

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра физического металловедения и физики твёрдого тела

621.78(07)

К-709

Корягин Ю.Д., Ильин С.И.

# **ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПЛАМЕННЫХ ПЕЧЕЙ**

Учебное пособие

Челябинск  
Издательский центр ЮУрГУ  
2013

УДК 621.78.002.5(075.8)

К-709

Одобрено  
учебно-методической комиссией  
физико-металлургического факультета

Рецензенты:  
проф., д.т.н. А.В. Выдрин, проф., д.т.н. А.Н. Емелюшин

- Корягин Ю.Д., Ильин С.И.**  
К-709      Тепловые расчеты термического оборудования и автоматическое регулирование пламенных печей: учебное пособие / Ю.Д.Корягин — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. — 112 с.
- В пособии приведены основные методики тепловых расчетов термического оборудования, автоматизации пламенных печей, а также примеры выполнения расчетов по некоторым методикам и необходимые для них справочные данные.
- Пособие предназначено для подготовки бакалавров и магистров дневной и заочной формы обучения направления 150400 «Металлургия».

УДК 621.78.002.5(075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2013

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие предназначено, в основном, для подготовки бакалавров по направлению 150400.68 «Металлургия».

Пособие является руководством по практическому использованию в расчётах теоретических представлений, полученных при изучении всего курса металлургического цикла («металлургические печи», «металлургическая теплотехника», «нагревательные печи», «оборудование термических цехов» и т.д.).

В каждом из разделов учебного пособия кратко изложены основные теоретические представления и формулы, применяемые в дальнейшем при расчётах. Использование расчётных формул и методов расчетов предполагает знание основ курсов высшей математики, физики и электротехники.

Круг применения рассматриваемых в настоящем пособии методов расчёта ограничен в основном термическим оборудованием, хотя они могут быть использованы и для расчёта нагревательных печей и охлаждающих устройств.

В связи с ограниченным объёмом пособия в него не включены примеры расчётов по всем изложенным методикам, а также справочные данные, которые студенты могут легко найти в литературе.

В пособии также кратко рассмотрены основные принципы построения систем автоматического регулирования теплового режима и основных параметров пламенных печей.

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$a$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $B$  — расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $C_0=5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — константа излучения абсолютно чёрного тела;  
 $c$  — теплоёмкость,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  
 $D, d$  — диаметр, м (для проволоки мм);  
 $F$  — площадь поверхности, сечения,  $\text{м}^2$ ;  
 $f$  — частота тока, Гц;  
 $G$  — масса, кг;  
 $g=9,81 \text{ м}/\text{с}^2$  — ускорение силы тяжести;  
 $h$  — шаг между витками, мм;  
 $H$  — высота, глубина, м;  
 $I$  — сила тока, А;  
 $L$  — длина, м;  
 $l$  — длина проволоки или ленты одного электрического нагревателя, м;  
 $m$  — коэффициент массивности;  
 $N$  — мощность тепловая, электрическая, Вт (при индукционном нагреве  $P$ );  
 $n$  — количество;  
 $P$  — давление, Па;  
 $Q$  — количество теплоты, Дж;  
 $q$  — плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  
 $R$  — сопротивление электрическое, Ом;  
 $R$  — удельное тепловое сопротивление,  $\text{К}/\text{Вт}$ ;  
 $r$  — полное тепловое сопротивление,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ ;  
 $r$  — радиус, м;  
 $S$  — толщина слоёв кладки, м;  
 $T$  — температура по абсолютной шкале, К;  
 $t$  — температура по столбчатой шкале (Цельсия),  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $U$  — напряжение, В;  
 $V$  — объём,  $\text{м}^3$ ;  
 $w$  — скорость,  $\text{м}/\text{с}$ ;  
 $W$  — удельная поверхностная нагрузка нагревателя,  $\text{Вт}/\text{см}^2$ ;  
 $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  
 $\beta$  — температурный коэффициент физической величины,  $\text{К}^{-1}$ ;  
 $\gamma$  — плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\varepsilon$  — степень черноты поверхности материала;  
 $\eta$  — коэффициент полезного действия;  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  
 $\mu$  — коэффициент динамической вязкости, Па·с;  
 $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  
 $\rho$  — удельное электросопротивление, мкОм·м;  
 $\Sigma$  — сумма, суммарное;  
 $\sigma$  — напряжение, Па;  
 $\tau$  — время, с;  
 $\Phi$  — коэффициент диафрагмирования;  
 $\varphi$  — угловой коэффициент излучения;  
 $\omega$  — степень развития кладки;  
 $Bi = \alpha S / \lambda$  — число Био;  
 $Fo = a \tau / S^2$  — число Фурье;  
 $Nu = \alpha L / \lambda$  (или  $\alpha d / \lambda$ ) — число Нуссельта;  
 $Pe = wL / \alpha$  (или  $wd / \alpha$ ) — число Пекле;  
 $Pr = \nu / a$  — число Прандтля;  
 $Re = Pe / Pr = wL / \nu$  (или  $wd / \nu$ ) — число Рейнольдса;  
 $Gr$  — число Грасгофа.

# **1. РАСЧЁТЫ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

Нагрев металла является одной из главных операций термической обработки, характеризуемой температурой, продолжительностью нагрева и скоростью охлаждения.

Продолжительность нагрева зависит от способа передачи тепла нагреваемому изделию. В соответствии с этим различают два метода нагрева: 1) прямой нагрев — нагрев металла внутренним теплом, генерируемым внутри изделия (электроконтактный, индукционный); 2) косвенный нагрев — нагрев металла внешними источниками тепла (в топливных и электрических печах, открытым факелом).

При выборе метода нагрева изделий необходимо учитывать технологические требования термической обработки и скорости, равномерности и точности нагрева до установленной температуры, а также экономическую целесообразность применения выбираемого способа нагрева.

В настоящее время в термических цехах чаще применяется косвенный нагрев в печах, при котором практически не ограничиваются размеры и форма изделий, в широком интервале (от 100 до 1400 °С и выше) может задаваться конечная температура нагрева, обеспечивается высокая равномерность и точность нагрева до заданной температуры, а также возможна продолжительная выдержка изделий при заданной температуре.

Для нагрева при термической обработке изделий из стали и сплавов применяются как электрические, так и топливные печи. Для нагрева изделий из алюминиевых сплавов чаще применяются электрические печи с искусственной циркуляцией воздуха и печи аэродинамического подогрева (ПАП).

