёмкости трёхатомных газов, азота, водяного пара и сухого воздуха, соответственно, кДж/(м<sup>3</sup>·К).

Значения этих теплоёмкостей приведены в приложении 4, а качественный вид  $h-t$  зависимости и последовательность определения колориметрической температуры горения показаны на рис. 1.1.



$H-t$  – диаграмма продуктов сгорания

На рисунке буквой  $Q$  обозначено количество теплоты, которое вносится в зону горения с  $1 \text{ м}^3$  топлива, и равное

$$Q = Q_n^p + Q_{ф.в.}, \text{ кДж/м}^3, \quad (1.16)$$

где  $Q_{ф.в.} = \alpha V_г^o c_г t_г$ ;  $t_г$  – температура, до которой должен быть нагрет воздух,  $^{\circ}\text{C}$ .

## 2. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ И ПРОФИЛЬ ПЕЧИ

### 2.1. Температурный график печи

Характер изменения температуры продуктов сгорания топлива и поверхности нагреваемого металла по длине печи зависит от направления их взаимного движения и может быть прямоточным и противоточным. Печи с прямоточным режимом движения встречаются сравнительно редко, т.к. в них возможен нагрев тонких в тепловом отношении заготовок. При нагреве массивных заготовок в металле возникают термические напряжения, которые не должны превышать максимально допустимые значения. Поэтому массивные в тепловом отношении изделия нагревают сравнительно медленно, постепенно (методически), до тех пор, пока они не приобретут необходимые пластические свойства (для большинства сталей до температуры 500...600 °С). В настоящее время применяют двухзонный и трёхзонный режим работы таких печей (см. рис. 2.1).

При двухзонном режиме работы и имеется две тепло-технологические зоны по ходу движения металла: методическая и сварочная. В методической (неотапливаемой) зоне печи происходит утилизация тепла продуктов сгорания из сварочной (отапливаемой) зоны. Общее падение температуры продуктов сгорания в методической зоне составляет от 500 до 550 °С [4]. В сварочной зоне осуществляется быстрый нагрев заготовки до конечной температуры, при этом при двухзонном режиме работы интенсивность внешнего теплообмена должна быть такой, чтобы на её входе перепад температуры по сечению слитка не превышал допустимых значений. Поэтому температура продуктов сгорания в сварочной зоне обычно превышает температуру нагрева слитка на 80...130 °С. При трёхзонном режиме работы в печи добавляется третья по ходу движения металла зона – томильная, которая служит для выравнивания температуры по сечению слитка. Температура продуктов сгорания в томильной зоне постоянная и на 30...50 °С превышает

температуру нагрева металла, которая при этом считается постоянной.

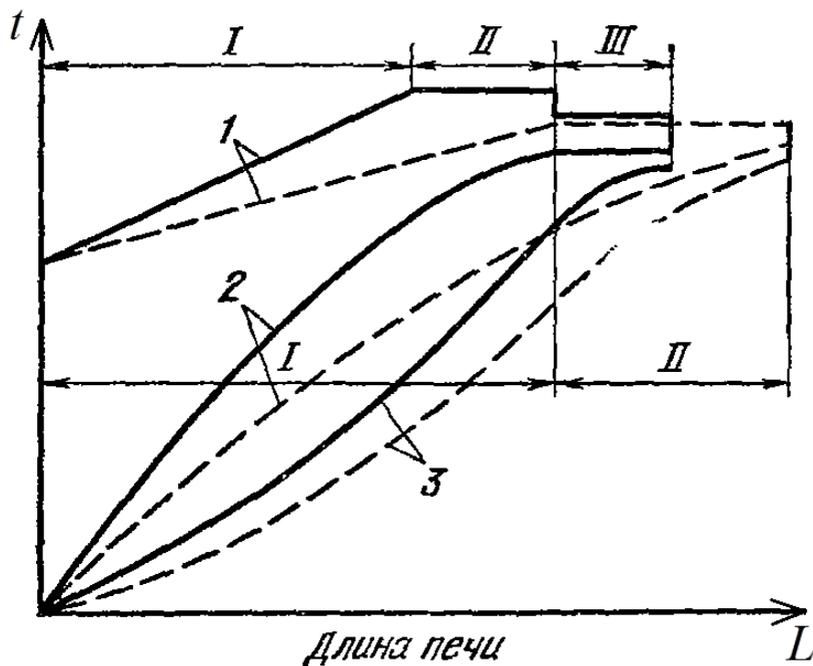


Рис. 2.1. Температурные графики печей:

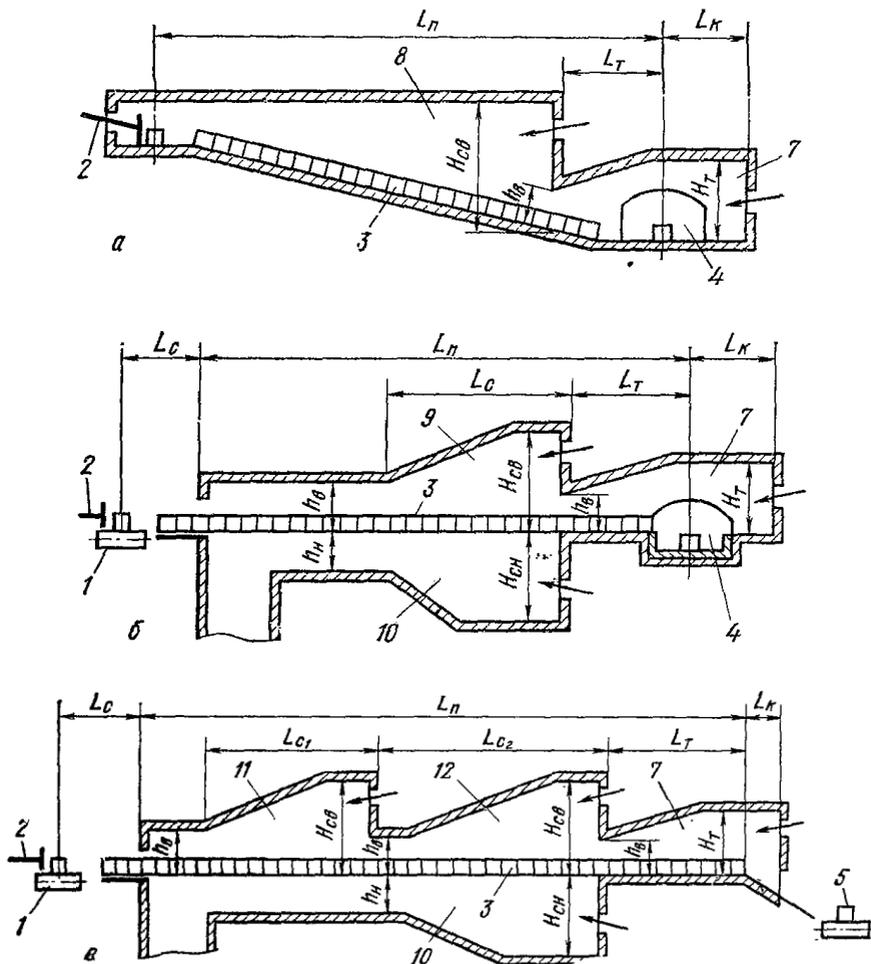
----- двухзонной; ———— — трехзонной;

1 — температура продуктов сгорания; 2, 3 — температура поверхности и центра металла; I — длина методической зоны; II — длина сварочной зоны; III — длина томильной зоны

Для повышения точности расчётов теплотехнологические зоны можно разбивать на несколько расчётных участков. Поскольку в зонах с постоянной температурой теплоносителя (сварочная и томильная зоны) точность расчёта выше, на расчётные участки (от 2 до 3) обычно разбивают только методическую зону. При расчёте времени нагрева металла его начальное температурное состояние для каждого исследуемого расчётного участка принимается равным конечному температурному состоянию для предыдущего расчётного участка.

## 2.2. Профиль и размеры рабочего пространства печи

Профили основных типов нагревательных печей непрерывного действия приведены на рис. 2.2.



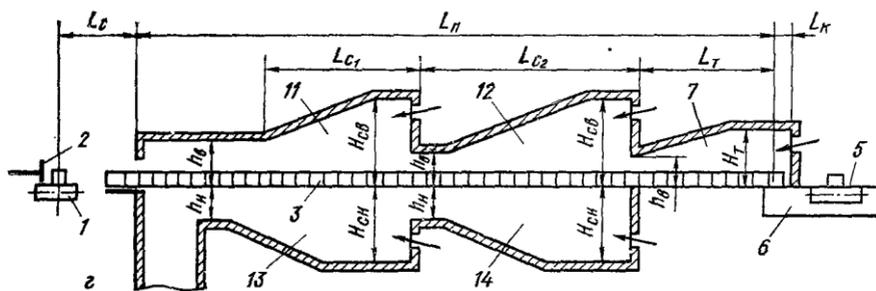


Рис. 2.2. Профили основных типов нагревательных печей:  
 а – двухзонная печь без нижнего обогрева, с наклонным подом, с боковой загрузкой и выдачей; б – трехзонная печь с нижним обогревом, с торцевой посадкой и выдачей; г – пятизонная печь с нижним обогревом, с торцевой подачей и торцевой выдачей при помощи машины выдачи; 1 – рольганг загрузки; толкатель; 3 – нагреваемый металл; 4 – окно выдачи; 5 – рольганг выдачи; 6 – штанги машины выдачи; 7 – томильная зона; 8 – сварочная зона; 9 – верхняя сварочная зона; 10 – нижняя сварочная зона; 11 – 1-я верхняя сварочная зона; 12 – 2-я верхняя сварочная зона; 13 – 1-я нижняя сварочная зона; 14 – 2-я нижняя сварочная зона

Выбор профиля рабочего пространства печи определяется необходимым количеством технологических зон, а также толщиной нагреваемых заготовок. Металл толщиной до 100 мм нагревают с одной стороны, а свыше 100 мм – в печах с нижним подогревом. Расчётные схемы теплообмена приведены в табл. 2.1, а основные размеры рабочего пространства печей в табл. 2.2.

Таблица 2.1

**Расчётные схемы нагрева металла (пластины)  
в толкательных печах**

Печь	Нагрев	Зона		
		методическая	сварочная	томильная
Без нижнего обогре- ва	Двух- зонный	Односторонний нагрев в среде с линейно возраста- ющей температу- рой при её рав- номерном (холод- ный посад) или параболическом (горячий посад) начальном распределении	Односторон- ный нагрев в среде с посто- янной темпе- ратурой при её параболиче- ском началь- ном распреде- лении	-
	Трех- зонный			Односторон- ный нагрев в среде с посто- янной температу- рой при её пара- болическом начальном распреде- нии
С ниж- ним обогре- вом	Двух- зонный	Двухсторонний нагрев в среде с линейно возраста- ющей температу- рой при её рав- номерном (холод- ный посад) или параболическом (горячий посад) начальном распределении	Двухсторон- ный нагрев в среде с посто- янной темпе- ратурой при её параболиче- ском началь- ном распреде- лении	-
	Трех- зонный			Односторон- ный нагрев в среде с посто- янной температу- рой при её пара- болическом начальном распреде- нии

Таблица 2.2

**Основные размеры рабочего пространства  
нагревательных толкательных печей**

Рисунок	Отношение, %		
	$L_{c1}/L_n$	$L_{c2}/L_n$	$L_m/L_n$
2.1, а	-	-	28-37
2.2, б	-	27-37	24-30
2.3, в	22-28	27-32	24-26
2.4, г	22-28	27-32	24-26

Продолжение табл. 2.2

Рисунок	Размер, м					
	$H_{св}$	$H_{сн}$	$H_m$	$h_6$	$h_n$	$L_k$
2.1, а	1,6-3	-	1,6-1,85	0,55-0,85	-	1,0-1,3
2.2, б	1,6-3	2,2-2,6	1,5-1,7	0,7-0,8	1-1,2	1,3-1,7
2.3, в	1,6-3	2,2-2,6	1,5-1,7	0,7-0,8	1-1,2	1,3-1,7
2.4, г	1,6-3	2,2-2,6	1,5-1,7	0,7-0,8	1-1,2	1,0-1,4

При организации двухстороннего подвода тепла металл проталкивают по водоохлаждаемым подовым трубам. В результате охлаждающего и экранирующего действия подовых труб на металле образуются относительно холодные участки. Поэтому выравнивание температуры по сечению слитка в томительной зоне производят на монолитном поде при одностороннем подводе тепла.

### 3. РАСЧЕТ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

#### 3.1. Расчёт внешнего теплообмена

Вследствие высокой температуры продуктов сгорания (теплоносителя) и значительной толщины газового слоя, считается, что теплоотдача на поверхность нагревательного металла (внешний теплообмен) происходит, в основном, излучением, а доля конвективной составляющей составляет от 5 до 10 % [4]. Поэтому обычно расчёт интенсивности конвективного теплообмена не производят, а учитывают её поправочными коэффициентами.

Интенсивность радиационного теплообмена определяет лучистый коэффициент теплоотдачи, который вычисляется по формуле

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{C_0 \varepsilon_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{\bar{T}_z}{100} \right)^4 - \left( \frac{\bar{T}_m}{100} \right)^4 \right]}{\bar{T}_z - \bar{T}_m}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (3.1)$$

где  $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – излучательная способность абсолютно чёрного тела;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведённая степень черноты системы «газ-кладка-металл»;  $\bar{T}_z$ ,  $\bar{T}_m$  – средние абсолютные температуры теплоносителя и поверхности металла на расчётном участке, К.

Среднюю температуру теплоносителя на поверхности металла определяют из температурного графика, а приведённая степень черноты системы определяются из выражения:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_m \frac{\omega + 1 - \varepsilon_z}{[\varepsilon_m + \varepsilon_z (1 - \varepsilon_m)] \frac{1 - \varepsilon_z}{\varepsilon_z} + \omega}, \quad (3.2)$$

где  $\omega$  – степень развития кладки печи;  $\varepsilon_m$  – степень черноты металла;  $\varepsilon_z$  – степень черноты дымовых газов.

Степень развития кладки представляет собой отношения площади кладки печи к лучевоспринимающей поверхности металла, она вычисляется для каждой технологической зоны печи по формуле

$$\omega = \frac{2\bar{h} + A}{l}, \quad (3.3)$$

где  $\bar{h}$  – средняя высота технологической зоны, м;  $A=0,5+l$  – ширина печи, м;  $l$  – длина нагреваемой заготовки, м.

Значение степени черноты различных материалов приведены в приложении 5.

Степень черноты дымовых газов определяется по формуле

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{RO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O}, \quad (3.4)$$

где  $\varepsilon_{RO_2}$ ,  $\varepsilon_{H_2O}$  – степень черноты трёхатомных газов и водяного пара, соответственно;  $\beta$  – поправочный коэффициент.

Для определения величин, входящих в (3.4) используются номограммы, приведённые на рис. 3.1 – 3.3. На данных рисунках приняты следующие обозначения:  $p_{RO_2}$ ,  $p_{H_2O}$  – парциальное давление трёхатомных газов и водяного пара, соответственно, кПа;  $t_2$  – средняя температура продуктов сгорания на расчётном участке, °С;  $l_{эф}$  – эффективная толщина излучающего слоя, м.

Парциальные давления трёхатомных газов и водяного пара вычисляются через их объёмные доли:

$$P_{RO_2} = P \cdot \frac{V_{RO_2}}{V_2}; \quad P_{H_2O} = P \cdot \frac{V_{H_2O}}{V_2}, \quad (3.5)$$

где  $P = 101,3$  кПа – давление продуктов сгорания.

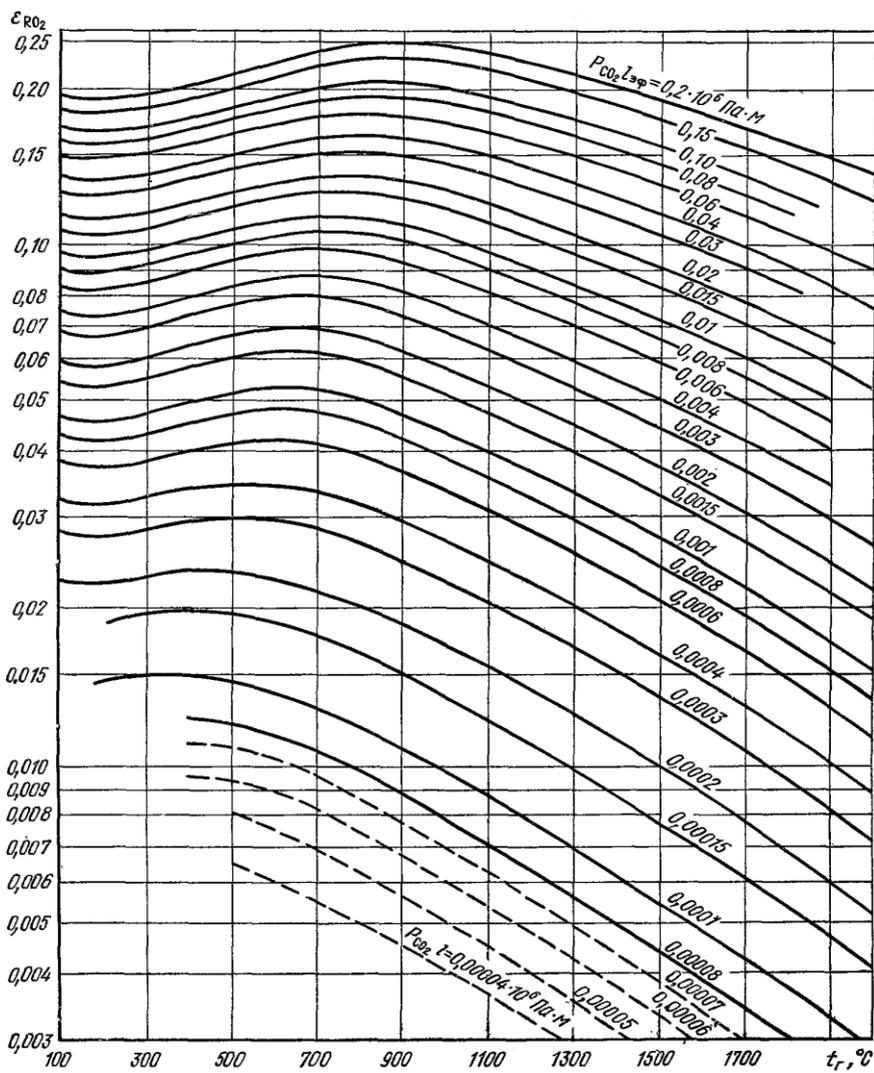


Рис. 3.1. Номограмма для определения степени черноты  $RO_2$

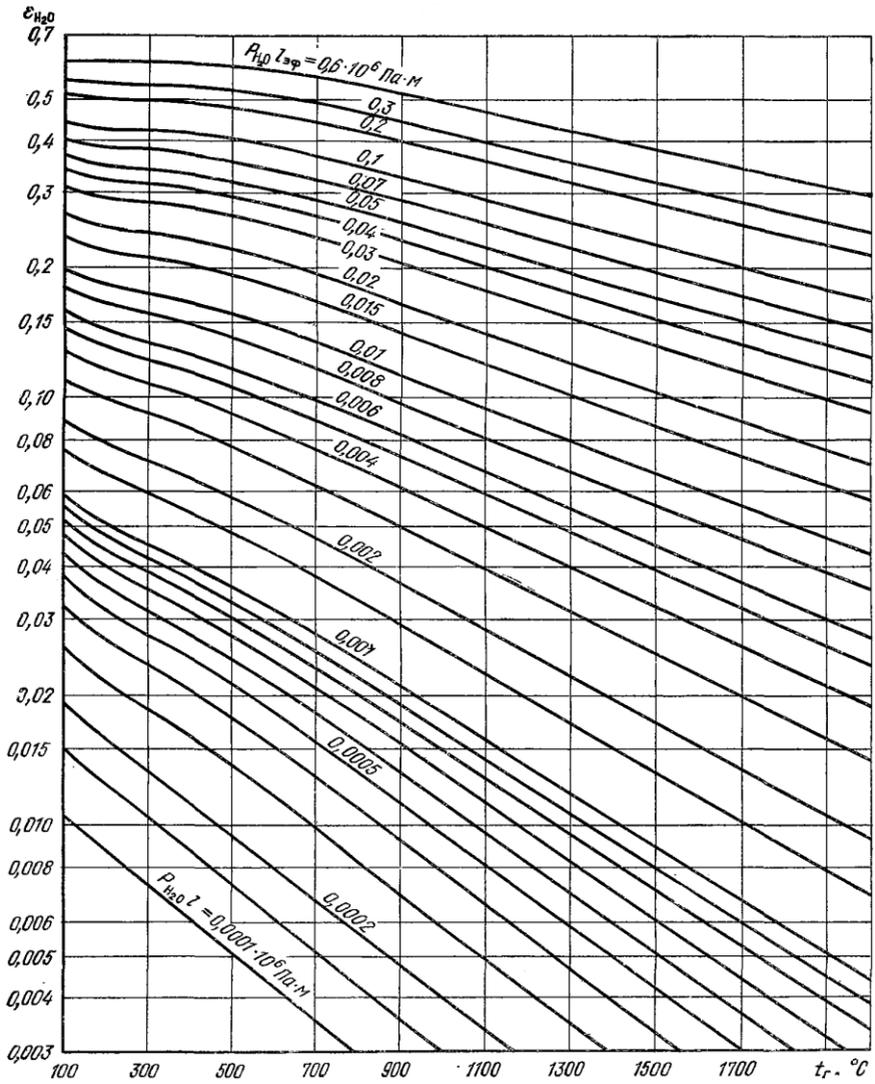


Рис. 3.2. Номограмма для определения степени черноты  $H_2O$

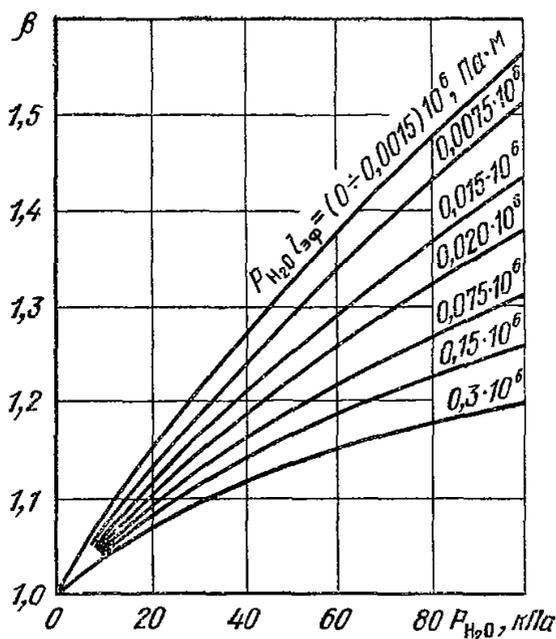


Рис. 3.3. Номограмма для определения поправочного коэффициента  $\beta$

Значение эффективной длины пути луча  $l$  для различных форм газового объёма приведены в приложении 6. Эффективная толщина газового слоя может быть также рассчитана в соответствии с [5] по формуле

$$l_{эф} = (3,5 \dots 4,0) \cdot \frac{V}{F}, \quad (3.6)$$

где  $V$  – объём продуктов сгорания,  $\text{м}^3$ ;  $F$  – площадь поверхности, ограничивающий этот объём,  $\text{м}^2$ .