## **1.1. Теоретические основы нагрева металла в печах**

На поверхности нагреваемого в печи изделия протекает сложный тепловой процесс, включающий все формы теплообмена: теплопроводность, конвективный теплообмен и тепловое излучение (лучеиспускание). Основными формами теплообмена, определяющими нагрев изделия в газовой среде печи, являются лучеиспускание и конвективный теплообмен. Для высокотемпературных и низкотемпературных печей, для различных атмосфер, заполняющих рабочее пространство печей, для разных сплавов соотношение интенсивностей этих форм теплообмена различное, что отражается на процессе нагрева изделий.

Интенсивность теплообмена между твердым телом и окружающей средой принято характеризовать коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ , с которым непо-

средственно связан удельный тепловой поток на поверхности нагреваемого тела  $q$ . По закону Ньютона

$$q = \alpha \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}) \quad (1.1)$$

где  $t_{\text{п}}$  — температура среды (печи), °C;  $t_{\text{пов}}$  — температура поверхности нагреваемого тела (изделия), °C.

Учитывая сложность теплового процесса на поверхности нагреваемого изделия, коэффициент теплоотдачи считают сложной величиной, которая равна сумме коэффициентов теплоотдачи лучеиспусканием  $\alpha_{\text{л}}$  и конвекцией  $\alpha_{\text{к}}$ :

$$\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}. \quad (1.2)$$

Методы определения  $\alpha_{\text{л}}$  и  $\alpha_{\text{к}}$  выбираются в зависимости от условий теплообмена в печи. Величина  $\alpha$  меняется в процессе нагрева изделий, однако в расчетах продолжительности нагрева изделий эти изменения не учитываются, и принимается среднее значение  $\alpha$ .

В зависимости от условий теплообмена и способа работы печи (печи непрерывного или периодического действия) возможны три принципиально различных случая нагрева изделий. Во-первых, нагрев при постоянной температуре печи и переменном тепловом потоке на поверхности изделия. Этот случай нагрева характерен для печей периодического действия, в которых тепло к изделию передается в основном за счет теплового излучения, а также для электрических печей с искусственной циркуляцией воздуха (конвекционные печи), имеющих небольшие размеры рабочего пространства, и печей-ванн. Во-вторых, нагрев при переменной температуре печи, но постоянном тепловом потоке на поверхности изделия. Этот случай нагрева наблюдается в методических печах с преобладанием теплообмена лучеиспусканием, а также в печах периодического действия при резком падении температуры печи в момент загрузки в печь холодной массивной заготовки изделий. В-третьих, нагрев при переменной температуре печи и переменном тепловом потоке. Такой процесс нагрева характерен для конвекционных печей, имеющих большие размеры рабочего пространства.

Для расчета продолжительности нагрева изделий в первом случае необходимо знать величину коэффициента теплоотдачи и температуру печи. во втором случае необходимо предварительно определить удельный тепловой поток на поверхности изделия. В третьем случае часто задаются коэффициентом теплоотдачи и законом изменения температуры печи.

После загрузки холодного изделия в печь происходит интенсивный нагрев его поверхностных слоев. Нагрев центральных слоев протекает с меньшей скоростью из-за термического сопротивления изделия. Изменяясь по ве-

личине, он может сохраняться в течение всего времени нагрева изделия. Это значительно усложняет определение времени нагрева изделия.

Величина перепада температуры по толщине изделия зависит от отношения термического сопротивления изделия к термическому сопротивлению передачи тепла к его поверхности. Чем больше указанное отношение, тем больше перепад температуры по толщине изделия. В теории теплообмена отношение внутреннего термического сопротивления к внешнему термическому сопротивлению на его поверхности определяется числом Био:

$$Bi = \frac{S/\lambda}{1/\alpha} = \frac{\alpha S}{\lambda}, \quad (1.3)$$

где  $S/\lambda$  — внутреннее термическое сопротивление изделия;  $S$  — характерный геометрический размер изделия: для пластины — половина её толщины при двустороннем нагреве и полная толщина в случае одностороннего нагрева, для цилиндра и шара — их радиусы;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности металла;  $1/\alpha$  — внешнее термическое сопротивление;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи.

Если величина  $Bi$  близка к нулю, то термическим сопротивлением изделия можно пренебречь, и его нагрев определяется только внешним теплообменом. В этом случае перепад температуры по сечению изделия можно не учитывать при определении времени его нагрева. Такие изделия называются «тонкими» в тепловом отношении в отличие от «массивных», температурный перепад в которых соизмерим с температурным напором на их поверхности.

За условную границу между тонкими и массивными изделиями принимают такое сечение, для которого число Био равно 0,25; при этом значении  $Bi$  максимальный перепад температуры по сечению изделия составляет 10 % от разности начальных температур изделия  $t_0$  и внешней среды, то есть  $\Delta t = 0,1(t_{\text{п}} - t_0)$ . Таким образом, если  $Bi < 0,25$ , расчеты выполняются по формулам для тонких изделий, если же  $Bi > 0,25$  — по методике, принятой для массивных изделий.

При расчетах продолжительности нагрева изделий необходимо также знать их теплофизические свойства, прежде всего плотность  $\gamma$ , удельную теплоемкость  $c$  и коэффициент теплопроводности —  $\lambda$ . Для металлов и сплавов указанные параметры изменяются с изменением температуры. Однако при выполнении практических расчетов они принимаются постоянными. Для уменьшения погрешности расчетов следует брать средние в рассматриваемом интервале температур значения теплофизических констант.



### 1.1.1 Особенности расчета суммарного коэффициента теплоотдачи в электрических и топливных печах

Рассмотрим определение средних значений коэффициентов теплоотдачи на поверхности изделий, нагреваемых в электрических и топливных печах.

Электрические печи. В электрических печах без искусственной циркуляции воздуха основным видом теплообмена, определяющим нагрев изделий, является теплообмен лучеиспусканием. Конвективный теплообмен в результате свободного движения воздуха около поверхности нагреваемого изделия имеет небольшую интенсивность и коэффициент теплоотдачи конвекцией в нагревательной камере печей сопротивления с температурой выше 700 °С приблизительно может быть принят равным 10...15 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Для более низких температур он может быть подсчитан по одной из формул, изложенных ниже в разделе о конвективном теплообмене в топливных печах.

В частном случае при нагреве изделий из алюминиевых сплавов в низкотемпературных конвекционных печах величина коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием невелика из-за малой степени черноты изделий [6]:

Температура печи, °С	100	200	300	400	500	600
$\alpha_L$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	1,9	3,6	6,3	10,1	15,2	21,8

Коэффициент теплоотдачи конвекцией в этом случае имеет большее значение и может быть вычислен по следующей формуле [6]:

$$\alpha_K = k \cdot w^{0,8}, \quad (1.4)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от температуры печи:

Температура печи, °С	100	200	300	400	500	600
$k$	4,81	4,19	3,74	3,37	3,20	3,09

$w$  — скорость воздушного потока в рабочей камере печи, м/с.