Для технологической зоны, имеющей форму параллелепипеда, соотношение (3.6) преобразуется к следующему виду:

$$l_{эф} = 1,8 \cdot \frac{\bar{h} \cdot A}{h + A}. \quad (3.7)$$

### 3.2. Расчёт внутреннего теплообмена

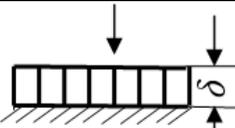
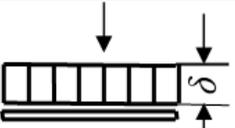
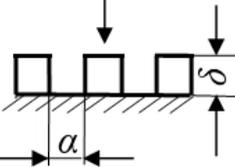
Распространение теплоты внутри нагреваемого металла происходит за счёт нестационарной теплопроводности. Расчёт температурных полей может быть произведён из уравнения Фурье при граничных условиях третьего рода. Характер распределения температур в нагреваемой заготовке определяется численным значением критерия Био, вычисляемого по формуле

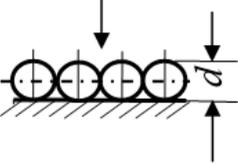
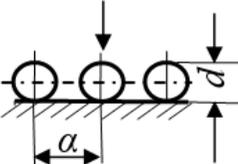
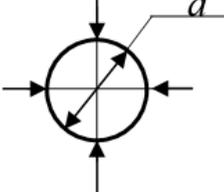
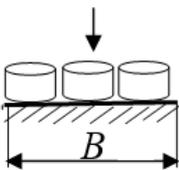
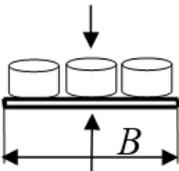
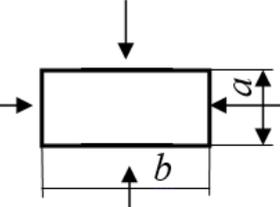
$$Bi = \frac{\alpha_l S}{\lambda}, \quad (3.8)$$

где  $S$  – прогреваемая толщина заготовки, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м·К).

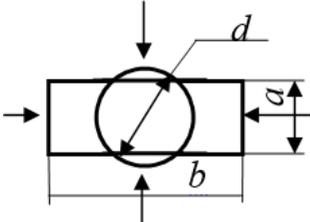
Прогреваемая толщина заготовок зависит от их формы, расположения и способа подвода теплоты и вычисляется по формулам, приведённым в таблице.

Прогреваемая толщина заготовок  $S$

Расположение заготовок	$\mu ; S$												
 <p>Односторонний нагрев</p>	$\mu = 1 ; S = \delta$												
 <p>Двухсторонний нагрев, водоохлаждаемые трубы</p>	$\mu = 0,55 ; S = \mu \delta$												
 <p>Односторонний нагрев, монолитный под</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\alpha/\delta</math></th> <th>0</th> <th>0,5</th> <th>1</th> <th>2</th> <th><math>\infty</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th><math>\mu</math></th> <td>1</td> <td>0,6</td> <td>0,55</td> <td>0,5</td> <td>0,4</td> </tr> </tbody> </table>	$\alpha/\delta$	0	0,5	1	2	$\infty$	$\mu$	1	0,6	0,55	0,5	0,4
	$\alpha/\delta$	0	0,5	1	2	$\infty$							
$\mu$	1	0,6	0,55	0,5	0,4								
$S = \mu \delta$													

Расположение заготовок	$\mu$ ; $S$								
 <p data-bbox="397 256 613 352">Односторонний нагрев, монолитный под</p>	$\mu = 0,75 \dots 0,8; S = \mu d$								
 <p data-bbox="397 453 613 549">Односторонний нагрев, монолитный под</p>	<table border="1" data-bbox="647 427 987 483"> <tr> <td><math>a/d</math></td> <td>1</td> <td>2</td> <td>&gt;2</td> </tr> <tr> <td><math>\mu</math></td> <td>0,8...1</td> <td>0,3...0,6</td> <td>0,5</td> </tr> </table> $S = \mu d$	$a/d$	1	2	>2	$\mu$	0,8...1	0,3...0,6	0,5
$a/d$	1	2	>2						
$\mu$	0,8...1	0,3...0,6	0,5						
 <p data-bbox="397 655 575 751">Круглые вертикальные заготовки</p>	$\mu = 0,5; S = \mu d$								
 <p data-bbox="397 815 613 1011">Односторонний нагрев: <math>F</math> – площадь поперечного сечения изделия; <math>B</math> – ширина ряда</p>	$S = \frac{\sum F}{b}$								
 <p data-bbox="397 1082 568 1145">Двусторонний нагрев</p>	$S = \frac{\sum F}{2b}$								
 <p data-bbox="437 1257 613 1390">Плоские вертикальные заготовки при <math>b/a &gt; 1,8</math></p>	$\mu = 0,5; S = \mu a$								

Окончание табл.

Расположение заготовок	$\mu ; S$
 <p data-bbox="453 215 722 406">Четырёхсторонний нагрев, плоские вертикальной заготовки при <math>b/a \leq 1,8</math> <math>d = 1,128\sqrt{ab}</math></p>	$\mu = 0,5 ; S = \mu d$

Теплофизические свойства некоторых сталей приведены в приложениях 7-9.

Если выполняется неравенство  $Bi \leq 0,25$ , то это означает, что на данном расчётном участка заготовка греется как «тонкое тело», т.е. равномерно по сечению. В этом случае время нагрева вычисляется в соответствии с [4] по формуле:

$$\tau = \frac{Mc}{\alpha_l F} \ln \frac{\bar{t}_2 - t_M^{нач}}{\bar{t}_2 - t_M^{кон}}, \text{ с,} \quad (3.9)$$

где  $M$  – масса одной заготовки, кг;  $c$  – теплоёмкость металла, Дж/(кг·К);  $F$  – лучевоспринимающая поверхность заготовки, м<sup>2</sup>;  $\bar{t}_2$  – средняя температура теплоносителя на расчётном участке, °С;  $t_M^{нач}$ ,  $t_M^{кон}$  – температура заготовки на входе и на выходе из расчётного участка, соответственно, °С.

Масса одной заготовки определяется из следующего соотношения:

$$M = \delta \cdot b \cdot l \cdot \rho_m, \quad (3.10)$$

где  $\delta$ ,  $b$ ,  $l$  – геометрические размеры заготовки, м;  $\rho_m$  – плотность стали, кг/м<sup>3</sup>.

Лучевоспринимающая поверхность заготовки равна:

$$F = b \cdot l \text{ или} \quad (3.11)$$

или

$$F = 2 \cdot b \cdot l, \quad (3.12)$$

соответственно при одностороннем и двухстороннем подводе теплоты.

Поскольку аналитическое решение для расчёта времени нагрева «массивных» заготовок ( $Bi > 0,25$ ) представляется в виде бесконечного ряда [6], расчёт производят с помощью номограмм, построенных на их основе (см. рис. 3.4 – 3.11).

Расчёт внутреннего теплообмена в «массивной» заготовке приводят в следующей последовательности:

- вычисляют безразмерную температуру по поверхности заготовки

$$\theta^{нов} = \frac{\bar{t}_2 - t_M^{кон,нов}}{\bar{t}_2 - t_0}, \quad (3.13)$$

где  $t_M^{кон,нов}$  – температура поверхности заготовки на выходе из расчётного участка, °С;  $t_0$  – средняя по сечению температура заготовки на входе в расчётный участок, °С;

- по номограмме, построенной для поверхности заготовки, определяет критерий Фурье

$$Fo = f_1(\theta^{нов}, Bi), \quad (3.14)$$

где  $Fo = \frac{a\tau}{S^2}$  – критерий Фурье;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

- вычисляют время нагрева заготовки на расчётном участке

$$\tau = \frac{F_o S^2}{a}, \quad (3.15)$$

- по номограмме, построенной для центра заготовки, определяют безразмерную температуру в центре заготовки

$$\theta^{центр} = f_2(Bi, Fo); \quad (3.16)$$

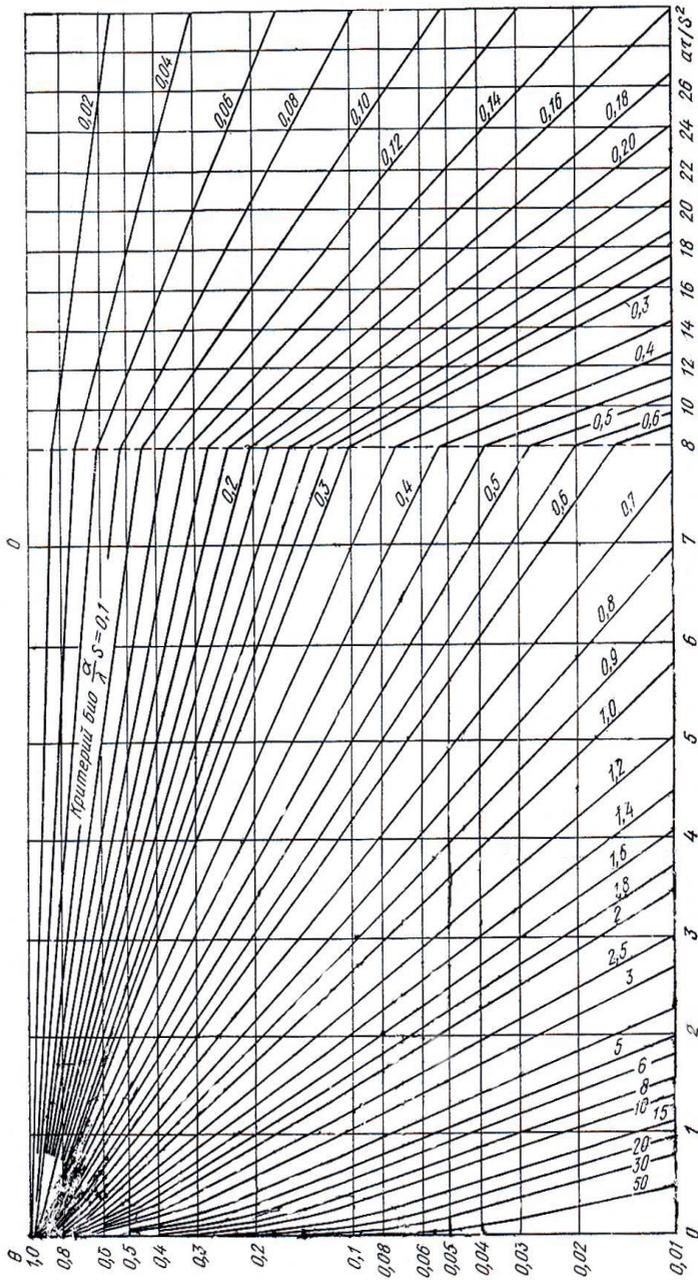


Рис. 3.4. Относительная температура  $\theta$  поверхности пластины ( $\chi/S = 1$ ) при значениях  $Fo$  от 0 до 30

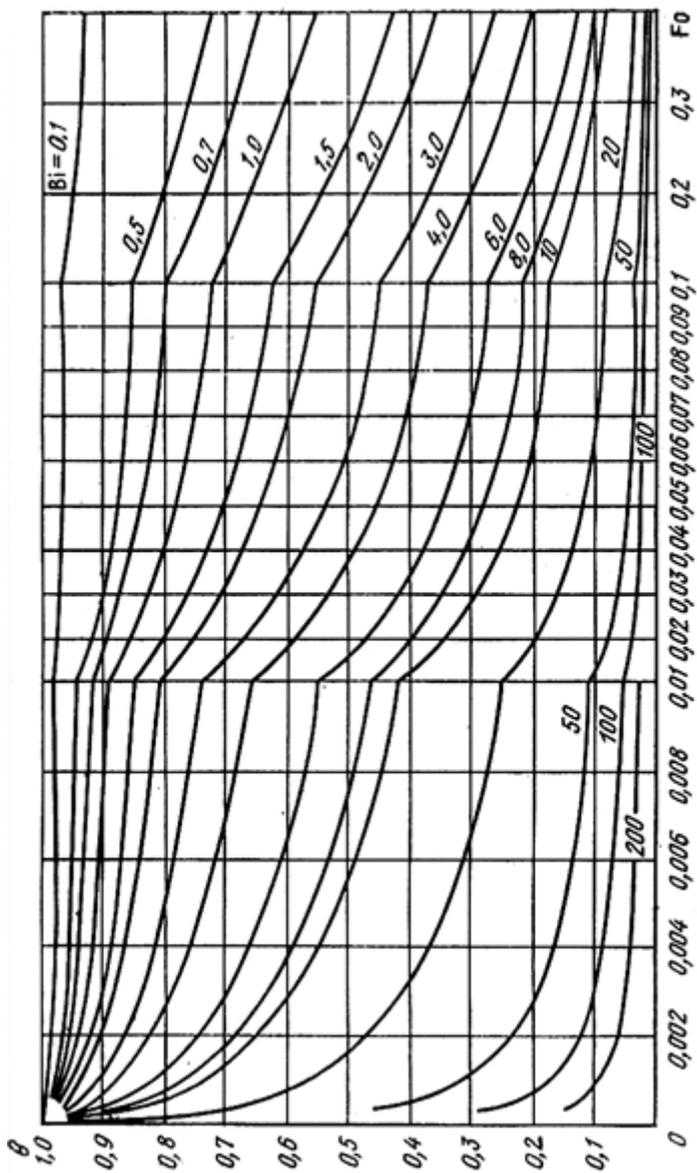


Рис. 3.5. Относительная температура  $\theta$  поверхности пластины при значениях  $Fo$  от 0 до 0,5

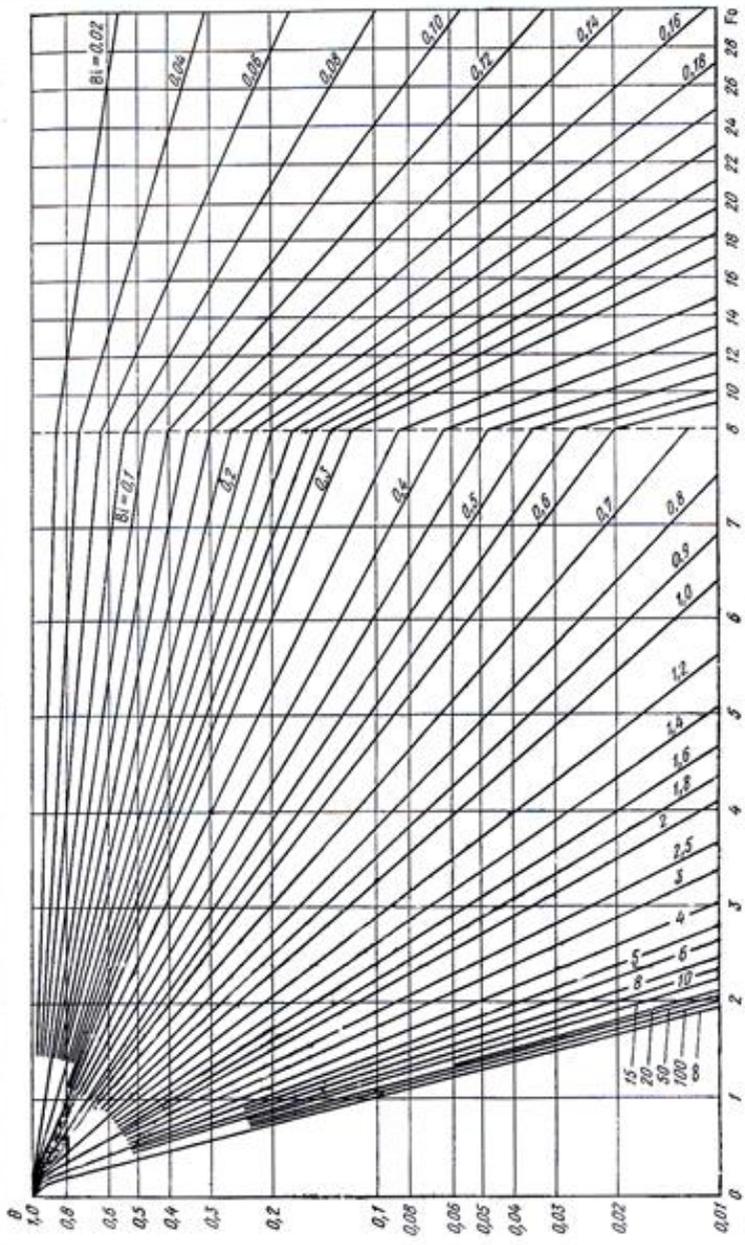


Рис. 3.6. Относительная температура  $\theta$  середины пластины ( $\chi/S = 0$ ) при значениях  $Fo$  от 0 до 30

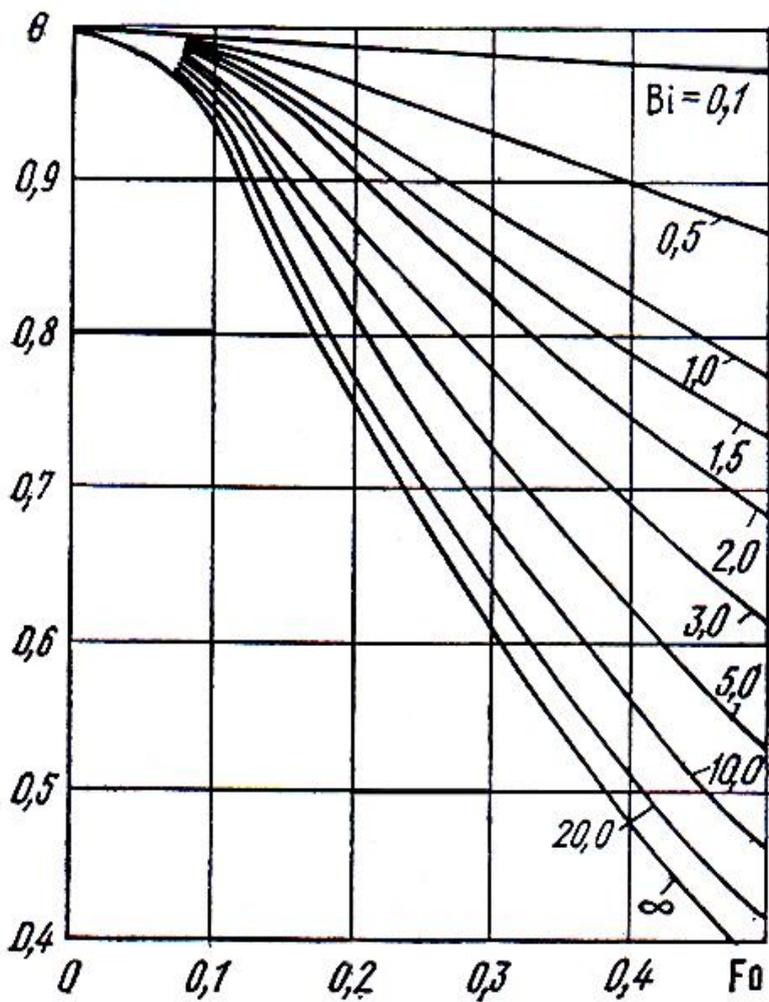


Рис. 3.7. Относительная температура  $\theta$  середины пластины при значениях  $Fo$  от 0 до 0,5

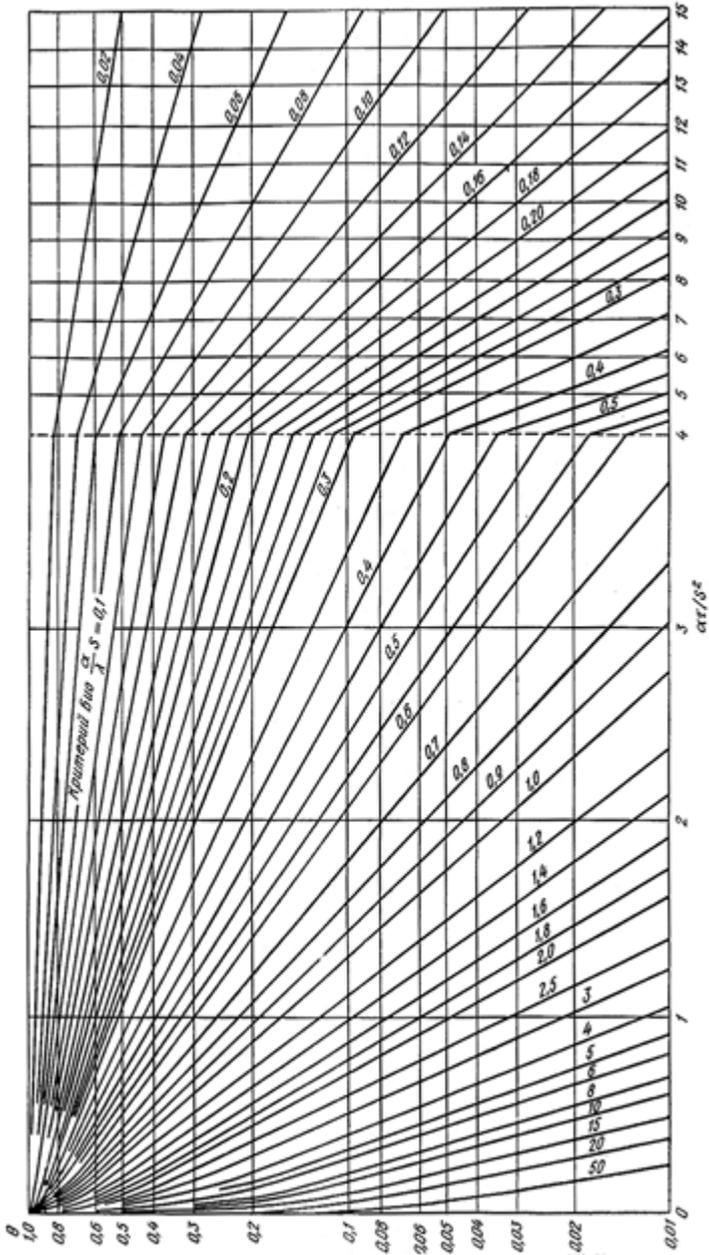


Рис. 3.8. Относительная температура  $\theta$  поверхности цилиндра ( $x/S = 1$ ) при значениях  $Fo$  от 0 до 15

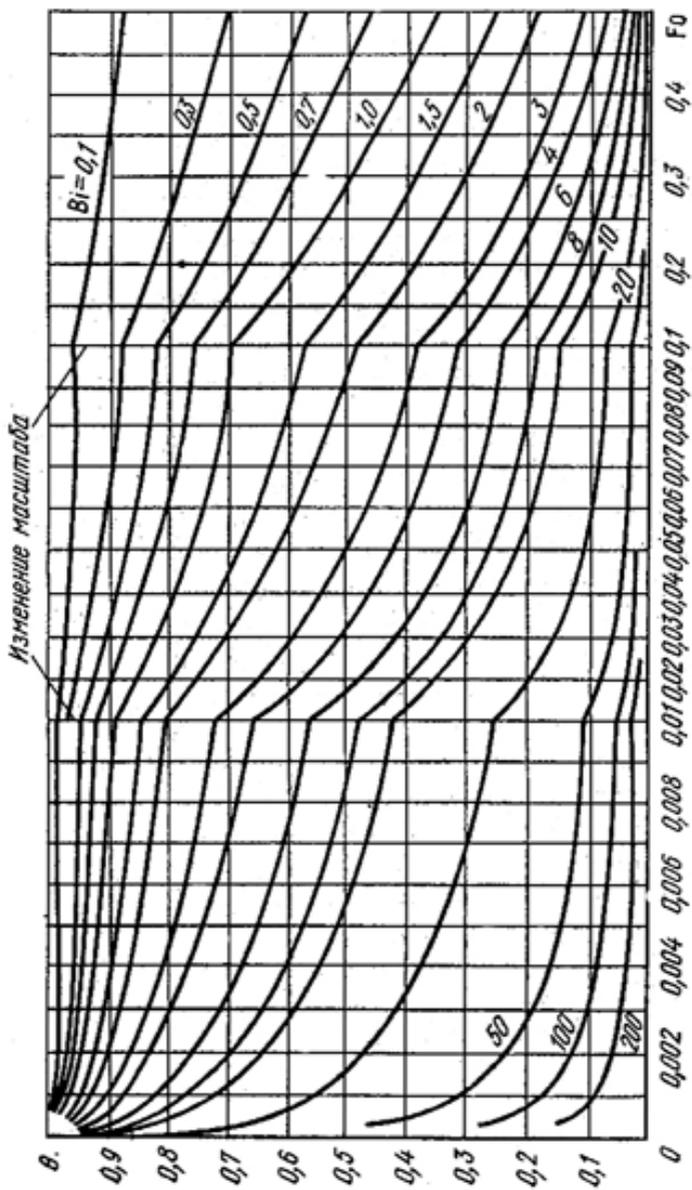


Рис. 3.9. Относительная температура  $\theta$  поверхности цилиндра при значениях  $Fo$  от 0 до 0,5

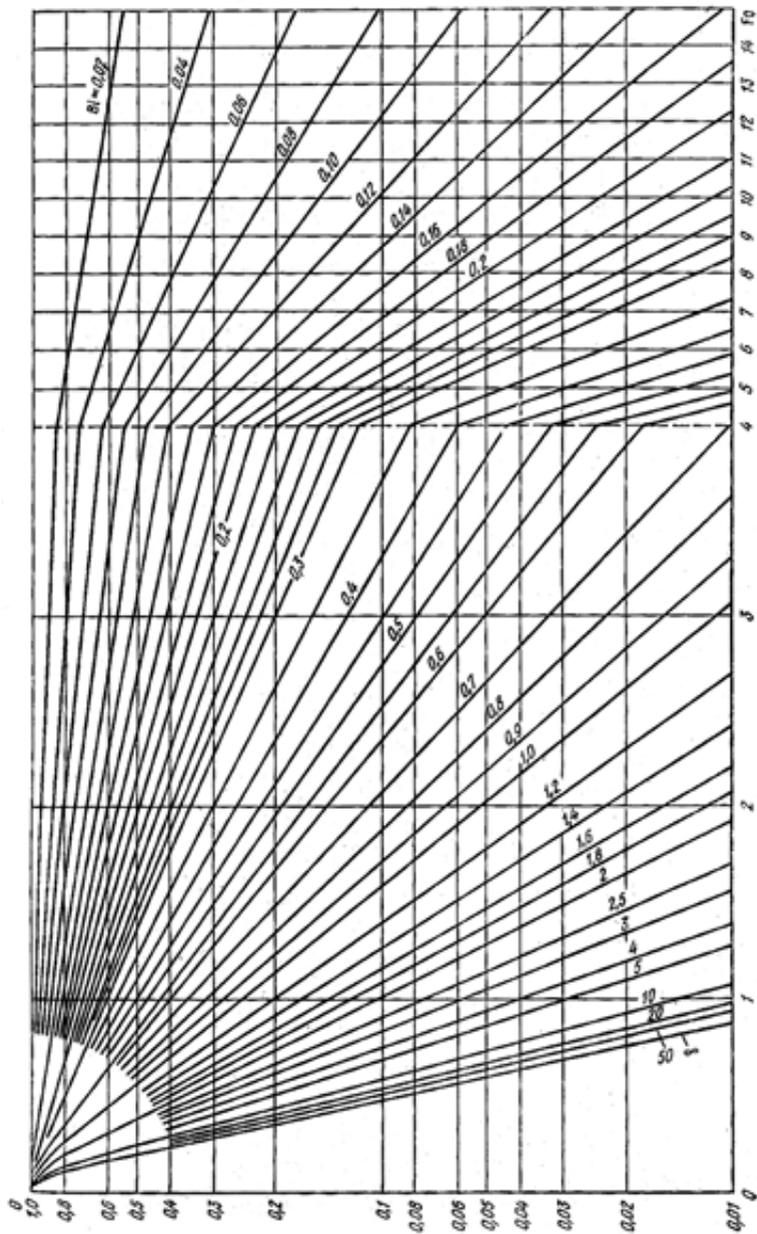


Рис. 3.10. Относительная температура  $\theta$  по оси цилиндра ( $x/S = 0$ ) при значениях  $Fo$  от 0 до 15

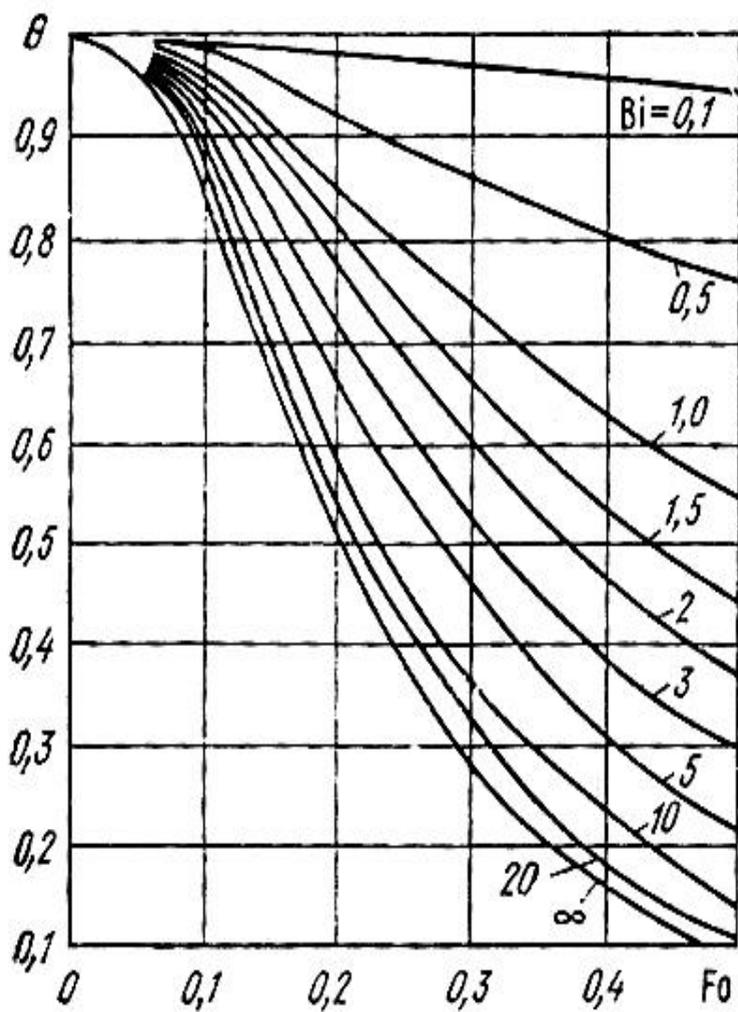


Рис. 3.11. Относительная температура  $\theta$  оси цилиндра при значениях  $Fo$  от 0 до 0,5

- вычисляют температуру в центре заготовки на выходе из расчётного участка:

$$t_{\text{м}}^{\text{кон.центр}} = \bar{t}_2 - \theta_{\text{центр}} (\bar{t}_2 - t_0). \quad (3.17)$$

Если неравномерность нагрева заготовки на выходе из сварочной зоны превышает допустимые значения, то определяется время нахождения заготовки в томильной зоне, при этом критерий Фурье определяют по номограмме, приведённой на рис. 3.12.

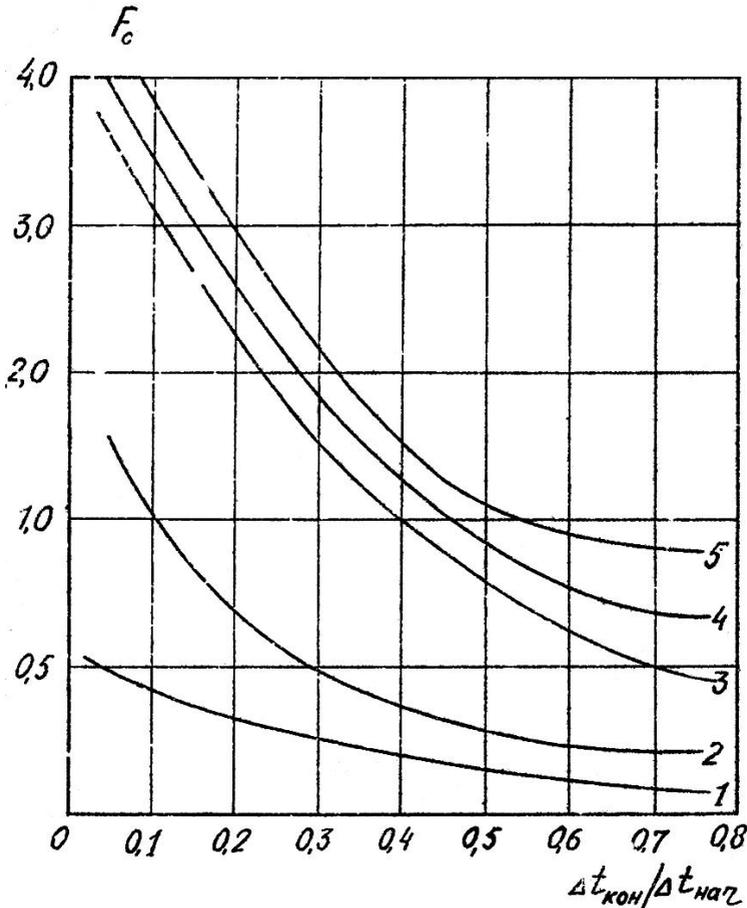


Рис. 3.12. Выдержка металла при постоянной температуре поверхности: 1-3 – пластина; 4-5 – цилиндр

### 3.3. Расчёт напряжённости пода печи

Полное время пребывания металла в печи определяется по формуле

$$\tau = \tau_m + \tau_c + \tau_m, \text{ ч}, \quad (3.18)$$

где  $\tau_m$ ,  $\tau_c$ ,  $\tau_m$  – время пребывания заготовки в методической, сварочной и томильной зоне, соответственно, ч.

Масса металла, одновременно находящаяся в печи

$$G = P \cdot \tau, \text{ кг}, \quad (3.19)$$

где  $P$  – производительность печи по металлу, кг/ч.

Число заготовок, одновременно находящихся в печи

$$n = \frac{G}{M}, \text{ шт.} \quad (3.20)$$

Длина активного пода печи

$$L = n \cdot b, \text{ м}, \quad (3.21)$$

где  $b$  – ширина одной заготовки, м.

Длина каждой технологической зоны печи определяется пропорционально времени пребывания заготовка в этой зоне:

$$L_i = \frac{L}{\tau} \tau_i, \text{ м}, \quad (3.22)$$

где  $\tau_i$  – время пребывания заготовки в  $i$ -ой зоне.

Напряжённость пода печи

$$H = \frac{P}{LA}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (3.23)$$

Для нагревательных печей периодического действия напряжённость пода должна находиться в пределах от 500 до 1200 кг/(м<sup>2</sup>·ч).

## 4. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПЕЧИ

Тепловой баланс составляется с целью определения необходимого расхода топлива и оценки энергетического совершенства печи. Уравнение теплового баланса учитывает равенство прихода и расхода тепла и для нагревательных печей непрерывного действия имеет следующий вид:

$$Q_{x.m} + Q_{ф.в} + Q_{экз} = Q_{т.н} + Q_{yг} + Q_{x.н} + Q_{м.н} + Q_{кл} + Q_{изл} + Q_{охл} + Q_{неуч}, \text{ кДж/ч}, \quad (4.1)$$

где  $Q_{x.m}$  – химическая теплота топлива;  $Q_{ф.в}$  – физическая теплота, вносимая подогретым воздухом;  $Q_{экз}$  – теплота экзотермических реакций;  $Q_{т.н}$  – теплота, затраченная на нагрев металла;  $Q_{yг}$  – потери теплоты с уходящими газами;  $Q_{x.н}$  – потери теплоты от химического недожога;  $Q_{м.н}$  – потери теплоты от механического недожога;  $Q_{кл}$  – потери теплоты через кладку печи;  $Q_{изл}$  – потери теплоты излучением через открытые технологические окна;  $Q_{охл}$  – потери теплоты с охлаждающей водой;  $Q_{неуч}$  – неучтённые тепловые потери.

### 4.1. Приходные статьи теплового баланса

Приходные статьи теплового баланса рассчитываются по следующим уравнениям:

- химическая теплота топлива

$$Q_{x.m} = B \cdot Q_n^p, \text{ кДж/ч}, \quad (4.2)$$

где  $B$  – расход топлива, м<sup>3</sup>/ч;

- физическая теплота, вносимая подогретым воздухом,

$$Q_{ф.в} = \alpha V_г^o B c_г t_г, \text{ кДж/ч}, \quad (4.3)$$

где  $t_g$  – температура подогретого воздуха, °С;  $c_g$  – изобарная объёмная теплоёмкость воздуха (см. приложение 4);  
 - теплота экзотермической реакции окисления стали

$$Q_{\text{экс}} = 5652 \cdot P \cdot a, \text{ кДж/ч}, \quad (4.4)$$

где  $a$  – угар металла.

По данным [4] величина угара в нагревательных печах непрерывного действия составляет от 0,01 до 0,02 (от 1 до 2 %).

## 4.2. Расходные статьи теплового баланса

Расходные статьи теплового баланса рассчитываются по следующим уравнениям:

- теплота, затрачиваемая на нагрев стали,

$$Q_{m.n} = P c_m (t_m'' - t_m'), \text{ кДж/ч}, \quad (4.5)$$

где  $c_m$  – теплоёмкость стали в интервале температур от  $t_m''$  до  $t_m'$ , кДж/(кг·К) (см. приложения 7-9);

- потери теплоты с уходящими газами

$$Q_{y2} = V_z B c_z t_{y2} = h_{y2} B, \text{ кДж/ч}, \quad (4.6)$$

где  $c_z$  – теплоёмкость продуктов сгорания при температуре уходящих газов, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_{y2}$  – температура уходящих газов, °С;  $h_{y2}$  – энтальпия уходящих газов (определяется по  $h-t$  – диаграмме при температуре уходящих газов), кДж/м<sup>3</sup>;

- потери тепла от химического недожога

$$Q_{x.n} = (0,005 \dots 0,015) B Q_H^p, \text{ кДж/ч}; \quad (4.7)$$

- потери теплоты от механического недожога

$$Q_{m.n} = (0,02 \dots 0,03) B Q_H^p, \text{ кДж/ч}; \quad (4.8)$$

- потери теплоты через кладку печи

$$Q_{\text{кл}} = 3,6 \cdot \frac{\bar{t}_z - t_{oc}}{\frac{1}{\alpha_z} + \frac{\delta_o}{\lambda_o} + \frac{\delta_u}{\lambda_u} + \frac{1}{\alpha_{oc}}} F_{\text{кл}}, \text{ кДж/ч}, \quad (4.9)$$

где  $\bar{t}$  – средняя температура теплоносителя в печи, °С;  $t_{oc}$  – температура окружающей среды, °С;  $\alpha_z$ ,  $\alpha_{oc}$  – коэффициенты теплоотдачи от газов к кладке и от кладке к окружающей среде (воздуху), соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta_o$ ,  $\delta_u$  – толщина огнеупорного и теплоизоляционного слоя кладки, соответственно, м;  $\lambda_o$ ,  $\lambda_u$  – коэффициенты теплопроводности огнеупорного и теплоизоляционного материалов, соответственно, Вт/(м·К);  $F_{\text{кл}}$  – площадь поверхности кладки печи, м<sup>2</sup>.