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием в общем случае определяется по формуле

$$\alpha_L = C_{\text{ПР}} \cdot \frac{\left[ \left( \frac{T_{\text{П}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{М}}}{100} \right)^4 \right]}{T_{\text{П}} - T_{\text{М}}}, \quad (1.5)$$

где  $T_{\text{П}}$  и  $T_{\text{М}}$  — текущие значения температур соответственно печи и металла, К;  $C_{\text{ПР}}$  — приведенный коэффициент излучения

$$C_{\text{ПР}} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{М}}} + \frac{F_{\text{М}}}{F_{\text{П}}} \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{П}}} - 1 \right)}, \quad (1.6)$$

где  $C_0=5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — константа излучения абсолютно черного тела;  $\varepsilon_{\text{М}}$  — степень черноты нагреваемого металла;  $\varepsilon_{\text{П}}$  — степень черноты кладки печи;  $F_{\text{М}}$  — тепловоспринимающая поверхность нагреваемого металла,  $\text{м}^2$ ;  $F_{\text{П}}$  — поверхность нагревательной камеры печи,  $\text{м}^2$ .

При нагреве в среднетемпературных электрических печах с воздушной атмосферой значение  $C_{\text{ПР}} \approx 2,5 \dots 3,0$ .

При изменении температуры в рабочей камере печи среднее значение коэффициента теплоотдачи определяется по формуле

$$\alpha_{\text{Л}} = \sqrt{\alpha_{\text{Л}}^{\text{Н}} \alpha_{\text{Л}}^{\text{К}}} = \frac{\sqrt{C_{\text{ПР}}^{\text{Н}} C_{\text{ПР}}^{\text{К}} \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{ПН}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{МН}}}{100} \right)^4 \right] \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{ПК}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{МК}}}{100} \right)^4 \right]}}{\sqrt{(T_{\text{ПН}} - T_{\text{МН}})(T_{\text{ПК}} - T_{\text{МК}})}}, \quad (1.7)$$

где  $\alpha_{\text{Л}}^{\text{Н}}$  и  $\alpha_{\text{Л}}^{\text{К}}$  — коэффициенты теплоотдачи излучением соответственно в начале и в конце температурного интервала нагреваемого металла,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $T_{\text{ПН}}$  и  $T_{\text{МН}}$  — температуры соответственно печи и металла в начале нагрева,  $\text{К}$ ;  $T_{\text{ПК}}$  и  $T_{\text{МК}}$  — температуры соответственно печи и металла в конце нагрева,  $\text{К}$ ;  $C_{\text{ПР}}^{\text{Н}}$  и  $C_{\text{ПР}}^{\text{К}}$  — приведенные коэффициенты излучения соответственно в начале и конце нагрева,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Если в процессе нагрева изделий температура в нагревательной камере остается неизменной, то

$$\alpha_{\text{Л}} = C_{\text{ПР}} \cdot \frac{\sqrt{\left[ \left( \frac{T_{\text{П}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{МН}}}{100} \right)^4 \right] \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{П}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{МК}}}{100} \right)^4 \right]}}{\sqrt{(T_{\text{П}} - T_{\text{МН}}) \cdot (T_{\text{П}} - T_{\text{МК}})}}, \quad (1.8)$$

При определении  $\alpha_{\text{Л}}$  в печи с постоянной температурой можно также пользоваться формулой

$$\alpha_{\text{л}} = C_{\text{пр}} \cdot \frac{\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{мсп}}}{100}\right)^4}{T_{\text{п}} - T_{\text{мсп}}}, \quad (1.9)$$

где  $T_{\text{мсп}}$  — средняя за время нагрева температура изделия, К :

$$T_{\text{мсп}} = 1/3 (t_{\text{мн}} + 2 t_{\text{мк}}) + 273, \quad (1.10)$$

где  $t_{\text{мн}}$  и  $t_{\text{мк}}$  — температуры изделия соответственно в начале и в конце температурного интервала нагрева, °С.

Средняя температура нагреваемого металла ( $T_{\text{мсп}}$ ) может быть также определена по формуле

$$\left(\frac{T_{\text{мсп}}}{100}\right)^4 = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left(\frac{T_{\text{мн}}}{100}\right)^4 + \left(\frac{T_{\text{мк}}}{100}\right)^4 \right]. \quad (1.11)$$

В печах с постоянной температурой (700...900 °С) коэффициент теплоотдачи излучением приближенно можно подсчитать по эмпирической формуле:

$$\alpha_{\text{л}} \approx 0,03 C_{\text{пр}} \left(\frac{T_{\text{мсп}}}{100}\right)^3. \quad (1.12)$$

Топливные печи. Дымовые газы, заполняющие рабочее пространство топливной печи, передают тепло лучеиспусканием и конвекцией нагреваемым изделиям и стенкам печи. Последние излучают тепло на изделия. Все эти процессы учитываются при определении коэффициента теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле [6]:

$$\alpha_{\text{л}} = 5,67 \text{ К } \varepsilon_{\text{м}} \frac{\left(\frac{T_{\text{г}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{мсп}}}{100}\right)^4}{T_{\text{г}} - T_{\text{мсп}}}, \quad (1.13)$$

где  $T_{\text{г}}$  — температура дымовых газов в рабочем пространстве печи, К;  $T_{\text{мсп}}$  — средняя температура нагреваемого металла, К;  $\varepsilon_{\text{м}}$  — степень черноты по-

верхности изделия;  $K$  — коэффициент, учитывающий взаимные процессы лучеиспускания дымовых газов, изделия и стенок печи.

По данным Г.Л.Поляка, коэффициент  $K$  выражается формулой:

$$K = \frac{(1 - \varepsilon_{\Gamma}) + \omega}{[\varepsilon_M + \varepsilon_{\Gamma}(1 - \varepsilon_M)] \frac{1 - \varepsilon_{\Gamma} + \omega}{\varepsilon_{\Gamma}}}, \quad (1.14)$$

где  $\varepsilon_{\Gamma}$  — степень черноты дымовых газов,  $\omega$  — степень развития кладки, её численное значение приблизительно равно отношению суммарной внутренней поверхности стенок и свода печи  $F_{\Pi}$  к воспринимающей тепловое излучение поверхности металла  $F_M$ :

$$\omega = F_{\Pi} / F_M. \quad (1.15)$$

Степень черноты дымовых газов зависит от их состава. В состав печных дымовых газов в основном входят азот ( $N_2$ ), углекислый газ ( $CO_2$ ) и водяной пар ( $H_2O$ ).