Формулы для расчётов коэффициентов теплопроводности огнеупорных и теплоизоляционных материалов приведены в приложении 10, а максимально допустимые значения температур этих материалов в приложении 11.

Термическим сопротивлением теплоотдачи со стороны теплоносителя можно пренебречь, т.к.  $\alpha_z \gg \alpha_{oc}$ , а коэффициент теплоотдачи от кладки к окружающей среде определяется в соответствии с [4] по формуле

$$\alpha_{oc} = 7 + 0,5t_{\text{нар}}, \quad (4.10)$$

где  $t_{\text{нар}}$  – температура наружной поверхности кладки, °С.

Площадь поверхности кладки вычисляют из соотношения:

$$F_{\text{кл}} = 2F_{\text{см}} + F_{\text{св}}, \quad (4.11)$$

где  $F_{\text{см}}$  – площадь боковой стенки, м<sup>2</sup>;  $F_{\text{св}}$  – площадь свода печи, м<sup>2</sup>.

При ориентировочных расчётах потерю теплоты через кладку печи можно определить по упрощённой формуле

$$Q_{кл} = 3,6 \cdot q_{кл} \cdot F_{кл}, \quad (4.12)$$

где  $q_{кл}$  – плотность теплового потока через кладку печи, Вт/м<sup>2</sup>, которая определяется по данным табл. 4.1;

Таблица 4.1

Плотность теплового потока через кладку печи

Материал стенки	$q_{кл}$	Внутренняя температура стенки, °С		
	$t_{нар}$	400	600	800
Шамот (1 кирпич)	$q_{кл}$	1186,26	1907,32	2733,05
	$t_{нар}$	102	140	176
Шамот (1,5 кирпича)	$q_{кл}$	819,915	1320,01	1884,06
	$t_{нар}$	81	109	138
Шамот (1 кирпич) и изоляция 0,5 кирпича	$q_{кл}$	296,563	488,46	715,245
	$t_{нар}$	45	60	75
Шамот (0,5 кирпича) и изоляция 0,5 кирпича	$q_{кл}$	331,455	552,425	808,235
	$t_{нар}$	49	65	82
Шамот (1 кирпич) и изоляция 1 кирпич	$q_{кл}$	168,635	279,12	401,235
	$t_{нар}$	32	42	53
Шамот (1 кирпич) и изоляция (0,5 кирпича) и шлаковая засыпка 100 мм	$q_{кл}$	133,745	244,23	377,975
	$t_{нар}$	28	39	52
Шамот (1 кирпич) и изоляция (1 кирпич)	$q_{кл}$	98,855	168,635	255,86
	$t_{нар}$	25	31	40

Продолжение табл. 4.1

Материал стенки	$q_{кл}$	Внутренняя температура стенки, °C		
		$t_{нар}$	1000	1200
Шамот (1 кирпич)	$q_{кл}$	3605,3	4558,96	5640,55
	$t_{нар}$	210	205	275
Шамот (1,5 кирпича)	$q_{кл}$	2488,82	3157,55	3849,53
	$t_{нар}$	166	192	216
Шамот (1 кирпич) и изоляция 0,5 кирпича	$q_{кл}$	953,66	1232,78	1535,16
	$t_{нар}$	91	107	122
Шамот (0,5 кирпича) и изоляция 0,5 кирпича	$q_{кл}$	1093,22	1418,86	1773,575
	$t_{нар}$	98	116	134
Шамот (1 кирпич) и изоляция 1 кирпич	$q_{кл}$	546,61	697,8	936,88
	$t_{нар}$	63	74	84
Шамот (1 кирпич) и изоляция (0,5 кирпича) и шлаковая засыпка 100 мм	$q_{кл}$	540,795	726,875	942,03
	$t_{нар}$	64	76	88
Шамот (1 кирпич) и изоляция (1 кирпич)	$q_{кл}$	366,345	476,83	616,38
	$t_{нар}$	49	59	69

- потери теплоты излучением через открытые технологические окна

$$Q_{изл} = 3,6 \cdot c_o \left( \frac{\bar{T}_z}{100} \right)^4 F \Phi \tau, \text{ кДж/ч}, \quad (4.13)$$

где  $c_o = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – излучательная способность абсолютно чёрного тела;  $F$  – площадь технологического окна,  $\text{м}^2$ ;  $\Phi$  – коэффициент диафрагмирования который определяется с помощью рис. 4.1;  $\tau$  – время открывания окна, ч/ч;

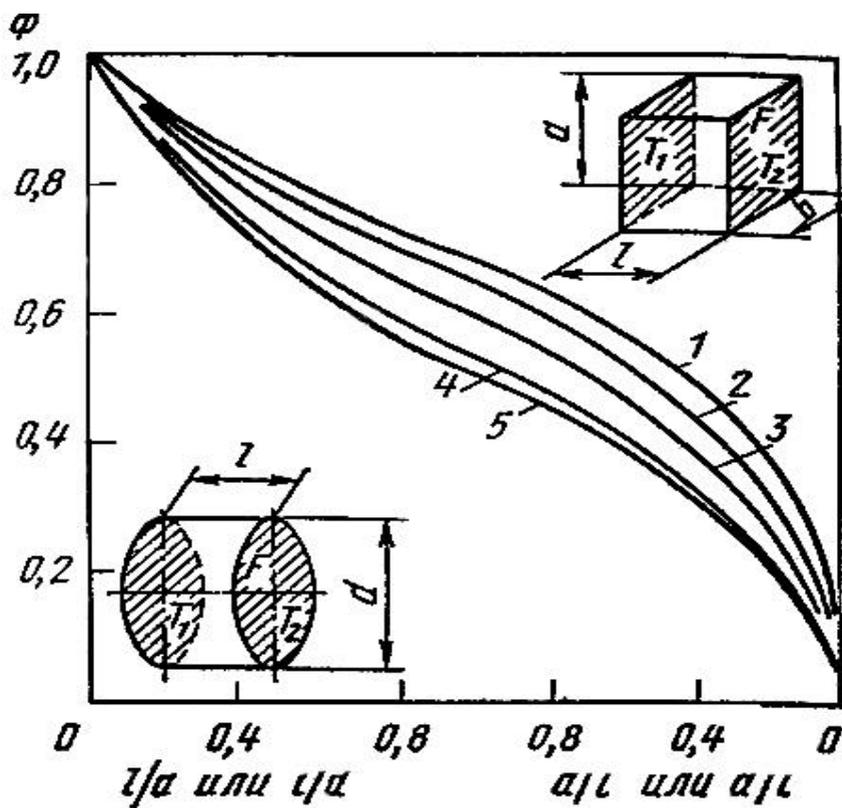


Рис. 4.1. Зависимость коэффициента диафрагмирования  $\Phi$  от отношения  $l/a$  или  $l/d$  и отношения  $a/l$  или  $d/l$ :

1 – для длинных полос,  $a : b = 0$ ; 2 – для прямоугольника,  $a : b = 0,2$ ;  
3 – то же,  $a : b = 0,5$ ; 4 – для квадрата,  $a : b = 1$ ; 5 – для круга

- потери теплоты с охлаждающей водой

$$Q_{охл} = 3,6 \sum_i q_{охл i} F_{охл i}, \text{ кДж/ч}, \quad (4.14)$$

где  $q_{охл i}$  – плотность теплового потока через стенку  $i$ -го охлаждающего элемента,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $F_{охл i}$  – площадь поверхности этого элемента,  $\text{м}^2$ .

Значение плотности теплового потока для некоторых охлаждаемых элементов печи приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Значение удельных тепловых потоков на поверхность охлаждаемых подовых труб (шагающих балок) нагревательных печей

Зона печи	Тип труб (балок)	$q_{охл}$ , Вт/м <sup>2</sup>	
		без изоляции	с изоляцией
Методическая зона	Продольные подовые трубы	116	35
	Змеевик	93	98
I зона отопления	Продольные подовые трубы	116	35
	Поперечные подовые трубы	163	50
	Стояки и подводы к ним	116	35
II зона отопления	Продольные подовые трубы	163	50
	Поперечные подовые трубы	163	50
	Стояки и подводы к ним	116	35

При ориентировочных расчётах потери теплоты с охлаждающей водой принимают равным 5...10 %, от суммы статей приходной части теплового баланса [5];

- неучтённые тепловые потери принимают равными 10 % от суммы статей расходной части теплового баланса без учёта потерь теплоты с уходящими газами

$$Q_{неуч} = 0,1 \cdot (Q_{т.п} + Q_{х.н} + Q_{м.н} + Q_{кл} + Q_{изл} + Q_{охл}), \text{ кДж/ч.} \quad (4.15)$$

Из уравнения теплового баланса (4.1) определяют расход топлива.

### 4.3. Оценка энергетического совершенствования печи

Для анализа структуры теплоносителей и тепловых потерь результаты расчёта теплового баланса необходимо свести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Структура теплового баланса

Приход теплоты			Расход теплоты		
Наименование статьи	Количество теплоты		Наименование статьи	Количество теплоты	
	кДж/ч	%		кДж/ч	%
$Q_{x.t}$			$Q_{т.п}$		
$Q_{ф.в}$			$Q_{у.г}$		
$Q_{экз}$			$Q_{х.н}$		
			$Q_{м.н}$		
			$Q_{кл}$		
			$Q_{изл}$		
			$Q_{охл}$		
			$Q_{неуч}$		
ИТОГО:			ИТОГО:		

Анализ данных табл. 4.3 позволяет определить возможные варианты рационализации топливоиспользования.

Для количественной оценки энергетического совершенства промышленной печи служат следующие показатели:

- удельный расход условного топлива

$$b = \frac{B \cdot Q_n^p}{29300P}, \text{ кг у.т./кг.} \quad (4.16)$$

По данным [4] для нагревательных печей нормированное значение удельного расхода условного топлива составляет от 0,16 до 0,25 кг у.т/кг.

- технологический КПД печи

$$\eta_{тех} = \frac{Q_{m.n}}{Q_{x.m} + Q_{экз}} \cdot 100, \% \quad (4.17)$$

- энергетический КПД печи

$$\eta_{энерг} = \frac{Q_{m.n} + Q_{вэр}}{Q_{x.m} + Q_{экз}} \cdot 100, \%, \quad (4.18)$$

где  $Q_{вэр}$  – количество использованных вторичных энергетических ресурсов печи, кДж/ч.

## 5. РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ПОДОГРЕВ ВОЗДУХА

По данным [7] дымовые газы, покидающие рабочее пространство нагревательных печей непрерывного действия, имеют температуру от 700 до 1100 °С и поэтому уносят с собой значительное количество теплоты. Одним из вариантов использования части этой теплоты является регенеративный подогрев воздуха, подаваемого в зону горения. Это позволит не только повысить температуру горения топлива, но и обеспечит его значительную экономию. Величина экономии топлива определяется из следующего соотношения:

$$\varepsilon = \frac{h_g}{Q_n^p + h_g - h_z} \cdot 100, \% , \quad (5.1)$$

где  $h_g$  – энтальпия подогретого воздуха, кДж/м<sup>3</sup>;  $h_z$  – энтальпия продуктов сгорания на выходе из печи, кДж/м<sup>3</sup>.

Численная иллюстрация соотношения (5.1), при использовании в качестве топлива природного газа с  $Q_n^p = 35600$  кДж/м<sup>3</sup> при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,1$  показана на рис. 5.1.

В качестве теплообменного аппарата для регенеративного подогрева воздуха в нагревательных печах непрерывного действия применяют рекуператора конвективного и радиационного типа.

При выполнении конструктивного теплового расчёта рекуперативного воздухоподогревателя исходными данными является:

- объёмные расходы продуктов сгорания и воздуха при нормальных условиях, которые вычисляются по формулам:

$$V_z = v_z \cdot B , \text{ м}^3/\text{с}; \quad (5.2)$$

$$V_g = v_g \cdot B , \text{ м}^3/\text{с}, \quad (5.3)$$

где  $v_2$ ,  $v_6$  – удельные расходы продуктов сгорания и воздуха,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , (см. (1.2), (1.7));

- начальная температура теплоносителей  $t'_2$ ,  $t'_6$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;

- конечная температура воздуха  $t''_6$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

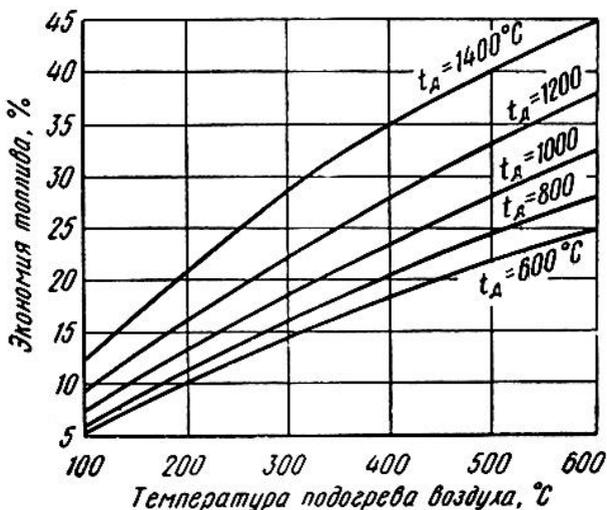


Рис. 5.1. Экономия топлива за счёт регенеративного подогрева воздуха

Конечная температура продуктов сгорания вычисляется из уравнения теплового баланса воздухоподогревателя:

$$Q = V_2 c_2 (t'_2 - t''_2) \eta = V_6 c_6 (t'_6 - t''_6) \eta, \text{ кВт/ч} \quad (5.4)$$

где  $Q$  – тепловой поток, кВт;  $c_2$ ,  $c_6$  – средние объёмные изобарные теплоёмкости продуктов сгорания и воздуха,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$ , (см. приложение 12);  $\eta$  – коэффициент, учитывающий потери теплоты в окружающую среду. По данным [7]  $\eta = 0,9 \dots 1,0$ .

Целью конструктивного теплового расчёта является определение требуемой поверхности теплообмена рекупера-

тора, величина которой вычисляется из уравнения теплопередачи:

$$Q = 10^{-3} \cdot kF\bar{\Delta}t_l, \text{ кВт}, \quad (5.5)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\bar{\Delta}t_l$  – среднелогарифмический температурный напор, °С.

Коэффициент теплоотдачи рекуперативного воздухоподогревателя определяется по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_z} + \frac{1}{\alpha_e} + R_l}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (5.6)$$

где  $\alpha_z$ ,  $\alpha_e$  – коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности теплообмена и от поверхности теплообмена к воздуху, соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $R_l$  – суммарное термическое сопротивление поверхности теплообмена с учётом её загрязнений, (м<sup>2</sup> К)/Вт.

Среднелогарифмический температурный напор рекуператора равен

$$\bar{\Delta}t_l = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}} \cdot \varepsilon \Delta t, \text{ } ^\circ\text{С}, \quad (5.7)$$

где  $\Delta t_{\delta}$ ,  $\Delta t_m$  – большая и меньшая разность температур теплоносителей, °С;  $\varepsilon \Delta t$  – поправка, учитывающая схему движения теплоносителей.

При прямоточной и противоточной схемах движения  $\varepsilon \Delta t = 1$ , при перекрытой схеме движения температурный напор вычисляется для противоточной схемы движения, а величина поправки определяется по графикам, приведённым на рис. 5.2.

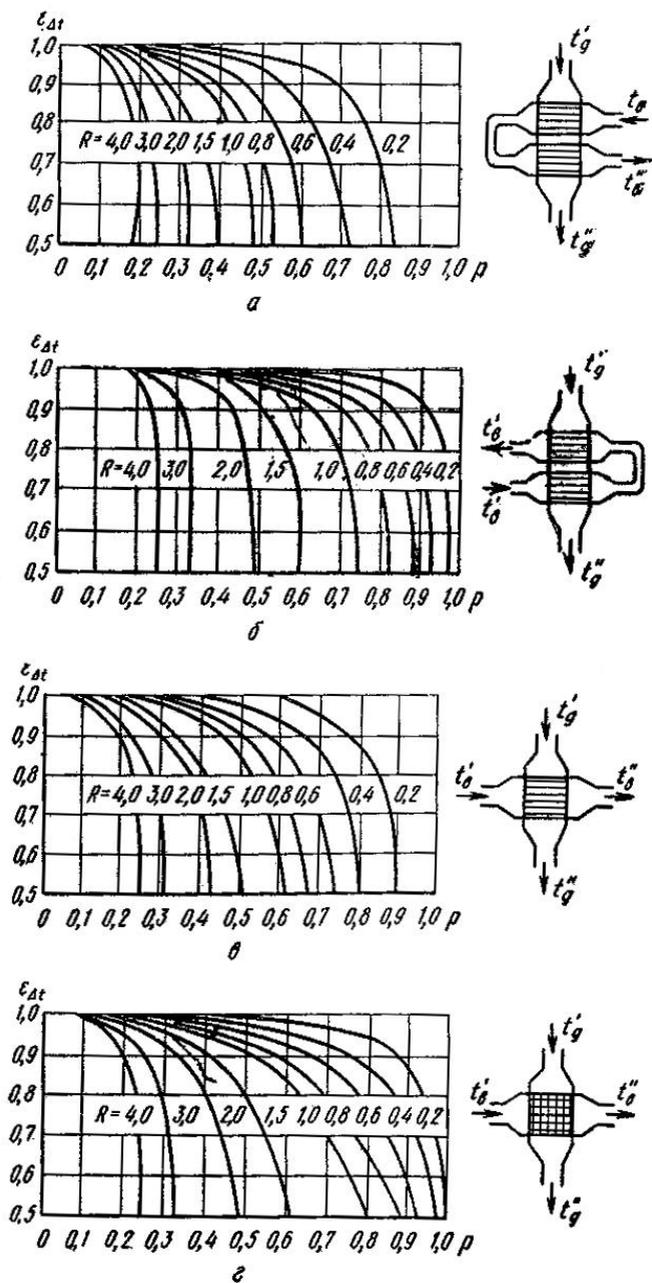


Рис. 5.2. Поправочный коэффициент  $\epsilon_{\Delta t}$

Вспомогательные параметры  $p$  и  $R$  на рис. 5.2 вычисляются по формулам

$$p = \frac{t'_2 - t''_2}{t''_6 - t'_6}; \quad R = \frac{t''_6 - t'_6}{t'_2 - t'_6}. \quad (5.8)$$

Обязательной частью теплового расчёта рекуператора является определение максимальной температуры его теплопередающей поверхности:

$$t = \frac{\alpha_2 t'_2 + \alpha_6 t''_6}{\alpha_2 + \alpha_6}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (5.9)$$

Величина этой температуры не должна превышать допустимых значений для материала, из которого поверхность теплообмена сделана. По данным [7] максимальная температура обыкновенной углеродистой стали составляет от 450 до 550 °С, жаропрочных сталей от 800 до 1050 °С, жаропрочных чугунов от 600 до 1000 °С, огнеупорного шамота от 1610 до 1750 °С, карбошамота 1690 °С.

### **5.1. Расчёт конвективного рекуператора из гладких стальных труб**

Принципиальная схема конвективного рекуператора из гладких стальных труб показана на рис. 5.3.

Поверхность теплообмена такого воздухоподогревателя выполняется из цельнотянутых стальных труб с внутренним диаметром от 15 до 100 мм и толщиной стенки от 2 до 5 мм. Трубы сварены в верхнюю и нижнюю решётки, образуя шахматный трубный пучок. Рекуператор является многоходовым по воздуху, поэтому межтрубное пространство разделено перегородками.

Конструктивный тепловой расчёт рекуператора производят в следующей последовательности.

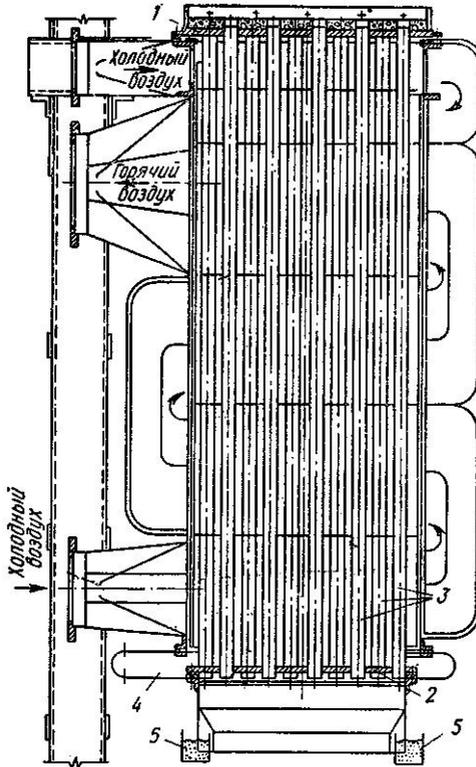


Рис. 5.3. Четырёхходовой трубчатый рекуператор для печей среднего размера:

1 – верхняя дырчатая доска; 2 – нижняя дырчатая доска; 3 – трубы рекуператора; 4 – компенсатор; 5 – песочные затворы

Задаёмся скоростями теплоносителей, отнесёнными к нормальным условиям:

$$\omega_2^H = 3 \text{ м/с}; \quad \omega_8^H = 8 \text{ м/с}.$$

Определяем необходимое проходное сечение дымовых газов и воздуха:

$$f_2 = \frac{V_2}{\omega_2^H}, \text{ м}; \quad f_8 = \frac{V_8}{\omega_8^H}, \text{ м}. \quad (5.10)$$

Проходное сечение одной трубы равно

$$\omega = 0,785 \cdot d_{\text{вн}}^2, \text{ м}^2, \quad (5.11)$$

где  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубки, м.

Необходимое количество трубок рекуператора

$$n = \frac{f_2}{\omega}, \text{ шт.} \quad (5.12)$$

Полагая, что трубный пучок имеет в плане форму квадрата, определяем количество трубок по ходу движения воздуха и в поперечном нагревании

$$n_1 = \sqrt{n}, \text{ шт.}; \quad n_1 = n - n_1, \text{ шт.} \quad (5.13)$$

Вычисляем шаги расположения трубок в трубном пучке

$$S_1 = S_2 = 1,5d_n, \quad (5.14)$$

где  $d_n$  – наружный диаметр трубы, м.

Тогда высота одного хода воздуха (расстояние между перегородками межтрубного пространства) будет равна

$$e = \frac{f_2}{(S_2 - d_n)n_2}, \text{ м.} \quad (5.15)$$

Для определения конвективного коэффициента теплоотдачи от поверхности теплообмена к воздуху вычисляем:

- среднюю температуру воздуха

$$\bar{t}_e = \frac{t'_e + t''_e}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (5.16)$$

- действительную скорость воздуха при этой температуре

$$\omega_e = \omega_e'' \frac{273 + \bar{t}_e}{273}, \text{ м/с.} \quad (5.17)$$

Конвективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_e$  определяем по номограмме, приведённой на рис. 5.4.

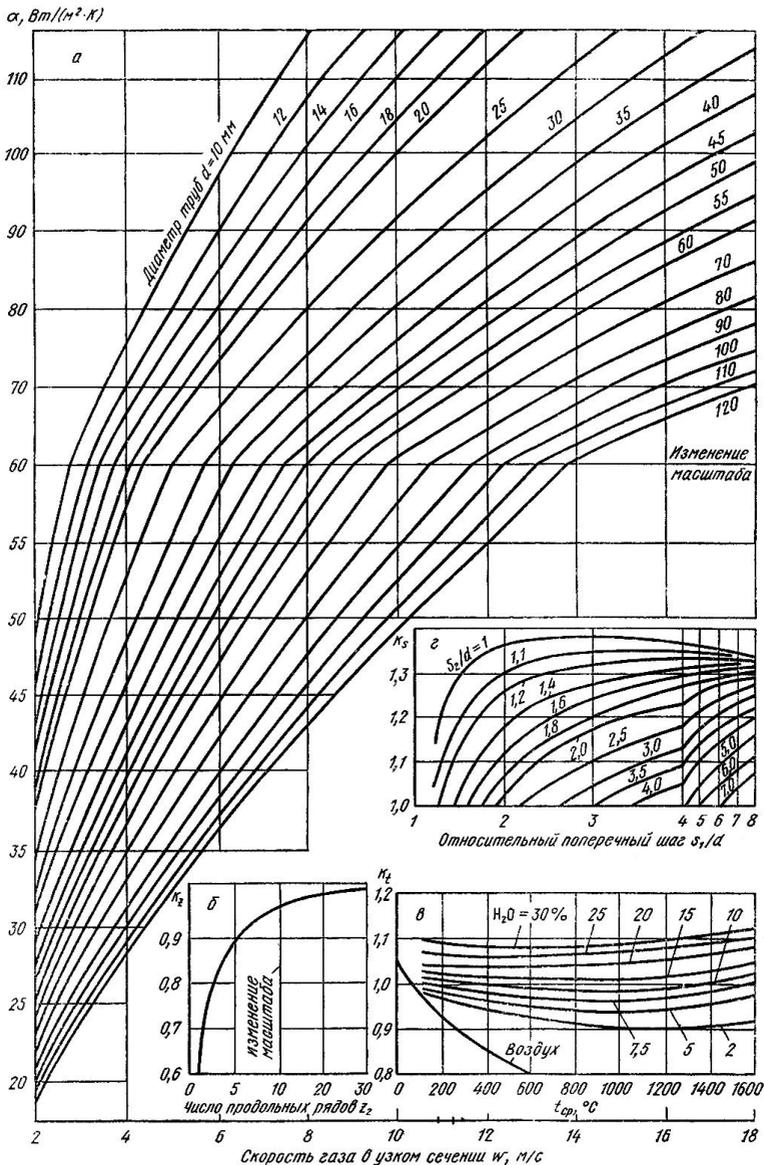


Рис. 5.4. Коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha$  при поперечном обтекании гладкотрубного пучка с шахматным расположением: а – коэффициент теплоотдачи; б – поправка на число рядов  $k_z$ ; в – поправка на температуру  $k_i$ ; г – поправка на относительный шаг труб  $k_s$

Для определения конвективного коэффициента теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности теплообмена вычисляем:

- среднюю температуру продуктов сгорания

$$\bar{t}_2 = \frac{t'_2 + t''_2}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (5.18)$$

- действительную скорость продуктов сгорания при этой температуре

$$\omega_2 = \omega_2^n \frac{273 + \bar{t}_2}{273}, \text{ м/с.} \quad (5.19)$$

Конвективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2^k$  определяем по номограмме, приведённой на рис. 5.5.

Лучистый коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности теплообмена  $\alpha_2^l$  определяем в соответствии с [7] по формуле

$$\alpha_2^l = 1,163M \left( \varepsilon_{RO_2} + \varepsilon_{H_2O} \right), \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (5.20)$$

где  $M$  – параметр, определяемый по номограмме, приведённой на рис. 5.6.

Ориентировочная температура поверхности теплообмена (стенки) будет равна:

$$t_{cm} = \frac{\bar{t}_6 + \bar{t}_2}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5.21)$$

Степень черноты трёхатомных газов и водяных паров определяется по номограмме, приведённой на рис. 3.1 – 3.3, при этом эффективная толщина излучающего слоя вычисляется по формуле

$$l_{эф} = 0,9d_{вн}, \text{ м}, \quad (5.22)$$

а парциальное давление принимается таким же, как и в рабочем пространстве печи.

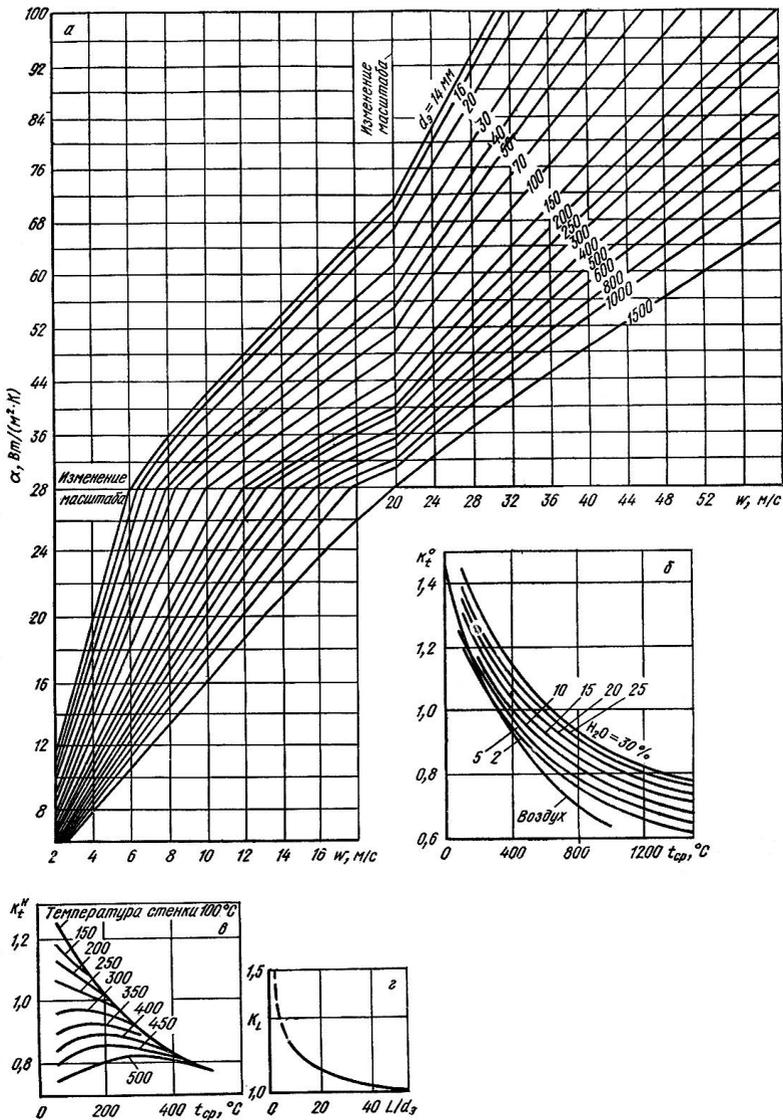


Рис. 5.5. Коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha$  при принудительном движении воздуха и продуктов сгорания в канале в турбулентном режиме: а – коэффициент теплоотдачи; б – поправка на неизо-термичность при остывании газа  $k_t^o$ ; в – поправка на неизо-термичность при нагреве газа  $k_t^H$ ; г – поправка на начальный участок  $k_L$

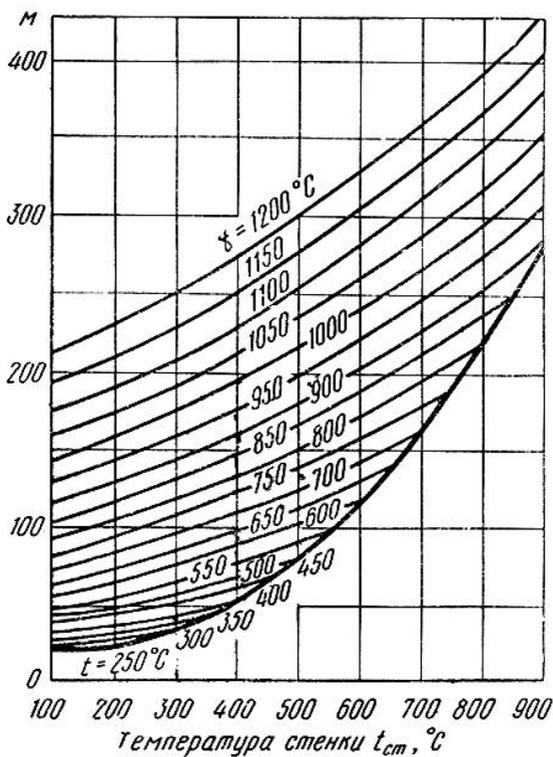


Рис. 5.6. Зависимость параметров  $M$  от температуры дымовых газов и поверхности теплообмена.

Суммарный коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности теплообмена определяется по формуле

$$\alpha_2 = \alpha_2^k + \alpha_2^l, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (5.23)$$

По формуле (5.6) вычисляем коэффициент теплопередачи воздухоподогревателя, полагая, что для металлической поверхности теплообмена  $R_{\eta} \approx 0$ .

По формуле (5.7) вычисляем среднелогарифмический температурный напор, а из (5.5) – требуемую поверхность теплообмена.

При среднем диаметре трубок

$$d_{cp} = \frac{d_n + d_e}{2}, \text{ м} \quad (5.24)$$

длина трубного пучка будет равна

$$L = \frac{F}{\pi d_{cp} n}, \text{ м}, \quad (5.25)$$

а количество ходов по воздуху

$$z = \frac{L - L_1}{b}, \text{ шт}, \quad (5.26)$$

где  $L_1 = (0,2 \dots 0,3)$  – высота защитного хода в верхней части рекуператора, м (см. рис. 5.3).

По формуле (5.9) вычисляем максимальную температуру стенки и сравниваем её с допустимым значением.

## 5.2. Расчёт радиационного щелевого рекуператора

Принципиальная схема щелевого радиационного подогревателя показана на рис. 5.7. Такие рекуператоры состоят из двух concentрических цилиндров, сваренных из листов жаропрочной стали толщиной от 6 до 10 мм. По внутреннему цилиндру проходят дымовые газы, а в кольцевой щели между цилиндрами – нагреваемый воздух. Диаметр внутреннего цилиндра, т.е. дымового канала, в зависимости от размеров рекуператора колеблется от 0,5 до 3,5 м. Ширину кольцевого пространства, т.е. щели для прохождения нагреваемого воздуха, принимают равной от 8 до 60 мм. На обоих концах рекуператора расположены кольцевые коробки, служащие для подвода и отвода нагреваемого воздуха, причём для более равномерного распределения по кольцевой щели подвод воздуха производят тангенциально.

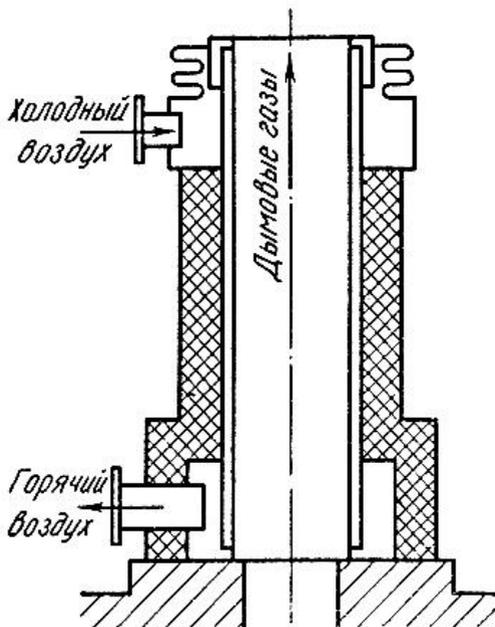


Рис. 5.7. Принципиальная схема щелевого радиационного подогревателя

Конструктивный тепловой расчёт рекуператора производят в следующей последовательности.

Задаёмся скоростью движения воздуха, отнесённой к нормальным условиям в соответствии с [7]:

$$\omega_1^H = 10 \dots 40 \text{ м/с.}$$

Задаёмся скоростью движения дымовых газов, отнесённой к нормальным условиям в соответствии с [7]:

$$\omega_2^H = 0,5 \dots 1,0 \text{ м/с.}$$

Определим необходимое проходное сечение для дымовых газов и воздуха (5.10).

Внутренний диаметр дымового канала

$$d_2^e = \sqrt{\frac{f_2}{0,785}}, \text{ м.} \quad (5.27)$$

При толщине листов стали  $\delta$ , определяем внутренний диаметр кольцевой щели:

$$d_2^e = d_2^e + 2\delta, \text{ м.} \quad (5.28)$$

Наружный диаметр кольцевой щели:

$$d_2^H = \sqrt{\frac{f_2 + 0,785(d_2^H)^2}{0,785}}, \text{ м} \quad (5.29)$$

Для определения конвективного коэффициента теплоотдачи от поверхности теплообмена к воздуху, вычисляем:

- среднюю температуру воздуха (5.16);
- действительную скорость воздуха (5.17);
- периметр воздушного канала

$$\Pi = \pi(d_2^e + d_2^H), \text{ м;} \quad (5.30)$$

- эквивалентный диаметр воздушного канала

$$d_2^e = \frac{4f_2}{\Pi}, \text{ м;} \quad (5.31)$$

- конвективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2^k$  (рис. 5.5).

Для определения конвективного коэффициента теплоотдачи от дымовых газов и поверхности теплообмена вычисляем:

- среднюю температуру продуктов сгорания (5.18);
- действительную скорость продуктов сгорания (5.19);
- конвективный коэффициент теплоотдачи (5.5).

Лучистый коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности теплообмена вычисляем по формуле (5.20).

При этом среднюю температуру поверхности теплообмена (стенки) вычисляем по (5.21), а эффективную толщину излучающего слоя – по (5.22).

Суммарный коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания определяем по (5.23), коэффициент теплопередачи – по (5.6), среднелогарифмический температурный напор для противоточной схемы движения – по (5.7), средний диаметр теплопередающей поверхности – по (5.24), а высоту рекуператора – по (5.25).

Учитывая недостаточно полное использование поверхности теплообмена в местах входа и выхода воздуха из рекуператора, принимаем окончательно его высоту на 10...15 % больше значения, полученного по формуле (5.25).

По формуле (5.9) вычисляем максимальную температуру поверхности теплопередачи и сравниваем её с допустимым значением.

## 6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ (ВЭР)

Под вторичными энергетическими ресурсами подразумевают энергетический потенциал продуктов и отходов, который не используется в самом теплотехнологическом агрегате, но может быть частично или полностью использован для энергоснабжения других агрегатов.

Основным ВЭР нагревательных печей непрерывного действия является физическая теплота уходящих продуктов сгорания топлива. По данным [7] потери теплоты с уходящими газами составляют от 30 до 45 % от расходной части теплового баланса и для использования этой теплоты применяют котлы-утилизаторы (КУ) [8, 9]. Пар, выработанный в КУ, применяется для технологических нужд или для отопления, вентиляции горячего водоснабжения.

По компоновке поверхностей нагрева и газового тракта различают газотрубные и водотрубные КУ. Основная особенность газотрубных КУ заключается в движении продуктов сгорания внутри труб поверхностей нагрева. Эти КУ характеризуются простотой, высокой газоплотностью, пониженными требованиями к питательной воде. К основным недостаткам подобного типа КУ относятся низкий коэффициент полезного действия (от 50 до 60 %) и низкое давления получаемого пара (от 1,5 до 2 МПа). Кроме того, внутренние поверхности быстро загрязняются технологическим уносом, поэтому необходимо применять чистку труб с затратой большого количества ручного труда. В связи с этим применение газотрубных КУ целесообразно для печей небольшой производительности.

В зависимости от конструктивного оформления газотрубные КУ подразделяют на горизонтальные и вертикальные. Технические и конструктивные характеристики газотрубных КУ приведены в табл. 6.1 – 6.3.

Основной особенностью водотрубных КУ является змеевиковая компоновка поверхностей нагрева и многократная принудительная циркуляция пароводяной смеси. Эти КУ рас-

считаны на температуру продуктов сгорания от 600 до 850 °С и предназначена для получения перегретого пара давлением от 1,8 до 4,5 МПа и температурой от 340 до 400 °С.

Технические и конструктивные характеристики водотрубных КУ приведены в табл. 6.4, 6.5.

Исходные данные для выбора типа КУ являются:

- объёмный расход продуктов сгорания на выходе из печи (5.2);

- температура продуктов сгорания на входе в КУ

$$t'_2 = t_{y2} - 50, \text{ °С.} \quad (6.1)$$

Параметры получаемого пара принимаются равными номинальным значениям (табл. 6.1, 6.2, 6.4, 6.5), а температура питательной воды –  $t_{n.в} = 100 \text{ °С}$ .

Целью проверочного теплового расчёта КУ является определение паропроизводительности котла, которая не должна отличаться более, чем на 10 % от её номинального значения.