Одно- и двухатомные газы имеют ничтожно малую интенсивность теплового излучения. Поэтому степень черноты дымовых газов определяется из выражения:

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O}, \quad (1.16)$$

где  $\varepsilon_{CO_2}$  — степень черноты углекислого газа;  $\varepsilon_{H_2O}$  — условная степень черноты водяного пара;  $\beta$  — поправочный коэффициент на парциальное давление водяного пара.

Степень черноты газа зависит от его температуры, парциального давления  $p$  и средней эффективной длины лучей  $S_{\text{эф}}$  в рассматриваемом газовом объеме. Величина  $p$ , Н/см<sup>2</sup> (атм) численно равна объемной доле газа в составе продуктов горения. Величину  $S_{\text{эф}}$  приближенно можно определить из выражения:

$$S_{\text{эф}} = (0,8 \dots 0,9) \cdot \frac{4V}{F}, \text{ м}, \quad (1.17)$$

где  $V$  — объем, заполненный излучающим газом, м<sup>3</sup>;  $F$  — площадь всех стенок, ограничивающих этот объем, м<sup>2</sup>.

Для определения степени черноты  $\varepsilon_{CO_2}$  и  $\varepsilon_{H_2O}$  и коэффициента  $\beta$  применяются номограммы (рис. 1.1) [6].

Множитель  $K$  в зависимости от степени черноты печных газов и степени развития кладки при  $\beta^*=0,85$  и  $\beta^*=0,95$ , где  $\beta^*=\varepsilon_M+\varepsilon_G(1-\varepsilon_M)$ , можно определить по графику, предложенному Д.В.Будриным (рис. 1.2).

Таким образом, приведенный коэффициент излучения газа, кладки и металла, входящий в формулу коэффициента теплоотдачи излучением, зависит от степени черноты металла и газов и степени развития кладки. Его значение будет увеличиваться при повышении  $\varepsilon_M$  и  $\varepsilon_G$  и степени развития кладки (то есть при увеличении  $F_{\Pi}$  и уменьшении  $F_M$ ).

При нагреве в пламенных печах с  $\varepsilon_M=0,8$ ,  $\varepsilon_G=0,30...0,35$  и  $\omega=3,0...3,5$  значение произведения  $5,67 \cdot \varepsilon_M \cdot K = C_{ГКМ} = 2,7...3,3$ . При нагреве в защитной атмосфере (ПС–0,6)  $C_{ГКМ}=1,4$ , а для атмосферы ДА —  $C_{ГКМ}=1,2$ .

Интенсивность конвективного теплообмена в рабочем пространстве печи зависит от скорости движения дымовых газов, а также от их физических свойств, формы и размеров нагреваемых изделий, температуры газов и кладки. Для среднетемпературных печей, не имеющих принудительной циркуляции печной атмосферы, он может быть принят равным  $10...15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

При вынужденном движении воздуха или дымовых газов в каналах в условиях наиболее характерного для печей турбулентного режима коэффициент теплоотдачи конвекцией равен [6]:

$$\alpha_K = Z \frac{w^{0,8}}{d^{0,2}} K_L K_{H_2O}, \quad (1.18)$$

где  $w$  — скорость движения газов, м/с;  $d$  — эквивалентный диаметр канала (для каналов круглого сечения  $d = \frac{4S}{P}$ , м; здесь  $S$  — площадь сечения канала,  $\text{м}^2$ ;  $P$  — периметр сечения, м);  $Z$  — коэффициент, зависящий от температуры дымовых газов, а именно:

$t_{\Pi}, ^\circ\text{C}$	600	800	1000	1200	1400
$Z$	1,99	1,77	1,61	1,48	1,39

$K_L$  — коэффициент, зависящий от отношения длины канала  $L$  к его диаметру  $d$ :