Таблица 6.1

## Теплотехнические и конструктивные характеристики газотурбинных горизонтальных КУ

	Типоразмер котла						
	Г-250	Г-250П	Г-345	Г-345П	Г-550П	Г-400ПЭ	Г-105/300БТ
Паропроизводительность, т/ч	3,2	3,1	8,1	7,9	11,6	7,5	7,6
Параметры пара:							
- давление, МПа	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,6	0,5
- температура, °С	194	240	194	260	280	230	151
Состояние пара	Насыщенный	Перегретый	Насыщенный	Перегретый	То же	» »	Насыщенный
Площадь поверхности нагрева, м <sup>2</sup> :							
- радиационной	-	-	-	-	-	-	-
- конвективной	250	250	345	345	550	400	I-105 II-300
- пароперегревателя	-	5	-	10	18	18	-
- экономайзера	-	-	-	-	-	372+ +283	-
- воздухоподогревателя	-	-	-	-	-	-	-
Характеристика используемых газов:							
- расход, тыс.м <sup>3</sup> /ч	16	16	40	40	55	66,5	7,4
- температура на входе, °С	600	600	600	600	600	405	I-1285 II-400
- температура на выходе, °С	270	260	260	250	240	185	400

Продолжение табл. 6.1

	Типоразмер котла						
	Г-105/300 БЦ	Г-150	Г-1240 БЦИ	Г-420	Г-420 БПЭ	Г-950	Г-1250Э
Паропроизводительность, т/ч	7,2-10,0	0,53	57,0	1,0	25	5,9	90
Параметры пара:							
- давление, МПа	0,5	0,5	2,4	0,5	1,5	0,5	1,0
- температура, °С	151	151	223	151	250	151	146
Состояние пара	Насыщен- ный	То же	» »	» »	Пере- гретый	Насы- щенный	Пит. вода
Площадь поверхности нагрева, м <sup>2</sup> :							
- конвективной	I-105 II-300	I-75 II-75	1240+ +52,5	I-210 II-210	420	I-475 II-475	-
- пароперегревателя	-	-	-	-	5,7	-	-
- экономайзера	-	-	-	-	500	-	1250
- воздухоподогревателя	-	-	-	-	-	-	-
Характеристика используемых газов:							
- расход, тыс.м <sup>3</sup> /ч	8-10 2-3	I-229 II-244	27-37 77,8	I-7,26 II-7,55	56,2	I-21,9 II-23,8	76,6
- температура на входе, °С	I-1300 II-460	I-360 II-250	1074	I-280 II-240	900	I-287 II-373	235
- температура на выходе, °С	460 160	168 159	-	160 155	105	157 161	132

Продолжение табл. 6.1

	Типоразмер котла						
	СКУ-0,5/4	СКУ-1/4	СКУ-1,7/4	СКУ-7,6/4	СКУ-7/25	Н 140	КУН 3,2/11
Паропроизводительность, т/ч	0,5	1,0	1,7	7,6	7,0	2,0	3,2
Параметры пара:							
- давление, МПа	0,4	0,4	0,4	0,	2,4	0,7	1,1
- температура, °С	-	-	-	-	-	-	-
Состояние пара	Насыщенный	» »	» »	» »	» »	» »	» »
Площадь поверхности нагрева, м <sup>2</sup> :							
- радиационной	-	-	-	-	-	-	-
- конвективной	136	382	134	437	192	140	295
- пароперегревателя	-	-	-	-	-	-	-
- экономайзера	-	-	-	-	-	-	-
- воздухоподогревателя	-	-	-	-	-	-	-
Характеристика используемых газов:							
- расход, тыс.м <sup>3</sup> /ч	2,439	7,577	2,185	7,4	16,0	5,0	11,0
- температура на входе, °С	635	555	1220	1560	1475	1050	1075
- температура на выходе, °С	440	435	440	440	745	450	500

Продолжение табл. 6.1

	Типоразмер котла						
	КУН-22/13	КУН-24/16	КУГ-66	Г-60БТ	Г-145Б	Г-175БТ	Г-330Б
Паропроизводительность, т/ч	22,0	24,0	7,9	До 2,0	4,7	9,5	8,6
Параметры пара:							
- давление, МПа	1,4	1,6	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4
- температура, °С	230	250	275	194	194	194	194
Состояние пара	Перегретый	» »	» »	Насыщенный	» »	» »	» »
Площадь поверхности нагрева, м <sup>2</sup> :							
- радиационной	-	-	-	-	-	-	-
- конвективной	332	254	485	60	145	175	330
- пароперегревателя	6,0	5,7	18,0	-	-	-	-
- экономайзера	-	-	-	-	-	-	-
- воздухоподогревателя	-	-	-	-	-	-	-
Характеристика используемых газов:							
- расход, тыс.м <sup>3</sup> /ч	54,0	56,2	66,0	4,4 14,8	8,0	2,0-3,0 82	15,0
- температура на входе, °С	800	1175	680	1444	1200	1280	1200
- температура на выходе, °С	245	525	460	300	280	160	320

Продолжение табл. 6.1

	Типоразмер котла						
	Г-330БИ	Г-445Б	Г-445БИ	Г-660Б	Г-660БИ	Г-1350Б	Г-1350БС
Паропроизводительность, т/ч	9,5	14,8	15,7	21,5	23,3	31,0	11,2
Параметры пара:							
- давление, МПа	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	0,5
- температура, °С	194	194	194	194	194	194	156
Состояние пара	Насы- щенный	» »	» »	» »	» »	» »	» »
Площадь поверхности нагрева, м <sup>2</sup> :							
- радиационной	-	-	-	-	-	-	-
- конвективной	330+15	445	460+15	660	660+14	1030	1030
- пароперегревателя	-	-	-	-	-	-	-
- экономайзера	-	-	-	-	-	-	-
- воздухоподогревателя	-	-	-	-	-	-	-
Характеристика используемых газов:							
- расход, тыс.м <sup>3</sup> /ч	15,0	25,0	25,0	35,0	25,0	50,0	78,8
- температура на входе, °С	1200	1200	1200	1200	1200	1200	370
- температура на выходе, °С	310	280	250	235	235	240	194

Окончание табл. 6.1

	Типоразмер котла			
	Г-335БП	Г-620БТ	Г-710БЦ	КУ в установках конверсии метана и оксида углерода
Паропроизводительность, т/ч	22,0	19,0	24,58	11,0
Параметры пара:				
- давление, МПа	1,5	1,4	1,3	0,6
- температура, °С	250	194	194	-
Состояние пара	Перегретый	Насыщенный	» »	» »
Площадь поверхности нагрева, м <sup>2</sup> :				
- радиационной	-	-	-	-
- конвективной	330	620	-	460
- пароперегревателя	5,7	-	-	-
- экономайзера	-	-	-	-
- воздухоподогревателя	-	-	-	-
Характеристика используемых газов:				
- расход, тыс.м <sup>3</sup> /ч	56,0	52,2 10,2	12,7 H <sub>2</sub> S 19,8 O <sub>2</sub>	51,0
- температура на входе, °С	900	1010	1024- 1300	272
- температура на выходе, °С	250	282	344-370	177

Таблица 6.2

## Теплотехнические и конструктивные характеристики газотрубных вертикальных КУ

	Типоразмер котла						
	В-350Б	В-460Б	В-90Б	Н-89	Н-180	Н-220	Н-380
Паропроизводительность, т/ч	4,0	6,6	5,0	5,0	5,0	1,4	4,86
Параметры пара:							
- давление, МПа	1,4	1,4	0,8	0,8	0,8	0,5	0,3
- температура, °С	194	194	170	170	170	151	143
Состояние пара	Насы- щенный	» »	» »	» »	» »	» »	» »
Площадь поверхности нагрева, м <sup>2</sup> :							
- радиационной	-	-	-	-	-	-	-
- конвективной	330	460	90	89	180	220	384
- пароперегревателя	-	-	-	-	-	-	-
- экономайзера	-	-	-	-	-	-	-
- воздухоподогревателя	-	-	-	-	-	-	-
Характеристика используемых газов:							
- расход, тыс.м <sup>3</sup> /ч	40,0	60,0	25,0	25,0	32,6	9,43	15,0
- температура на входе, °С	400	400	850	850	420	650	750
- температура на выходе, °С	240	225	560	560	180	250	240

Продолжение табл. 6.2

	Типоразмер котла					
	Н-433	Н-495	ГТКУ-6/40	ГТКУ-10/40	ГТКУ-25/40	КУ в установке конверсии метана и СО
Паропроизводительность, т/ч	9,4	4,1	7,1	10,2	23,6	9,45
Параметры пара:						
- давление, МПа	0,5	1,4	3,9	3,9	3,9	0,6
- температура, °С	151	191	249	440	440	
Состояние пара	Насыщенный	» »	» »	Перегретый	» »	Насыщенный
Площадь поверхности нагрева, м <sup>2</sup> :						
- радиационной	-	-	-	-	-	-
- конвективной	433	495	186,6+24	306+18,5	617+32	460
- пароперегревателя	-	-	-	17,8	39,7	-
- экономайзера	-	-	-	-	-	-
- воздухоподогревателя	-	-	-	-	-	-
Характеристика газов:						
- расход, тыс.м <sup>3</sup> /ч	62,5	12,6	10,6	19,4	43,97	45,0
- температура на входе, °С	430	580	850	950	1375	
- температура на выходе, °С	180	300	420	450	775	

Таблица 6.3

## Теплотехнические и конструктивные характеристики газотрубных вертикальных КУ

	Типоразмер котла					
	Г-250	Г-250П	Г-345	Г-345П	Г-145Б	Г-330Б
Дымогарные трубы:						
- диаметр и толщина $d \times \delta$ , мм	50×3	50×3	50×3	50×3	50×3	50×3
- количество $n$ , шт	500	500	500	500	212	648
- суммарное внутреннее сечение $\Sigma f_{вн}$ , м <sup>2</sup>	0,76	0,76	0,76	0,76	0,322	0,985
- длина $L_{тр}$ , мм	3610	3610	4960	4960	4960	3400
Испарительный барабан:						
- диаметр и толщина $D \times \delta$ , мм	2400×20	2400×20	2400×20	2400×20	1600×20	2400×20
- площадь внутреннего сечения $F_{вн}$ , м <sup>2</sup>	4,372	4,372	4,372	4,372	1,910	4,372
Барабан-паросборник:						
- диаметр и толщина $D_{н\ сб} \times \delta$ , мм	-	-	-	-	-	1226×13
- длина $L_{н\ сб}$ , мм	-	-	-	-	-	3610
Отходящие газы:						
- расход $V_2$ , м <sup>3</sup> /с	4,45	4,45	11,11	11,11	2,22	4,17
- средняя температура газов в трубах $T_2$ , К	708	703	703	703	1013	1033
- скорость газов в трубах $\omega_2$ , м/с	15,19	15,00	37,65	37,65	25,57	16,02
Коэффициент загромождения испарительного барабана $\xi = f_{н.тр}/F_{вн.б}$	0,224	0,224	0,224	0,224	0,218	0,291

Продолжение табл. 6.3

	Типоразмер котла					
	Г-445Б	Г-660Б	Г-1030Б	В-330Б	В-460Б	Г-335БП
Дымогарные трубы:						
- диаметр и толщина $d \times \delta$ , мм	50×3	50×3	50×3	50×3	50×3	50×3
- количество $n$ , шт	648	648	1032	648	648	868
- суммарное внутреннее сечение $\Sigma f_{вн}$ , м <sup>2</sup>	0,985	0,985	1,569	0,985	0,985	0,967
- длина $L_{тр}$ , мм	4960	7300	7300	3610	4960	4960
Испарительный барабан:						
- диаметр и толщина $D \times \delta$ , мм	2400×20	2400×20	2840×20	2400×20	1600×20	2400×20
- площадь внутреннего сечения $F_{вн}$ , м <sup>2</sup>	4,372	4,372	6,154	4,372	4,372	4,372
Барабан-паросборник:						
- диаметр и толщина $D_{н\ сб} \times \delta$ , мм	1226×13	1226×13	1226×13	1226×13	1226×13	1200×13
- длина $L_{н\ сб}$ , мм	4960	5840	6312	2437	3280	4960
Отходящие газы:						
- расход $V_z$ , м <sup>3</sup> /с	6,94	9,72	13,90	11,11	16,70	15,60
- средняя температура газов в трубах $T_z$ , К	1013	991	993	593	585	848
- скорость газов в трубах $\omega_z$ , м/с	26,15	35,82	32,25	24,50	36,33	36,80
Коэффициент загромождения испарительного барабана $\zeta = f_{н.тр}/F_{вн.б}$	0,291	0,291	0,329	0,291	0,291	0,216

Окончание табл. 6.3

	Типоразмер котла					
	Г-550П	Г-400ПЭ	Г-620БТ	Г-150	Г-420	Г-950
Дымогарные трубы:						
- диаметр и толщина $d \times \delta$ , мм	50×3	50×3	32×3	32×3	32×3	32×3
- количество $n$ , шт	700	790	2096	356	1044	1600
- суммарное внутреннее сечение $\Sigma f_{вн}$ , м <sup>2</sup>	1,064	1,208	0,948	0,08	0,236	0,362
- длина $L_{тр}$ , мм	4960	3610	3610	4960	4960	8100
Испарительный барабан:						
- диаметр и толщина $D \times \delta$ , мм	2840×20	2840×20	2840×20	1600×20	2400×20	2840×20
- площадь внутреннего сечения $F_{вн}$ , м <sup>2</sup>	6,154	6,154	6,154	1,910	4,372	6,154
Барабан-паросборник:						
- диаметр и толщина $D_{н\ сб} \times \delta$ , мм	-	-	1226×13	-	-	-
- длина $L_{н\ сб}$ , мм	-	-	3610	-	-	-
Отходящие газы:						
- расход $V_z$ , м <sup>3</sup> /с	15,27	18,47	7,08	0,68	2,10	6,60
- средняя температура газов в трубах $T_z$ , К	693	568	919	537	471	540
- скорость газов в трубах $\omega_z$ , м/с	36,43	31,80	25,17	16,72	13,40	36,06
Коэффициент загромождения испарительного барабана $\zeta = f_{н.тр}/F_{вн.б}$	0,231	0,252	0,274	0,150	0,192	0,209

Таблица 6.4

## Водотрубные конвективные котлы – утилизаторы

	Типоразмер котла						
	КУ-40-1	КУ-60-2	КУ-80-3	КУ-100-1	КУ-125	КУ100Б-1	КУ-150
Паропроизводительность, т/ч	12,9	19,0	25,8	32,6	40,8	32,5	50,5
	13,0	12,8	17,3	21,8	27,4	33,3	
		19,9	26,9	33,9	42,4	17,3	
		13,8	18,4	23,2	29,4		
Параметры пара:							
- давление, МПа	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	1,8	4,5
	1,8	4,5	4,5	4,5	4,5	1,8	
		1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	
		1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	
- температура, °С	385	392	385	382	385	395	393
	375	370	365	363	365	368	
		366	358	360	365	348	
		340	336	339	341		
Состояние пара	Перегретый	» »	» »	» »	» »	» »	» »
Площадь нагрева, м <sup>2</sup> :							
- конвективной	372	4 пакета	4 пакета	4 пакета	4 пакета	592	1459,1
	372	I-46 II-173 III-192 IV-175	I-60 II-219 III-244 IV-221	I-85 II-285 III-315 IV-295	I-110 II-370 III-410 IV-380		

Продолжение табл. 6.4

	Типоразмер котла						
	КУ-40-1	КУ-60-2	КУ-80-3	КУ-100-1	КУ-125	КУ100Б-1	КУ-150
- пароперегревателя	43,5 43,5	70	87	110	144	137	166
- экономайзера	185 185	247	370	460	615	497	721,1
Характеристика газов:							
- расход, тыс.м <sup>3</sup> /ч	40 40	60	80	100	125,0	100,0	150,0
- температура на входе, °С	850 850	850 650 850 650	850 650 850 650	850 650 850 650	850 650 850 650	850 650 550	850
- температура на выходе, °С	248 248	252 242 229 217	348 239 227 216	242 220 242 220	215 235 198 198	235 222 217	213

Таблица 6.5

## Расчётное-конструктивная характеристика конвективных змеевиковых унифицированных КУ

Характеристика	Типоразмер котла	Испарительные пакеты, м <sup>2</sup>				Все пакеты	Пароперегреватель	Экономайзер	Всего котла
		1-й	2-й	3-й	4-й				
Расчётная площадь поверхности нагрева $F$ , м <sup>2</sup>	КУ-40-1	30	109,5	122	110,5	372	43,5	185	600,5
	КУ-60-2	46	173	92	175	586	70	247	903
	КУ-80-3	60	219	244	221	744	87	370	1201
	КУ-100-1	85	285	315	295	980	110	460	1550
	КУ-125	110	370	410	380	1270	144	615	2050
	КУ-150	133,2	415	375	436	1459,2	166	725,1	2350
Число параллельно включённых змеевиков, $z$	КУ-40-1	18	38	38		-	19	12	-
	КУ-60-2	28	60	60		-	30* 60**	16	-
	КУ-80-3	36	76	76		-	38* 76**	24	-
	КУ-100-1	40	80	80		-	40* 80**	24	-
	КУ-125	52	104	104		-	52* 104	32	-
	КУ-150	64	120	120		-	60	32	-
Площадь живого сечения для продуктов сгорания $F_{н.с.}$ , м <sup>2</sup>	КУ-40-1	4,315	3,17	3,17	2,885	-	3,17	-	-
	КУ-60-2	7,0	5,06	5,06	4,63	-	5,06	-	-
	КУ-80-3	8,63	6,34	6,34	5,77	-	6,34	-	-
	КУ-100-1	10,8	8,04	8,04	7,35	-	8,04	-	-
	КУ-125	13,2	10,3	10,3	9,4	-	10,3	-	-
	КУ-150	16,6	12,5	12,5	11,5	-	12,5	-	-

Продолжение табл. 6.5

Характеристика	Типоразмер котла	Испарительные пакеты, м <sup>2</sup>				Все пакеты	Пароперегреватель	Экономайзер	Всего котла
		1-й	2-й	3-й	4-й				
Площадь живого сечения для пара и воды <i>f</i> , м <sup>2</sup>	КУ-40-1	0,0096	0,0202	0,0202		-	0,0101	0,0063	-
	КУ-60-2	0,0148	0,0318	0,0318		-	0,0159	0,0085	-
	КУ-80-3	0,0192	0,0404	0,0404		-	0,0202	0,0127	-
	КУ-100-1	0,0212	0,0425	0,0425		-	0,0212	0,0127	-
	КУ-125	0,0276	0,0552	0,0552		-	0,0276	0,0170	-
	КУ-150	0,0340	0,0636	0,0636		-	0,0318	0,0170	-

Примечание: \* При давлении пара 4,5 МПа

\*\* При давлении пара 1,8 Мпа

## 6.1. Расчёт жаротрубного котла-утилизатора

Принципиальная схема жаротрубного горизонтального КУ показана на рис. 6.1

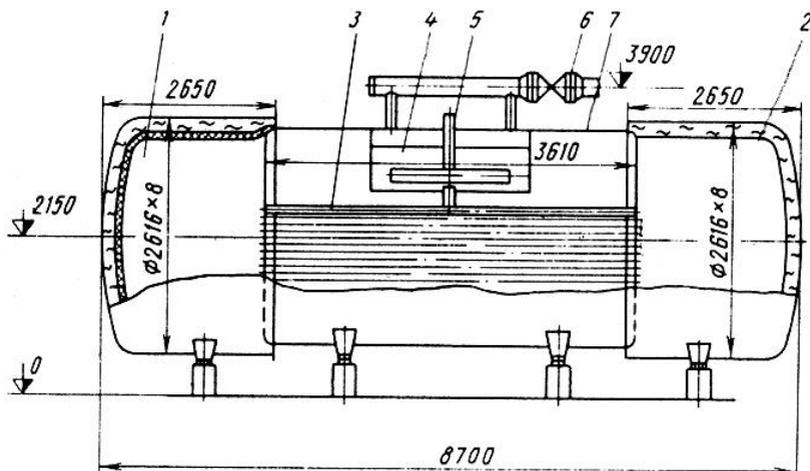


Рис. 6.1. Принципиальная схема жаротрубного горизонтального КУ:  
1 – входная камера; 2 – выходная камера; 3 – испарительная поверхность; 4 – сепарационное устройство; 5 – подвод воды; 6 – отвод пара; 7 – барабан

Проверочный тепловой расчёт производят в следующей последовательности.

Задаемся температурой продуктов сгорания на выходе из котла  $t_2''$  и по (5.7) вычисляем среднелогарифмический температурный напор, считая, что пароводяная смесь вдоль всей поверхности теплообмена находится при температуре насыщения  $t_n$ .

Для определения конвективного коэффициента теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности теплообмена вычисляем:

- среднюю температуру продуктов сгорания – по соотношению (5.18);

- скорость продуктов сгорания, отнесённую к нормальным условиям,

$$\omega_2^H = \frac{V_2}{f_{вн}}, \text{ м/с}, \quad (6.2)$$

где  $f_{вн}$  – суммарное внутреннее сечение трубного пучка,  $\text{м}^2$  (табл. 6.3);

- действительную скорость продуктов сгорания (5.19).

Конвективный коэффициент теплоотдачи определяют по номограмме, приведённой на рис. 5.5.

Пренебрегая термическим коэффициентом теплоотдачи со стороны пароводяной смеси, вычисляем коэффициент теплопередачи по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2^к} + \varepsilon}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (6.3)$$

где  $\varepsilon$  – термическое сопротивление стенки дымогарной трубы и её загрязнений. По данным [8] для жаротрубных КУ  $\varepsilon = 0,005 \dots 0,01 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Тепловой поток КУ вычисляют по (5.5), при этом площадь поверхности теплообмена определяют из табл. 6.1, 6.2.

Определяем энтальпию продуктов сгорания по формуле

$$i_2 = \frac{h_2}{V_2}, \text{ кДж}/\text{м}^3, \quad (6.4)$$

где  $h_2$  – удельная энтальпия продуктов сгорания, отнесённая к единице количества топлива (1.13);  $V_2$  – удельный выход продуктов сгорания (1.7).

Для удобства дальнейших расчётов необходимо построить  $i_2 - t$  – диаграмму продуктов сгорания.

Определяем энтальпию продуктов сгорания на выходе из КУ по формуле

$$i_2'' = i_2' - \frac{Q}{V_2 \varphi}, \text{ кДж/м}^3, \quad (6.5)$$

где  $i_2'$  - энтальпия продуктов сгорания на входе в КУ;  $\varphi = 0,95$  – коэффициент сохранения теплоты [8].

По  $i_2-t$  – диаграмме определяем температуру продуктов сгорания на выходе из КУ и сравниваем её с принятым ранее значением. Если полученная температура отличается более, чем на 5 %, задаёмся новым значением  $i_2''$  и расчёт повторяем.

Определяем паропроизводительность КУ по формуле

$$D = \frac{Q}{i_n'' - i_{n.e} + 0,01n(i_n' - i_{n.e})}, \text{ кг/с}, \quad (6.6)$$

где  $i_n'$ ,  $i_n''$  - энтальпия кипящей воды и насыщенного пара, кДж/кг (см. приложение 13, 14);  $i_{n.e} = 4,19 \cdot t_{n.e}$  кДж/кг – энтальпия питательной воды;  $n$  – величина непрерывной продувки котла. По данным [8] для жаротрубных КУ  $n = 5$  %.

## 6.2. Расчёт водотрубного котла-утилизатора

Принципиальная схема водотрубного КУ показана на рис. 6.2.

Проверочный тепловой расчёт поверхностей нагрева производят по ходу движения продуктов сгорания, принимая их параметры на выходе из предыдущей секции равными входным параметрам для последующей секции.

Расчёт среднелогарифмического температурного напора для каждой секции КУ производим по формуле (5.7), считая схему движения теплоносителя противоточной.

Скорость продуктов сгорания определяем по формулам (5.18), (5.19), (6.2), а площадь проходного сечения из табл. 6.6. Конвективный коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности теплообмена определяем по номограмме, приведённой на рис. 5.4.

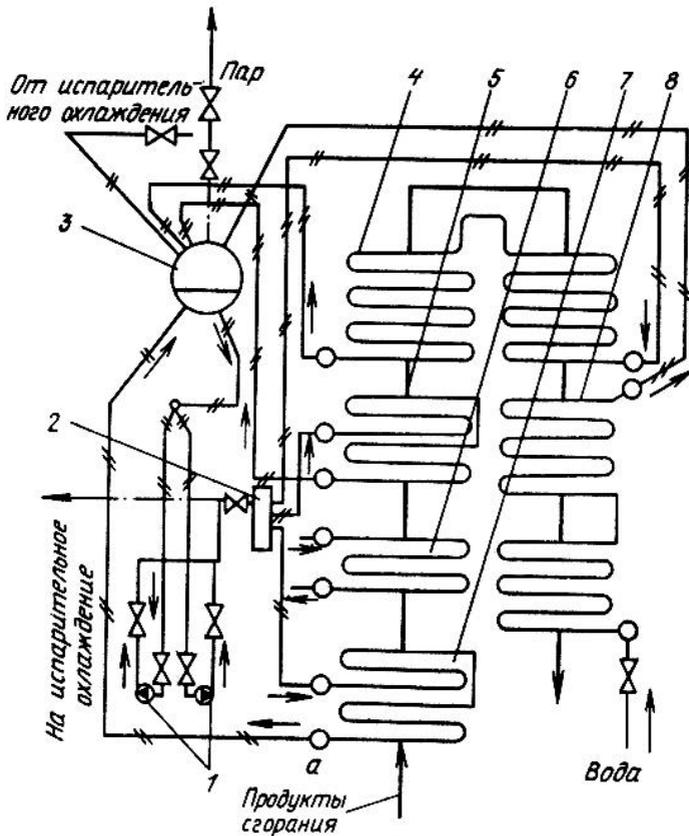


Рис. 6.2 Принципиальная схема водотрубного КУ:

- 1 – циркуляционный насос; 2 – шламоотделитель; 3 – барабан;  
 4 – третья испарительная секция; 5 – вторая испарительная секция;  
 6 – пароперегреватель; 7 – первая испарительная секция;  
 8 – экономайзер

Принимаем лучистый коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности теплообмена, равным 10 % от конвективного коэффициента теплоотдачи.

Вычисляем коэффициент теплопередачи в секции в соответствии с [9] по формуле

$$k = \alpha_2^k + \alpha_2^l, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (6.7)$$

По формуле (5.5)(5.5) определяем тепловой поток в секции КУ, при этом площадь поверхности теплообмена выписываем из табл. 6.6.

Строим  $i_2 - t$  – диаграмму продуктов сгорания, вычисляя их энтальпии по формуле (6.4).

Определяем энтальпию (6.5) и температуру ( $i_2 - t$  – диаграмма) на выходе из секции и при необходимости задаёмся другим значением температуры продуктов сгорания на выходе из секции и расчёты повторяем.

Определяем энтальпию перегретого пара на входе из пароперегревателя:

$$i_{nn} = \frac{Q_k i_n'' - Q_{nn} [i_{n.в} + 0,01n(i_n' - i_{n.в})]}{Q_k - Q_{nn}}, \text{ кДж/кг}, \quad (6.8)$$

где  $Q_k$  – суммарный тепловой поток в КУ, кВт;  $Q_{nn}$  – тепловой поток в пароперегревателе, кВт.

Суммарный тепловой поток определяется по формуле

$$Q_k = V_2 (i_2' - i_2'') \varphi, \text{ кВт}, \quad (6.9)$$

где  $i_2'$ ,  $i_2''$  – энтальпия продуктов сгорания на входе и на выходе из КУ, кДж/м<sup>3</sup>;

Определяем паропроизводительность КУ по формуле:

$$D = \frac{Q_{nn}}{i_{nn} - i_n''}, \text{ кг/с}. \quad (6.10)$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П1

### Природные газы

Газопровод	Состав газа по объёму, %							Низшая теплота сгорания сухого газа, кДж/м <sup>3</sup>
	СН <sub>4</sub>	С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub>	С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub>	С <sub>5</sub> Н <sub>12</sub> и более тяжё- лые	Н <sub>2</sub>	СО <sub>2</sub>	
Минск – Москва	92,8	3,9	1,1	0,4	0,1	1,6	0,1	37400
Бухара – Урал	94,9	3,2	0,4	0,1	0,1	0,9	0,4	36700
Газли – Каган	95,4	2,6	0,3	0,2	0,2	1,1	0,2	36600
Газли - Каган - Ташкент	94	2,8	0,4	0,3	0,1	2	0,4	36300
Гоголево - Полтава	85,8	0,2	0,1	0,1	0	13,7	0,1	31000
Дашава - Киев	98,9	0,3	0,1	0,1	0	0,4	0,2	35800
Джаркак - Ташкент	95,5	2,7	0,4	0,2	0,1	1	0,1	36700
Игрим - Пунга - Серов - Нижний Тагил	95,7	1,9	0,5	0,3	0,1	1,3	-	36500
Карабулак - Грозный	68,5	14,5	7,6	3,5	1	3,5	1,4	45800
Карадаг - Тбилиси - Ереван	93,9	3,1	1,1	0,3	0,1	1,3	0,2	37100
Коробки - Жирное - Камышин	81,5	8	4	2,3	0,5	3,2	0,5	41500

## Продолжение табл. П1

Газопровод	Состав газа по объёму, %							Низшая теплота сгорания сухого газа, кДж/м <sup>3</sup>
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</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> и более тяжё- лые	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	
Коробки - Лог - Волгоград	93,2	1,9	0,8	0,3	0,1	3	0,7	35900
Кумертау - Ишимбай - Магнитогорск	81,7	5,3	2,9	0,9	0,3	8,8	0,1	36800
Линево - Кологривовка - Вольск	93,2	2,6	1,2	0,7	-	2	0,3	37000
Оренбург - Совхозное	91,4	4,1	1,9	0,6	-	0,2	0,7	38000
Первомайск - Сторожевка	62,4	3,6	2,6	0,9	0,2	30,2	0,1	28300
Промысловка - Астрахань	97,1	0,3	0,1	0	0	2,4	0,1	35100
Рудки - Минск - Вильнюс и Рудки – Минск	95,6	0,7	0,4	0,2	0,2	2,8	0,1	35500
Саратов - Горький	91,9	2,1	1,3	0,4	0,1	3	1,2	36200
Саратов - Москва	84,5	3,8	1,9	0,9	0,3	7,8	0,8	35900
Саушино - Лог - Волгоград	96,1	0,7	0,1	0,1	0	2,8	0,2	35100
Серпухов - Ленинград	89,7	5,2	1,7	0,5	0,1	2,7	0,1	37500
Средняя Азия - Центр	93,8	3,6	0,7	0,	0,4	0,7	0,6	37600
Ставрополь - Москва (1 нитка)	93,8	2	0,8	0,	0,1	2,6	0,4	36200

Газопровод	Состав газа по объёму, %							Низшая теплота сгорания сухого газа, кДж/м <sup>3</sup>
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</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> и более тяжё- лые	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	
Ставрополь - Москва (II нитка)	92,8	2,8	0,9	0,4	0,1	2,5	0,5	36600
Ставрополь - Москва (III нитка)	91,2	3,9	1,2	0,5	0,1	2,6	0,5	37100
Ставрополь - Невинномысск - Грозный	98,2	0,4	0,1	0,1	0	1	0,2	35700
Угерско - Стрый, Угерско - Киев, Угерско - Львов	98,5	0,2	0,1	0	0	1	0,2	35500
Урицк - Сторжевка	91,9	2,4	1,1	0,8	0,1	3,2	0,5	36500
Хаджи-Абад - Фергана	85,9	6,1	1,5	0,8	0,6	5	0,1	38400
Шебелинка - Брянск - Москва	94,1	3,1	0,6	0,2	0,8	1,2	-	37900
Шебелинка - Острогожск, Шебелинка - Днепропетровск, Шебелинка - Харьков	92,8	3,9	1	0,4	0,3	1,5	0,1	37400

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П2

### Попутные газы

Производственное объединение	Газопровод	Состав газа по объёму, %								Низшая теплота сгорания сухого газа, кДж/м <sup>3</sup>
		СН <sub>4</sub>	С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub>	С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub>	С <sub>5</sub> Н <sub>12</sub> и более тяжёлые	Н <sub>2</sub>	СО <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub>	
Башнефтегаз	Туймазы - Уфа	50	22	9,8	1,2	0,4	16,6	-	-	42000
	Шкапово - Туймазы	44,1	22	5,2	1,4	0,3	27	-	-	36600
Грознефть	Вознесенская - Грозный, Карабулак - Грозный	76,7	13,2	5,4	2,5	2,2	-	-	-	46000
Краснодарнефть	На входе в г. Краснодар, Крымск и Новороссийск	91,2	3,9	2	0,9	0,2	-	1,8	-	38400
Куйбышевнефть	Безенчук - Чапаевск	42,7	19,6	12,6	5,1	1,3	16,9	1	0,8	46000
	Кулешовка - Куйбышев	58	17,2	7,4	2	0,5	13,6	0,8	0,5	41600

Производственное объединение	Газопровод	Состав газа по объёму, %								Низшая теплота сгорания сухого газа, кДж/м <sup>3</sup>
		СН <sub>4</sub>	С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub>	С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub>	С <sub>5</sub> Н <sub>12</sub> и более тяжёлые	N <sub>2</sub>	СО <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub>	
Пермьнефть	Каменный Лог - Пермь	38,7	22,6	10,7	2,7	0,7	23,8	08	0,8	41600
	Ярино - Пермь	38	25,1	12,5	3,3	1,3	18,7	1,1	1,1	45900
Миннибаевский газоперегонный завод	Казань – Бугульма - Лениногорск - Альметьевск	53,6	22,8	6,1	0,9	0,2	15,8	0,2	-	40600
Туркменнефть	Барса-Гельмес - Вышка - Небит - Даг, Кызыл-Кум - Кум-Даг - Небит-Даг, Котур-Тепе - Челекен и др.	93,9	3,4	1,3	0,7	0,2	0,1	0,4	-	38100
Ухтакомбинат	Тэбук - Сосновка	48,2	18,2	11,9	3,3	1	16,5	0,9	-	45000

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица ПЗ

#### Промышленные газы

Газопровод	Состав газа по объёму, %							Низшая теплота сгорания сухого газа, кДж/м <sup>3</sup>
	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	
Газ доменных печей, работающих на коксе и с добавкой природного газа	0,3	55	12,5	0,2	27	5	-	3800
Газ коксовых печей	25,5	3	2,4	0,5	6,5	59,5	2,3	1600

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Таблица П4

Средние изобарные теплоёмкости газов при атмосферном  
давлении (0,1013 МПа), кДж(м<sup>3</sup>·К)

$t, ^\circ\text{C}$	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Сухой воздух	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
0	1,5998	1,2946	1,3059	1,4943	1,2971	1,2992	1,2766	1,5500
100	1,7002	1,2958	1,3176	1,5052	1,3004	1,3017	1,2908	Д ,6421
200	1,7873	1,2996	1,3352	1,5223	1,3071	1,3071	1,2971	1,7589
300	1,8627	1,3067	1,3561	1,5424	1,3172	1,3167	1,2992	1,8862
400	1,9296	1,3163	1,3775	1,5654	1,3289	1,3289	1,3021	2,0155
500	1,9887	1,3276	1,3980	1,5897	1,3427	1,3427	1,3050	2,1403
600	2,0411	1,3402	1,4168	1,6148	1,3565	1,3574	1,3080	2,2609
700	2,0883	1,3536	1,4344	1,6412	1,3708	1,3720	1,3121	2,3768
800	2,1311	1,3670	1,4499	1,6680	1,3842	1,3862	1,3167	2,4941
900	2,1692	1,3796	1,4645	1,6957	1,3976	1,3996	1,3226	2,6025
1000	2,2035	1,3917	1,4775	1,7229	1,4097	1,4126	1,3289	2,6992
1100	2,2349	1,4034	1,4892	1,7501	1,4214	1,4248	1,3360	2,7863
1200	2,2638	1,4143	1,5005	1,7769	1,4327	1,4361	1,3431	2,8629
1300	2,2898	1,4252	1,5106	1,8028	1,4432	1,4466	1,3511	-

Продолжение табл. П4

t, °C	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Сухой воздух	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
1400	2,3136	1,4348	1,5202	1,8280	1,4528	1,4566	1,3590	-
1500	2,3354	1,4440	1,5294	1,8527	1,4620	1,4658	1,3674	-
1600	2,3555	1,4528	1,5378	1,8761	1,4708	1,4746	1,3754	-
1700	2,3743	1,4612	1,5462	1,8996	1,4788	1,4825	1,3833	-
1800	2,3915	1,4687 1	1,5541	1,9213	1,4867	1,4901	1,3917	-
1900	2,4074	1,4758	1,5617	1,9423	1,4939	1,4972	1,3996	-
2000	2,4221	1,4825	1,5692	1,9628	1,5010	1,5039	1,4076	-
2100	2,4359	1,4892	1,5759	1,9824	1,5072	1,5102	1,4185	-
2200	2,4484	1,4951	1,5830	2,0009	1,5135	1,5160	1,4227	-
2300	2,4602	1,5010	1,5897	2,0189	1,5194	1,5215	1,4302	-
2400	2,4710	1,5064	1,5964	2,0365	1,5253	1,5269	1,4373	-
2500	2,4811	1,5114	1,6027	2,0528	1,5303	1,5320	1,4449	-

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Таблица П5

### Степень черноты различных материалов

Материал	Температура, °С	Степень черноты, ε
<b>Алюминий:</b>		
с шероховатой поверхностью	20-50	0,06-0,07
сильно окисленный	50-500	0,20-0,30
Алюминиевая окраска	50	0,50
Бронза	20-150	0,55-0,60
Вольфрам	200	0,05
	600-1000	0,10-0,16
	1500-2200	0,24-0,31
<b>Латунь:</b>		
матовая	20-350	0,22
листовая прокатная	20	0,06
окисленная при 600 °С	200-600	0,60
<b>Медь:</b>		
окисленная	50-750	0,60-0,70
окисленная до черноты	50	0,88
Молибден	600-1000	0,08-0,13
	1500-2200	0,19-0,26
Молибденовая нить	700-2500	0,10-0,30
	50	0,06
Никель	500-800	0,3-0,48
Никелевая проволока	200-1000	0,10-0,20
<b>Нихром:</b>		
после прокатки	700	0,25
после пескоструйной обработки	700	0,70
<b>Нихромовая проволока:</b>		
чистая	50	0,55
	500-1000	0,71-0,79
окисленная	50-500	0,95-0,98

Продолжение табл. П5

Материал	Температура, °С	Степень черноты, ε
Платина	1000-1500	0,14-0,18
Платиновая проволока	50-200	0,06-0,07
	500-1000	0,10-0,16
	1400	0,18
Платиновая лента	900-1100	0,12-0,17
Сталь:		
листовая блестящая	50-1100	0,55-0,60
литая	900-1100	0,85-0,95
окисленная	100-600	0,80
сильно окисленная	50-500	0,90-0,98
алитированная	50-500	0,79
оцинкованная	20	0,28
легированная (8 % Ni, 18 % Cr)	500	0,35
нержавеющая после прокатки	700	0,45
нержавеющая после пескоструйной обработки	700	0,70
Титан:		
с полированной поверхностью	200	0,15
	500	0,20
	1000	0,30
окисленный при 540 °С	200	0,40
	500	0,50
	1000	0,60
Цинк:		
окисленный при 400 °С	400	0,11
листовой	50	0,20
Чугун:		
обточенный	800-1000	0,60-0,70
окисленный при 600 °С	200-600	0,64-0,48
Чугунное литье	500-1000	0,80-0,95

Окончание табл. П5

Материал	Температура, °С	Степень черноты, ε
Асбест листовой	20-400	0,95
Глина обожжённая	70	0,91
Кирпич		
шамотный	20	0,85
	1000	0,75
	1200	0,59
динасовый	1000-1100	0,70-0,85
корундовый	1000	0,46
магнезитовый	1000-1300	0,38
глиняный обыкновенный	20	0,88-0,93
Краски масляные и лаки различных цветов	20-100	0,90-0,98
Сажа на твёрдой поверхности	500-1000	0,96

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Таблица П6

Эффективная толщина излучающего слоя  
для объёмов различной формы

Форма газового тела	$l_{эф}$	Излучение
Цилиндр высотой	$0,77 d$	В центр основания
То же	$0,6 d$	На боковую поверхность
Цилиндр высотой $h = \infty$ , диаметром $d$	$0,95 d$	
То же	$0,9 d$	В центр основания
Цилиндр высотой $h = \infty$ ; основание полукруг радиусом $r$	$1,26 r$	В центр плоской поверхности
Куб с длиной стороны $a$	$0,67 a$	На поверхность
Шар диаметром $d$	$0,65 d$	» »
Плоскопараллельный слой бесконечных размеров с расстояниями между плоскостями $h$	$1,8 h$	На плоскость
Пространство между пучком труб с наружным диаметром $d$ и расстояниями между поверхностями труб:		
$d$ при расположении по треугольнику	$2,8 d$	На поверхность труб
$2d$ при расположении по треугольнику	$3,8 d$	
$d$ при расположении по квадрату	$3,5 d$	

## ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Таблица П7

### Теплофизические свойства углеродистых сталей

Свойства	Температура, $t$ °С						
	100	200	300	400	500	600	700
Средняя теплоёмкость $c$ от 0 до $t$ , кДж/(кг·К)	0,486	0,507	0,523	0,540	0,561	6,590	0,620
Энтальпия $i$ , кДж/кг	48,6	101	157	216	280	354	435
Коэффициент теплопроводности сталей $\lambda$ , Вт/(м·К):							
малоуглеродистых	55,6	52,7	48,5	45,0	40,8	37,1	34,2
среднеуглеродистых	49,3	48,1	45,6	42,4	39,1	35,7	32,4
высокоуглеродистых	46,5	44,0	40,8	37,7	35,0	32,3	29,2
Коэффициент температуропроводности сталей $a \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /ч:							
малоуглеродистых	5,2	4,6	4,2	3,5	2,9	2,3	1,7
среднеуглеродистых	4,7	4,2	3,8	3,3	2,8	2,3	1,8
высокоуглеродистых	4,3	3,8	3,4	2,9	2,5	2,2	1,3

Свойства	Температура, $t$ °С					
	800	900	1000	1100	1200	1300
Средняя теплоёмкость $c$ от 0 до $t$ , кДж/(кг·К)	0,695	0,695	0,691	0,687	0,682	0,682
Энтальпия $i$ , кДж/кг	569	624	691	754	821	888
Коэффициент теплопроводности сталей $\lambda$ , Вт/(м·К):						
малоуглеродистых	30,1	27,3	27,7	28,5	29,8	-
среднеуглеродистых	26,2	26,0	26,9	28,0	29,5	-
высокоуглеродистых	24,1	25,2	26,5	27,9	29,4	-
Коэффициент температуропроводности сталей $a \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /ч:						
малоуглеродистых	1,6	2,0	2,0	2,1	-	-
среднеуглеродистых	1,8	2,0	2,0	2,0	-	-
высокоуглеродистых	2,0	2,0	2,0	2,1	-	-

## ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Таблица П8

Теплофизические свойства низколегированных сталей

Свойства	Температура, $t$ °С			
	100	200	300	400
Средняя теплоёмкость $c$ от 0 до $t$ , кДж/(кг·К)	0,486	0,502	0,519	0,536
Энтальпия $i$ , кДж/кг	44,6	100	156	214
Коэффициент теплопроводности сталей $\lambda$ , Вт/(м·К):				
хромистых	44,8	42,2	39,3	36,4
марганцовистых	41,5	40,0	38,8	37,0
хромокремнистых	-	38,7	-	35,9
кремнемарганцовистых	41,5	41,5	39,4	39,0
хромомолибденовых	43,8	41,9	41,3	39,4
хромованадиевых	52,3	48,7	-	45,4
хромоникелевых	38,4	37,9	36,8	36,8
Коэффициент температуропроводности сталей $a \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /ч:				
хромистых	4,1	3,7	3,2	2,7
марганцовистых	3,8	3,5	3,2	2,8
хромокремнистых	-	3,4	-	2,7
кремнемарганцовистых	3,8	3,6	3,2	2,9
хромомолибденовых	4,0	3,6	3,4	2,9
хромованадиевых	4,8	4,2	-	3,4
хромоникелевых	3,5	3,3	3,0	2,7

Продолжение табл. П8

Свойства	Температура, $t$ °С			
	500	600	700	800
Средняя теплоёмкость $c$ от 0 до $t$ , кДж/(кг·К)	0,548	0,586	0,645	0,695
Энтальпия $i$ , кДж/кг	274	352	452	557
Коэффициент теплопроводности сталей $\lambda$ , Вт/(м·К):				
хромистых	-	32,6	-	26,7
марганцовистых	35,2	34,3	30,9	26,4
хромокремнистых	33,5	32,6	-	26,7
кремнемарганцовистых	36,3	34,9	33,7	32,6
хромомолибденовых	36,5	32,3	29,8	29,1
хромованадиевых	41,9	-	-	-
хромоникелевых	34,5	32,4	28,0	27,2
Коэффициент температуропроводности сталей $a \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /ч:				
хромистых	-	1,9	-	2,1
марганцовистых	2,3	2,0	1,2	2,1
хромокремнистых	2,2	1,9	-	2,1
кремнемарганцовистых	2,4	2,1	1,3	2,6
хромомолибденовых	2,4	1,9	1,2	2,3
хромованадиевых	-	2,8	-	-
хромоникелевых	2,3	1,9	1,1	2,1

## Окончание табл. П8

Свойства	Температура, $t$ °С			
	900	1000	1100	1200
Средняя теплоёмкость $c$ от 0 до $t$ , кДж/(кг·К)	0,687	0,674	0,670	0,670
Энтальпия $i$ , кДж/кг	620	674	737	804
Коэффициент теплопроводности сталей $\lambda$ , Вт/(м·К):				
хромистых	-	-	-	-
марганцовистых	-	-	-	-
хромокремнистых	-	-	-	-
кремнемарганцовистых	-	-	-	-
хромомолибденовых	28,5	-	-	-
хромованадиевых	-	-	-	-
хромоникелевых	26,4	27,7	28,8	-
Коэффициент температуропроводности сталей $a \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /ч:				
хромистых	-	-	-	1
марганцовистых	-	-	-	-
хромокремнистых	-	-	-	-
кремнемарганцовистых	-	-	-	-
хромомолибденовых	2,2	-	-	-
хромованадиевых	-	-	-	-
хромоникелевых	2,0	2,1	-	-

## ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Таблица П9

Теплофизические свойства динамных и трансформаторных сталей  
(содержание углерода 0,06...0,99 %, марганца 0,1...0,35 %)

$t, ^\circ\text{C}$	$c$	$i$	1 % Si		1,23 % Si		1,8 % Si		2,2 % Si	
			$\lambda$	$a \cdot 10^2$						
100	0,494	49,4	45,1	4,17	34,4	3,19	32,7	3,05	28,8	2,70
200	0,507	101	41,9	3,88	34,0	3,02	31,7	2,78	30,5	2,71
300	0,532	156	40,7	3,64	33,3	2,83	30,9	2,64	31,1	2,62
400	0,536	215	31,3	3,24	32,9	2,59	30,1	2,39	31,1	2,44
500	0,557	279	29,1	2,73	32,2	2,33	29,3	2,10	30,5	2,15
600	0,615	353	26,7	2,21	31,9	2,02	28,5	1,78	23,8	1,76
700	0,628	440	24,5	1,75	30,1	1,76	26,4	1,42	27,7	1,46
800	0,653	523	22,6	1,86	28,3	1,83	25,1	1,65	26,7	1,76
900	0,666	598	21,0	1,68	26,7	1,67	24,3	1,54	26,4	1,70

Продолжение табл. П9

$t, ^\circ\text{C}$	$c$	$i$	2,78 % Si		3,94 % Si		4,28 % Si		4,38 % Si	
			$\lambda$	$a \cdot 10^2$						
100	0,494	49,4	24,9	2,34	20,7	1,95	21,6	2,04	23,5	2,22
200	0,507	101	27,2	2,43	21,7	1,94	22,2	1,98	24,9	2,23
300	0,532	156	29,3	2,50	23,5	1,99	23,8	2,02	26,6	2,25
400	0,536	215	31,1	2,44	26,2	1,87	25,4	2,02	27,9	2,18
500	0,557	279	30,6	2,16	29,3	2,04	21,4	1,91	28,5	1,98
600	0,615	353	28,0	1,70	29,5	1,75	27,2	1,61	28,3	1,67
700	0,628	440	27,2	1,42	27,2	1,37	26,4	1,29	27,2	1,35
800	0,653	523	27,7	1,84	26,7	1,81	26,4	1,80	26,7	1,84
900	0,666	598	26,4	1,73	27,9	1,87	28,8	1,95	28,1	1,90

Примечание:  $c$  - средняя теплоёмкость от 0 до  $t$ ,  $^\circ\text{C}$ , кДж/(кг·К);  $i$  - энтальпия, кДж/кг;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $a$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/ч.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Таблица П10

Формулы для расчётов коэффициентов  
теплопроводности огнеупорных материалов

Материал	$\lambda$ , Вт/(м·К)
Динасовый	$1,58 + 0,00038 t$
Шамотный	$0,70 + 0,00064 t$
Муллитокремнеземистый	$1,77 - 0,00023 t$
Корундовый	$12,18 - 0,00081 t$
Электроплавленный корунд	$15,66 - 0,00035 t$
Периклазовый	$6,15 - 0,00038 t$
Хромитопериклазовый	$2,78 - 0,00087 t$
Периклазошпинелидный	$4,10 - 0,0017 t$
Динасовый легковес	$0,55 + 0,0003 t$
Шамотный легковес ШЛ - 1,3	$0,47 + 0,00035 t$
Шамотный легковес ШЛ - 1,0	$0,35 + 0,00035 t$
Шамотный легковес ШЛ - 0,9	$0,29 + 0,00023 t$
Шамотный легковес ШЛ - 0,4	$0,10 + 0,00021 t$
Шамотно-тальковый легковес ШТЛ - 0,6	$0,13 + 0,00023 t$
Муллитокремнеземистый легковес МКРЛ-0,8	$0,49 - 0,00015 t$
Корундовый легковес КЛ - 1,3	$0,84 - 0,00035 t$
Диатомитовый Д - 600, Д - 500	$0,10 + 0,00023 t$
Пендиатомитовый ПД - 350	$0,08 + 0,00019 t$
Перлит П - 250	$0,076 + 0,00016 t$
Глиняный красный	$0,46 + 0,00051 t$
Базальтовый картон	$6,016 + 0,00026 t$
Асбестовый картон	$0,12 + 0,00024 t$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Таблица П11

Максимальная температура применения огнеупорных  
и теплоизоляционных материалов

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	Материал	$t, ^\circ\text{C}$
Динасовый	1650	Муллитокремнеземистый легковес МКРЛ - 0,8	1250
Шамотный	1400	Корундовый легковес КЛ - 1,3	1550
Муллитокремнеземистый	1500	Диатомитовый Д - 500	900
Корундовый	1800	Пендиатомитовый ПД - 350	900
Электроплавленный корунд	1850	Перлит П - 250	800
Периклазовый	1700	Базальтовый картон	800
Хромитопериклазовый	1700	Асбестовый картон	500
Периклазошпинелидный	1700	Шамото-волокнистые плиты ШВП - 350	1200
Динасовый легковес	1550	Муллитокремнеземистый войлок МКРВ- 200	1150
Шамотный легковес ШЛ - 1,3	1300	Муллитокремнеземистые плиты МКРП - 340	1150
Шамотный легковес ШЛ - 1,0	1300	Маты из минеральной ваты	400
Шамотный легковес ШЛ - 0,9	1270		
Шамотный легковес ШТЛ - 0,6	1150		
Шамотно-тальковый легковес	1150		

## ПРИЛОЖЕНИЕ 12

Таблица П12

Значение средних удельных объёмных теплоёмкостей воздуха  
и дымовых газов при температурах от 0 до  $t$  °С

Температура $t$ , °С	Теплоёмкость воздуха $c_{в}$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	Теплоёмкость дымовых газов $c_{г}$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	Температура $t$ , °С	Теплоёмкость воздуха $c_{в}$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	Теплоёмкость дымовых газов $c_{г}$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·К)
0	1,30	1,42	800	1,39	1,52
100	1,31	-	900	1,40	-
200	1,32	1,42	1000	1,41	1,54
300	1,32	-	1100	1,42	
400	1,33	1,46	1200	1,44	1,56
500	1,34	-	1300	1,45	-
600	1,36	1,46	1400	1,46	1,59
700	1,37	-			

## ПРИЛОЖЕНИЕ 13

Таблица П13

Физические свойства воды на линии насыщения

$t$ , °С	$p$ , кПа	$\gamma'$ , кг/м <sup>3</sup>	$i'$ , кДж/кг	$c_p$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup> /ч	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , К <sup>-1</sup>	Pr
0	101,0	999,9	0	4,212	55,1	4,71	1788,4	1,789	-0,63	13,67
10	101,0	999,7	42,04	4,191	57,4	4,94	1305,7	1,306	+0,70	9,52
20	101,0	998,2	83,91	4,183	59,9	5,16	1004,5	1,006	1,82	7,02
30	101,0	995,7	125,69	4,174	61,7	5,35	801,4	0,805	3,21	5,42
40	101,0	992,2	167,52	4,174	63,4	5,51	653,4	0,659	3,87	4,31
50	101,0	988,1	209,31	4,174	64,8	5,65	549,4	0,556	4,49	3,54
60	101,0	983,2	251,14	4,179	65,9	5,78	469,9	0,478	5,11	2,98
70	101,0	977,8	293,0	4,187	66,8	5,87	406,1	0,415	5,70	2,55
80	101,0	971,8	334,96	4,195	67,4	5,96	354,1	0,365	6,32	2,21
90	101,0	965,3	376,99	4,208	68,0	6,03	314,9	0,326	6,95	1,95
100	101,0	958,4	419,12	4,221	68,3	6,08	282,5	0,295	7,52	1,75
110	143,2	951,0	461,36	4,233	68,5	6,13	259,0	0,272	8,08	1,60
120	199,1	943,1	503,70	4,250	68,6	6,16	237,4	0,252	8,64	1,47
130	269,8	934,8	546,40	4,266	68,6	6,19	217,8	0,233	9,19	1,36

Продолжение табл. П13

$t$ , °C	$p$ , кПа	$\gamma'$ , кг/м <sup>3</sup>	$i'$ , кДж/кг	$c_p$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup> /ч	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , К <sup>-1</sup>	Pr
140	362,0	926,1	589,11	4,287	68,5	6,21	201,1	0,217	9,72	1,26
150	475,8	917,0	632,20	4,313	68,4	6,22	186,4	0,203	10,3	1,17
160	618,0	907,4	675,40	4,346	68,3	6,23	173,6	0,191	10,7	1,10
170	792,6	897,3	719,30	4,379	67,9	6,22	162,8	0,181	11,3	1,05
180	1003,6	886,9	763,30	4,417	67,4	6,20	153,0	0,173	11,9	1,00
190	1255,7	876,0	807,67	4,459	67,0	6,17	144,2	0,165	12,6	0,96
200	1555,9	863,0	852,47	4,505	66,3	6,14	136,4	0,158	13,3	0,93
210	1909,0	852,8	897,69	4,555	65,5	6,07	130,5	0*153	14,1	0,91
220	2321,0	840,3	943,75	4,614	64,5	5,99	124,6	0,148	14,8	0,89
230	2798,8	827,3	990,22	4,681	63,7	5,92	119,7	0,145	15,9	0,88
240	3349,1	813,6	1037,53	4,756	62,8	5,84	114,8	0,141	16,8	0,87
250	3978,9	799,0	1085,69	4,844	61,7	5,74	108,9	0,137	18,1	0,86
260	4696,0	784,0	1135,09	4,949	60,5	5,61	105,9	0,135	19,7	0,87
270	5507,3	767,9	1185,34	5,070	59,0	5,45	102,0	0,133	21,6	0,88
280	6423,6	750,7	1236,84	5,229	57,4	5,27	98,1	0,131	23,7	0,90
290	7447,7	732,3	1290,01	5,485	55,8	5,00	94,2	0,129	26,2	0,93

Окончание табл. П13

$t$ , °С	$p$ , кПа	$\gamma'$ , кг/м <sup>3</sup>	$i'$ , кДж/кг	$c_p$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup> /ч	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , К <sup>-1</sup>	Pr
300	8594,5	712,5	1344,86	5,736	54,0	4,75	91,2	0,128	29,2	0,97
310	9872,8	691,1	1402,23	6,071	52,3	4,49	88,3	0,128	32,9	1,03
320	11293,3	667,1	1462,10	6,573	50,6	4,15	85,4	0,128	38,2	1,11
330	12867,7	640,2	1526,16	7,24	48,4	3,76	81,2	0,127	43,3	1,22
340	14613,0	610,1	1594,83	8,16	45,7	3,30	77,5	0,127	53,4	1,39
350	16542,6	574,4	1671,45	9,50	43,0	2,84	72,6	0,126	66,8	1,60
360	18680,2	528,0	1761,47	13,98	39,5	1,93	66,7	0,126	109	2,35
370	21060,1	450,5	1892,52	40,32	33,7	0,668	56,9	0,126	264	6,79

Примечание:  $p$  - парциальное давление;  $\gamma'$  - плотность воды;  $i'$  - энтальпия;  $c_p$  - теплоемкость при постоянном давлении;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $a$  - коэффициент температуропроводности;  $\mu$  и  $\nu$  - динамический и кинематический коэффициент вязкости;  $\beta$  - коэффициент объёмного расширения; Pr - число Прандля.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 14

Таблица П14

Физические свойства водяного пара на линии насыщения

$t$ , °С	$p$ , кПа	$\gamma''$ , кг/м <sup>3</sup>	$i''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$c_p$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup> /ч	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
100	101,0	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,37	66,9	5,11	20,02	1,08
110	143,2	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,49	49,8	12,46	15,07	1,09
120	198,2	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,59	37,8	12,85	11,46	1,09
130	269,8	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,69	28,7	13,24	8,85	1,11
140	362,0	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,79	22,1	13,54	6,89	1,12
150	475,8	2,547	2746,7	2114,4	2,395	2,88	17,0	13,93	5,47	1,16
160	618,0	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,01	13,4	14,32	4,39	1,18
170	792,6	4,122	2768,9	2049,5	2,583	3,13	10,6	14,72	3,57	1,21
180	1003,6	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,27	8,42	15,11	2,93	1,25
190	1255,7	6,394	2786,4	1978,8	2,855	3,42	6,74	15,60	2,44	1,30
200	1555,9	7,862	2793,1	1940,7	3,023	3,55	5,37	16,00	2,03	1,36
210	1909,0	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,72	4,37	16,38	1,71	1,41
220	2321,0	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,90	3,54	16,87	1,45	1,47
230	2798,8	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,09	2,90	17,36	1,24	1,54
240	3349,1	16,76	2803,2	1765,6	3,881	4,29	2,37	17,76	1,06	1,61

Продолжение табл. П14

$t$ , °C	$p$ , кПа	$\gamma''$ , кг/м <sup>3</sup>	$i''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$c_p$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup> /ч	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
250	3978,9	19,98	2801,1	1715,8	4,158	4,51	1,96	18,25	0,913	1,68
260	4696,0	23,72	2796,5	1661,4	4,467	4,80	1,63	18,83	0,794	1,75
270	5507,3	28,09	2789,8	1604,4	4,81	5,11	1,36	19,32	0,688	1,82
280	6421,6	33,19	2779,7	1542,9	5,23	5,49	1,14	19,91	0,600	1,90
290	7447,7	39,15	2766,4	1476,3	5,69	5,83	0,941	20,60	0,526	2,01
300	8594,5	46,21	2749,2	1404,3	6,28	6,27	0,778	21,29	0,461	2,13
310	9872,8	54,58	2727,4	1325,2	7,12	6,84	0,634	21,97	0,403	2,29
320	11293,3	64,72	2700,2	1238,1	8,21	7,51	0,509	22,86	0,353	2,50
330	12868,7	77,10	2655,9	1139,7	9,88	8,26	0,390	23,94	0,310	2,86
340	14613,0	92,76	2621,9	1027,1	12,35	9,30	0,292	25,21	0,272	3,35
350	16542,6	113,6	2564,5	893,1	16,2	10,70	0,209	26,59	0,234	4,03
360	18680,2	144,0	2481,2	719,7	23,0	12,79	0,139	29,14	0,202	5,23
370	21060,1	203,0	2330,9	438,4	56,5	17,10	0,054	33,75	0,166	11,10

Примечание:  $p$  - парциальное давление;  $\gamma''$  - плотность насыщенного газа;  $i''$  - энтальпия насыщенного газ;  
 $r$  - скрытая теплота парообразования;  $c_p$  - теплоёмкость при постоянном давлении;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $a$  - коэффициент температуропроводности;  $\mu$  и  $\nu$  - динамический и кинематический коэффициент вязкости; Pr - число Прандля.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочная книжка энергетика [Текст] / Сост. А. Д. Смирнов. – М.: Энергия, 1978.
2. Хзмалян, Д. М. Теория горения и топочные устройства [Текст] / Хзмалян Д. М., Каган Я. А.; под ред. Д. М. Хзмаляна. – М.: Энергия, 1976.
3. Тепловые и атомные электрические станции: справочник [Текст] / Под ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982.
4. Расчёт нагревательных и термических печей: справочник [Текст] / Под. ред. В. М. Тымчака. – М.: Metallургия, 1983.
5. Справочник теплоэнергетика предприятий цветной металлургии [Текст] / Под. ред. О. Н. Багрова. – М.: Metallургия, 1982.
6. Лыков, А. В. Теория теплопроводности. [Текст] / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967.
7. Тебеньков, А. В. Рекуператоры для промышленных печей [Текст] / А.В. Тебеньков. – М.: Metallургия, 1975.
8. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты [Текст] / Под. ред. Л. Н. Сидельковского. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
9. Розенгарт, Ю. И. Теплоэнергетика металлургических заводов: учебник для вузов [Текст] / Розенгарт Ю. И., Мурадова З. А., Теверовский Б. З. и др. – М.: Metallургия, 1985.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА .....	5
1.1. Материальный баланс процесса горения.....	5
1.2. Температура горения топлива .....	7
2. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ И ПРОФИЛЬ ПЕЧИ.....	10
2.1. Температурный график печи .....	10
2.2. Профиль и размеры рабочего пространства печи.....	12
3. РАСЧЕТ НАГРЕВА МЕТАЛЛА .....	16
3.1. Расчёт внешнего теплообмена.....	16
3.2. Расчёт внутреннего теплообмена .....	21
3.3. Расчёт напряжённости пода печи.....	34
4. ТЕПЛОВЫЙ БАЛАНС ПЕЧИ .....	35
4.1. Приходные статьи теплового баланса .....	35
4.2. Расходные статьи теплового баланса.....	36
4.3. Оценка энергетического совершенствования печи .....	42
5. РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ПОДОГРЕВ ВОЗДУХА .....	44
5.1. Расчёт конвективного рекуператора из гладких стальных труб .....	48
5.2. Расчёт радиационного щелевого рекуператора .....	55
6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ (ВЭР) .....	59
6.1. Расчёт жаротрубного котла-утилизатора .....	76
6.2. Расчёт водотрубного котла-утилизатора .....	78
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	81
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	108

Учебное издание

Бараков Александр Валентинович  
Дубанин Владимир Юрьевич  
Надеев Александр Александрович

## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

В авторской редакции

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 6,9. Уч.-изд. л. 5,7. Тираж 250 экз.

Заказ №

Подписано в печать 28.04.2017.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14