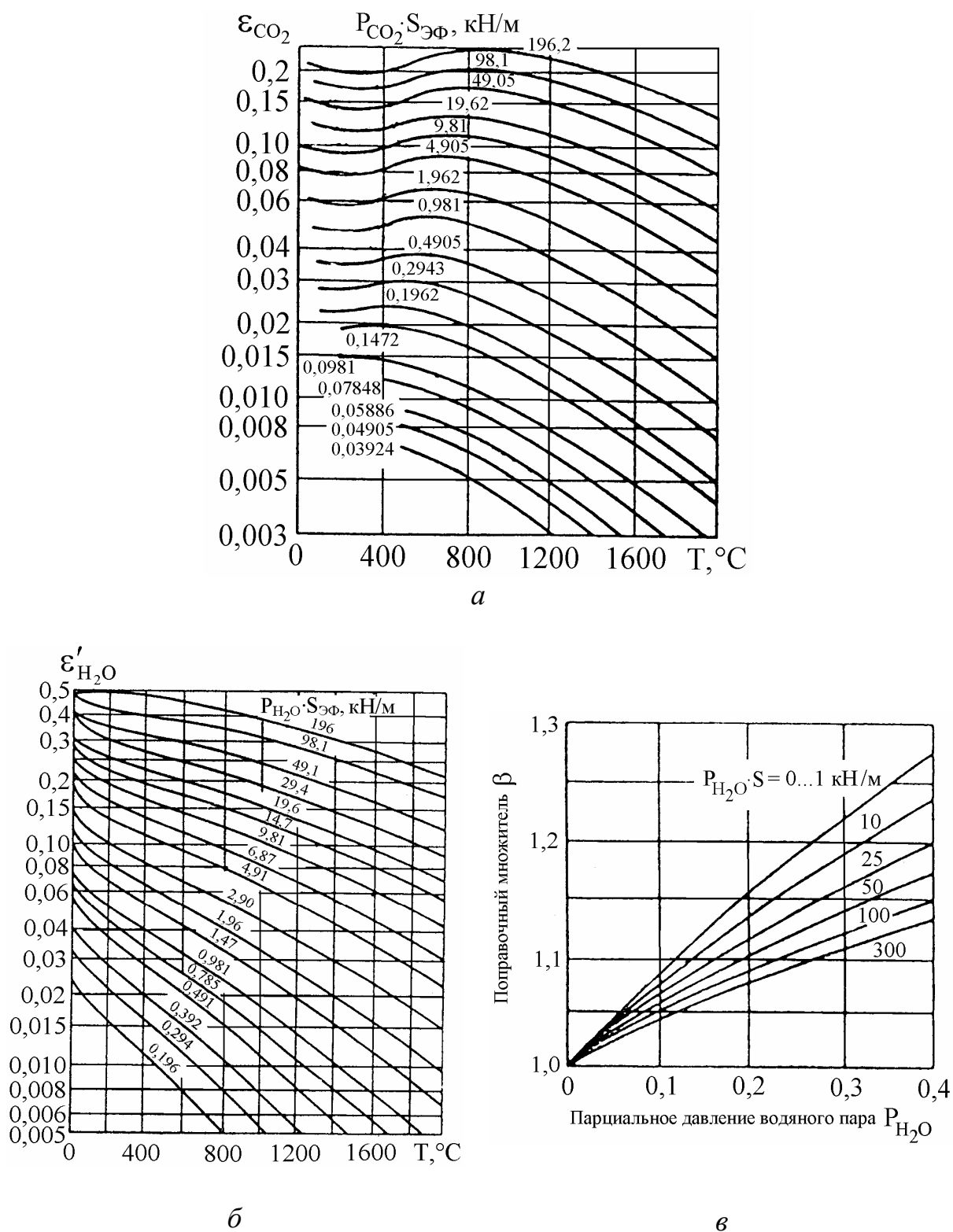


Рис. 1.1 Номограммы для определения степени черноты  $\text{CO}_2$  (*a*),  $\text{H}_2\text{O}$  (*б*) и поправочного коэффициента  $\beta$  (*в*)

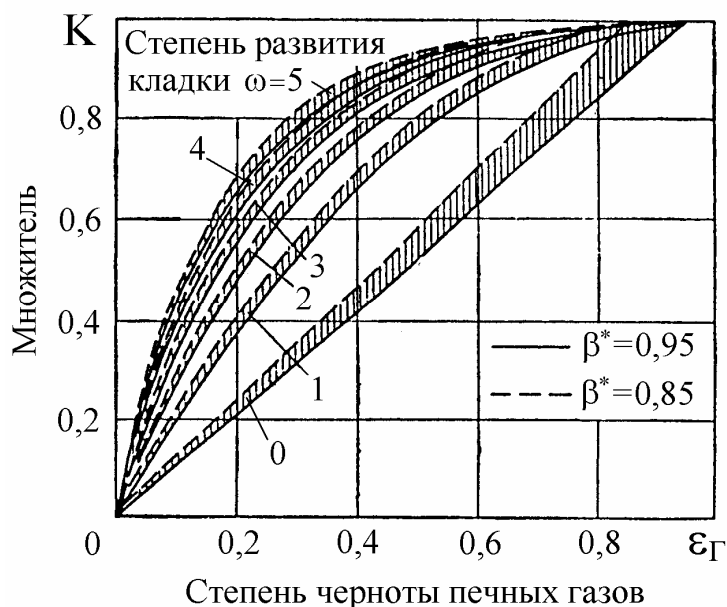


Рис. 1.2. График для расчета множителя К

L/d	2	5	10	15	20	30	40	50
K <sub>L</sub>	1,40	1,24	1,14	1,09	1,07	1,04	1,02	1,00

$K_{H_2O}$  — коэффициент, величина которого зависит от содержания водяных паров в дымовых газах или воздушном потоке:

H <sub>2</sub> O, %	0	2	5	10	15	20	25	30
K <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	1,00	1,18	1,24	1,29	1,34	1,39	1,43	1,47

Коэффициент теплоотдачи конвекцией при турбулентном движении воздуха или продуктов сгорания в каналах можно определить также с помощью следующей приближенной формулы [6]:

$$\alpha_K = 4,42 \frac{w_0^{0,75}}{d^{0,25}}, \quad (1.19)$$

где  $w_0$  — приведенная (0 °С;  $1,013 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> или 760 мм рт.ст.) скорость движения газов, м/с;  $d$  — эквивалентный диаметр канала, м.

Если известна скорость газов  $w$  при температуре  $t$ , °С, то

$$w_0 = \frac{273}{273 + t} w. \quad (1.20)$$

Для вынужденного движения газов вдоль плоской поверхности при приближенных расчетах коэффициент теплоотдачи конвекцией определяется по следующим формулам [6]:

- а) при скорости движения газов  $w_0 \leq 4,65$  м/с:
  - для полированной поверхности  $\alpha_K = 5,58 + 4,25 w_0$ ,
  - для прокатанной поверхности  $\alpha_K = 5,81 + 4,25 w_0$ ,
  - для шероховатой поверхности  $\alpha_K = 6,16 + 4,49 w_0$ ;
- б) при скорости движения газов  $w_0 > 4,65$  м/с:
  - для полированной поверхности  $\alpha_K = 7,51 w_0^{0,78}$ ,
  - для прокатанной поверхности  $\alpha_K = 7,53 w_0^{0,78}$ ,
  - для шероховатой поверхности  $\alpha_K = 7,94 w_0^{0,78}$ .

### 1.1.2. Особенности определения коэффициента теплопроводности немонолитных загрузок

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К), характеризующий способность тела проводить теплоту, зависит от природы вещества, его структуры, температуры и некоторых других факторов. Значения  $\lambda$  для сталей различных марок можно взять из справочных таблиц.

Для немонолитных загрузок, состоящих из нескольких слоев деталей (рулонов листового металла, пакетов листов, прутков, труб, насыпных загрузок и т.п.), пользуются понятием эффективной теплопроводности ( $\lambda_{эф}$ ).

При определении  $\lambda_{эф}$  в неоднородных телах применяют закон суммирования либо термических сопротивлений — при тепловом потоке, перпендикулярном слоям, либо тепловых проводимостей — при потоке, параллельном слоям. Методы определения эффективной теплопроводности различных загрузок рассматриваются в [11].

Так при определении эффективной теплопроводности листов (рулонов), у которых плоскость листов расположена перпендикулярно направлению теплового потока, рекомендуется формула:

$$\lambda_{эф} = \frac{n \cdot \delta_1 + (n-1) \cdot \delta_2}{n \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1} + (n-1) \cdot \frac{\delta_2}{\lambda_2}}, \quad (1.21)$$

где  $n$  — число листов;  $\delta_1$  — толщина листов, м;  $\lambda_1$  — коэффициент теплопроводности металла листов, Вт/(м·К);  $(n-1)$  — количество газовых прослоек



между листами;  $\delta_2$  — толщина газовой прослойки, м;  $\lambda_2$  — коэффициент теплопроводности газовой прослойки, Вт/(м·К).

Передача тепла через газовую прослойку будет происходить не только теплопроводностью, но и конвекцией, а также (особенно при высоких температурах) излучением.

Для определения коэффициента теплопроводности газовой прослойки дается формула:

$$\lambda_2 = \lambda_{\Gamma} + \alpha \delta_2, \quad (1.22)$$

где  $\lambda_{\Gamma}$  — коэффициент теплопроводности газа, находящегося в зазорах между листами, Вт/(м·К);  $\alpha = 4 \cdot 10^{-8} C_0 \varepsilon_{\Pi} T^3$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\varepsilon_{\Pi} = \frac{1}{(2/\varepsilon) - 1}$ ;  $\varepsilon$  — степень черноты листов.

Теплопроводность пакета листов, у которого плоскость листов расположена параллельно направлению теплового потока, определяют по формуле:

$$\lambda_{\text{ЭФ}} = \frac{n \cdot \lambda_1 \cdot \delta_1 + (n-1) \cdot \lambda_2 \cdot \delta_2}{n \cdot \delta_1 + (n-1) \cdot \delta_2}. \quad (1.23)$$

Для определения эффективной теплопроводности загрузок из деталей округлой формы можно использовать формулу:

$$\lambda_{\text{ЭФ}} = \lambda_{\Gamma} \left[ 1 + 3,91 \cdot \lambda_{\Gamma}^{0,1} (1-p) \cdot \ln \frac{\lambda_{\text{М}}}{\lambda_{\Gamma}} \right] + \frac{3,46 \cdot 10^{-8} \cdot C_0 T^3 d \cdot [3p \cdot \varepsilon_{\Pi} + (1-p) \cdot \varepsilon_{\text{М}}]}{1 + (1-p) \cdot (1 - \varepsilon_{\text{М}})}, \quad (1.24)$$

где  $\varepsilon_{\Pi}$  — степень черноты поры.

Для загрузки из мелких и средних изделий произвольной формы можно пользоваться формулой:

$$\lambda_{\text{ЭФ}} = \frac{1}{\frac{1-p}{\lambda_{\text{М}}} + \frac{p}{\lambda_{\Pi}}} \quad (1.25)$$

Значение пористости  $p$  определяется для различных загрузок экспериментально. Для загрузки в виде хаотически уложенных цилиндрических деталей длиной  $l$  и диаметром  $d$  получена формула

$$p = 0,326 + 0,148 \cdot (l/d - 1,25)^{0,371}, \quad (1.26)$$

$$1,25 < l/d < 10$$

На рис. 1.3 приведены экспериментальные данные по эффективной теплопроводности загрузок из хаотически уложенных стальных цилиндров различных размеров и чугунных деталей. Данные по эффективной теплопроводности упорядоченно уложенных прутков и труб даны на рис. 1.4, а загрузок из стальных шаров на рис. 1.5 [11].

Ряд данных по эффективной теплопроводности некоторых промышленных загрузок приведен в табл. 1.1.

Поскольку в этих данных отсутствует зависимость теплопроводности от температуры, они могут быть использованы только для упрощенных расчетов.

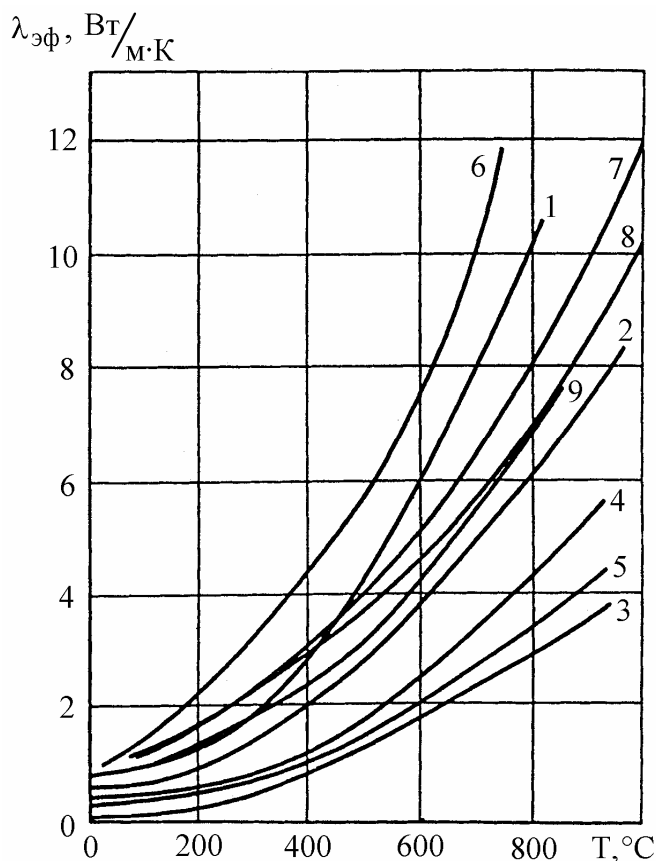


Рис. 1.3. Эффективная теплопроводность хаотически уложенных цилиндров из стали Ст3 и чугунных деталей. 1 —  $d=0,026$  м,  $l=0,0456$  м,  $p=0,53$ ; 2 —  $d=0,015$  м,  $l=0,026$  м,  $p=0,48$ ; 3 —  $d=0,0058$  м,  $l=0,0113$  м,  $p=0,45$ ; 4 — смесь загрузок 2 и 3 (6 и 10 кг); 5 — смесь загрузок 2 и 3 (10 и 6 кг); 6 — детали из белого чугуна, диаметр  $d=0,04$  м, длина  $l=0,02$  м, выемка  $0,02 \times 0,02$  м, высота  $0,01$  м, пористость загрузки  $p=0,58$ ; 7 — цилиндры  $d=0,009$  м,  $l=0,057$  м,  $p=0,6$ ; 8 — то же,  $l=0,062$  м,  $p=0,65$ ; 9 — цилиндры из Ст3,  $d=0,0164$  м,  $l=0,0351$  м,  $p=0,46$ .

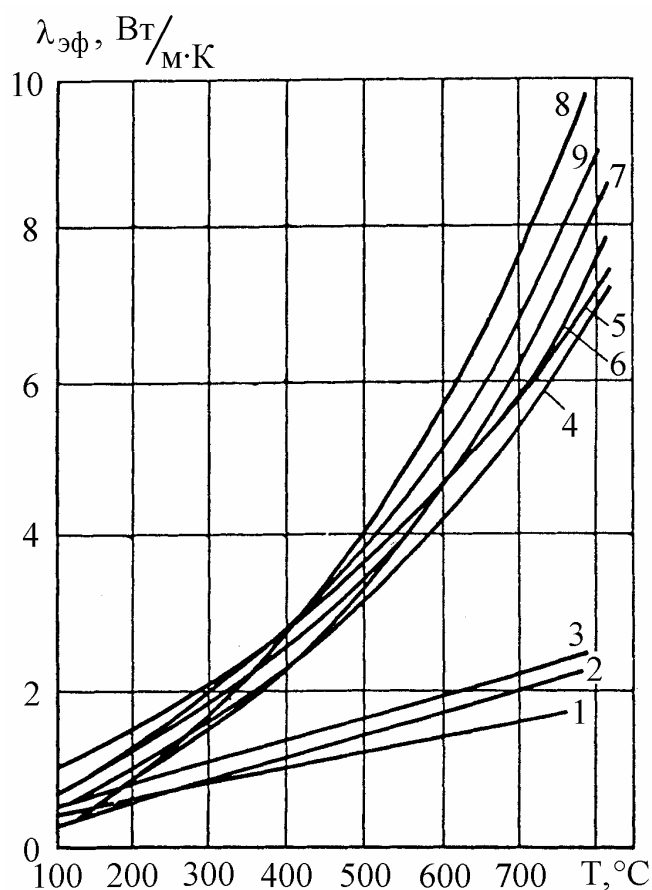


Рис. 1.4. Теплопроводность пакетов стальных прутков и труб. 1 — диаметр 0,002 м, плотнейшая укладка; 2 — то же, диаметр 0,0065 м; 3 — то же, диаметр 0,01 м; 4 — прутки диаметром 0,03 м, пористость  $p=0,16$ ; 5 — то же, диаметр 0,0145 м, пористость  $p=0,28$ ; 6 — то же, диаметр 0,012 м, пористость  $p=0,48$ ; 7 — то же, диаметр 0,012 м, пористость  $p=0,52$ ; 8 — трубы, наружный диаметр 0,028 м, толщина стенки 0,0015 м, пористость  $p=0,91$ ; 9 — то же, наружный диаметр 0,018 м, пористость  $p=0,88$ .

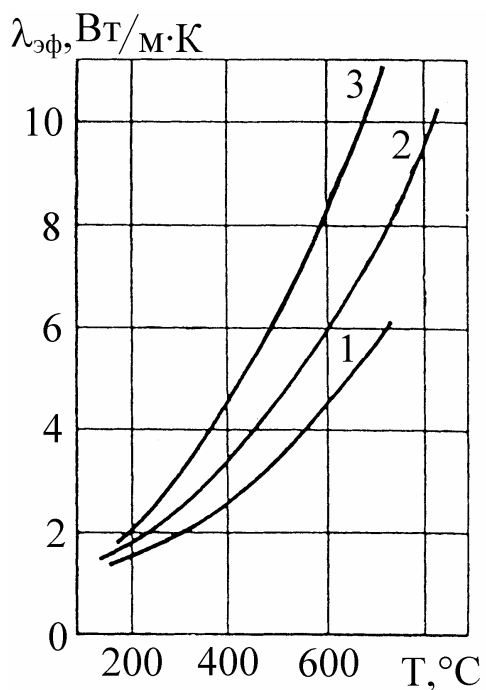


Рис. 1.5. Эффективная теплопроводность загрузки из стальных шаров. 1 — шары, сталь ШХ15, диаметр 0,0191 м, пористость  $p=0,4$ ; 2 — то же, диаметр 0,0285 м; 3 — то же, диаметр 0,0446 м

Таблица 1.1

## Эффективная теплопроводность промышленных загрузок [11]

Загрузка	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	$\lambda_{эф}$ , Вт/(м·К)
Насыпная загрузка из стальных мелких болтов и гаек диаметром 0,012...0,025 м	1650...1800	4,65
То же, но шарики стальные с диаметром 0,010...0,012 м	4400	6...9
То же, но тонкие кольца	4350	7...10
Стальные детали в металлической стружке	2000...3000	0,7...1,3
Стальная проволока в бунтах	—	2...3
Стопа стальных листов толщиной 0,001 м	—	0,4...0,5

## 1.2. Расчет нагрева изделий в печах с постоянной температурой

### 1.2.1. Расчет времени нагрева теплотехнически «тонких» изделий

Температура печи в процессе нагрева изделий не меняется, если мощность печи соответствует расходу энергии на нагрев изделий. Так, установленная мощность печи в начальный момент нагрева изделий не должна быть меньше следующего значения:

$$N_y = (1,2...1,5) \cdot \frac{\alpha F(t_{\text{п}} - t_{\text{мн}})}{10^3 \eta}, \quad (1.27)$$

где  $N_y$  — установленная мощность печи, кВт;  $F$  — активная поверхность садки изделий, м<sup>2</sup>;  $\eta$  — КПД печи;  $t_{\text{п}}$  — температура печи, °С;  $t_{\text{мн}}$  — начальная температура изделий, °С.

По мере нагрева изделий расход энергии в печи должен уменьшаться пропорционально скорости нагрева изделий, что практически осуществляется при помощи терморегуляторов. При таком условии процесс нагрева «тонких» изделий при преобладании конвективного теплообмена описывается простым уравнением теплового баланса:

$$\alpha F \cdot (t_{\text{п}} - t) \cdot d\tau = G c \cdot dt, \quad (1.28)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $t$  — текущая температура изделия;  $t_{\text{п}}$  — температура печи,  $d\tau$  — элементарный промежуток времени;  $G$  — масса из-

делия;  $c$  — удельная теплоёмкость изделия;  $dt$  — элементарное изменение температуры изделия;  $F$  — активная поверхность.

Под активной поверхностью понимается поверхность изделия, воспринимающая тепло от внешней среды. При сложном профиле нагреваемого изделия активная поверхность считается по огибающему периметру (рис. 1.6).

Интегрируя уравнение (1.28) в пределах от начальной температуры изделия  $t_{\text{МН}}$  до конечной температуры изделия  $t_{\text{МК}}$ , получим формулу для определения времени нагрева изделия:

$$\tau_{\text{н}} = \frac{Gc}{\alpha F} \cdot \ln \frac{t_{\text{П}} - t_{\text{МН}}}{t_{\text{П}} - t_{\text{МК}}} . \quad (1.29)$$

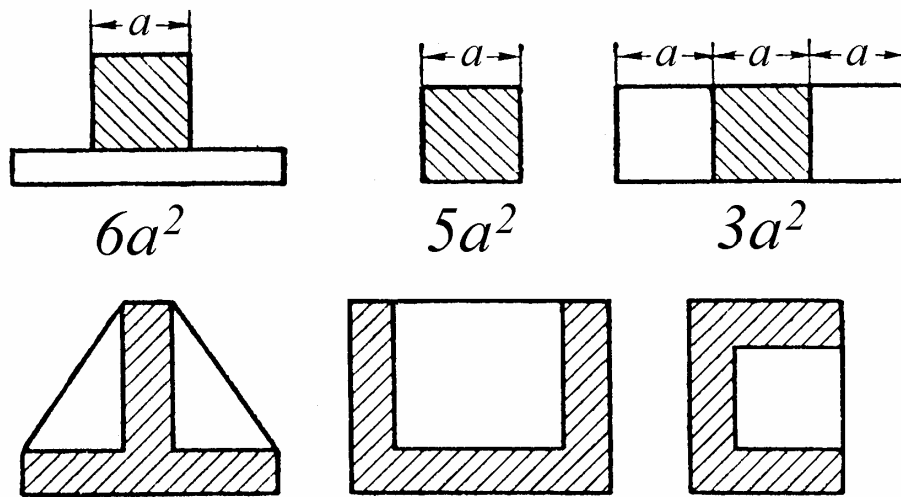


Рис. 1.6. Активная поверхность некоторых изделий

Формула (1.29) определяет продолжительность нагрева изделий в печах с конвективным теплообменом. Её можно использовать и для расчета нагрева изделий в печах с преобладанием теплообмена лучеиспусканием, определив соответствующим образом коэффициент теплоотдачи (раздел 1.1.2). Однако для печей с теплообменом лучеиспусканием более точной является формула Б.В.Старка, полученная на основании закона излучения Стефана–Больцмана:

$$\tau = \frac{Gc}{C_{\text{пр}} F} \cdot \frac{100}{(T_{\text{П}} / 100)^3} \cdot \left[ \psi \left( \frac{T_{\text{МК}}}{T_{\text{П}}} \right) - \psi \left( \frac{T_{\text{МН}}}{T_{\text{П}}} \right) \right] , \quad (1.30)$$

где  $\tau$  — время нагрева, с;  $T_{\Pi}$  — температура печи, К;  $T_{МК}$  — конечная температура загрузки, К;  $T_{МН}$  — начальная температура загрузки, К;  $G$  — масса загрузки, кг;  $c$  — удельная теплоемкость загрузки, Дж/(кг·К);  $F$  — тепловоспринимающая поверхность загрузки, м<sup>2</sup>;  $C_{\Pi P}$  — приведенный коэффициент излучения, Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>);  $\psi$  — функция отношения температуры загрузки к температуре печи:

$$\psi\left(\frac{T}{T_{\Pi}}\right) = 0,25 \cdot \ln \frac{1 + (T/T_{\Pi})}{1 - (T/T_{\Pi})} + 0,5 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{T}{T_{\Pi}}\right), \quad (1.31)$$

Значения функции  $\psi$  могут быть определены по графику, изображенному на рис. 1.7 в зависимости от соотношений  $\frac{T_{МН}}{T_{\Pi}}$  и  $\frac{T_{МК}}{T_{\Pi}}$  [5].

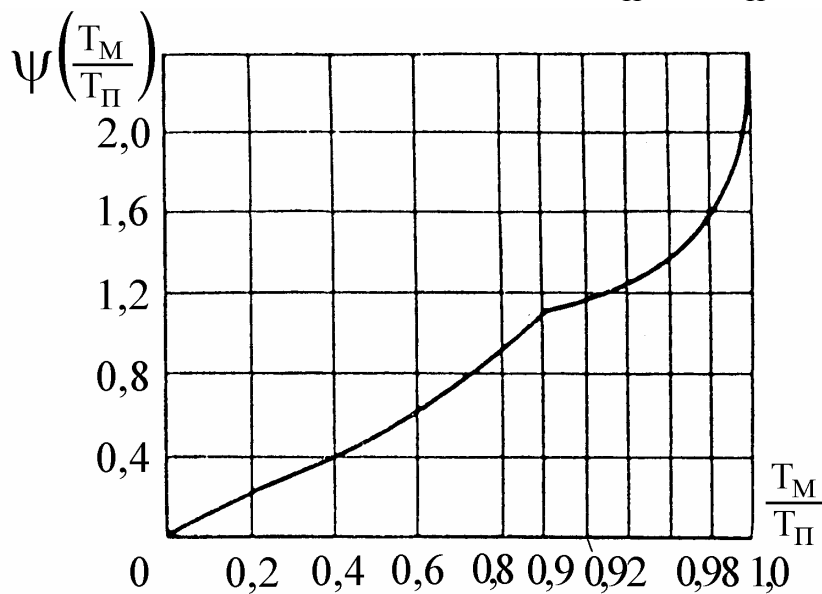


Рис. 1.7. Зависимость  $\psi\left(\frac{T_{\text{М}}}{T_{\Pi}}\right)$  от  $\frac{T_{\text{М}}}{T_{\Pi}}$

Для расчета времени охлаждения массивных изделий с критерием Био менее 4,0 можно пользоваться формулой для тонких тел с введением поправочного коэффициента  $m$ , зависящего от массивности изделий и их формы. Формула приобретает следующий вид:

$$\tau_H = \frac{Gcm}{\alpha F} \cdot \ln \frac{t_{\Pi} - t_{MH}}{t_{\Pi} - t_{MK}}, \quad (1.32)$$

Поправочный коэффициент  $m = 1 + Bi/(k+2)$ , где  $k$  — коэффициент формы, который равен 1 для пластины, 2 для цилиндра и 3 для шара.

При расчетах времени нагрева как тонких, так и массивных изделий нужно принимать во внимание способ их укладки в печи и расстояние между ними. На рис. 1.8 приведены коэффициенты  $K_{РАСП}$  времени нагрева изделий круглого и квадратного сечений в зависимости от расположения в печи [5].







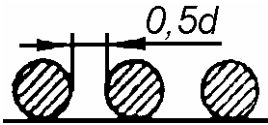
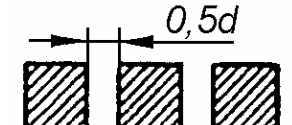

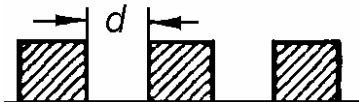
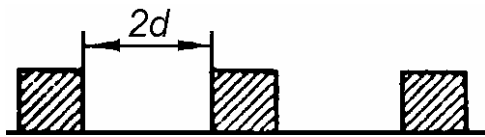
Расположение изделий	$K_{РАСП}$	Расположение изделий	$K_{РАСП}$
	1		1
	1		1,4
	2		4
	1,4		2,2
	1,3		2,0
			1,8

Рис. 1.8. Коэффициенты времени нагрева  $K_{РАСП}$  в зависимости от расположения изделий в печи;  $d$  — диаметр или сторона квадрата

### 1.2.2. Расчет времени нагрева и охлаждения теплотехнически «массивных» изделий в среде с постоянной температурой

Расчет времени нагрева и охлаждения массивных изделий удобно вести по специальным графикам, наиболее точные из которых разработаны

Д.В.Будриным. Они составлены для расчета времени нагрева или охлаждения поверхности и средней плоскости пластины (рис. 1.9), а также для поверхности и оси цилиндра (рис. 1.10). По этим графикам можно также путем перемножения температурных критериев (относительных температур) определить температуру различных точек поверхности и центра дисков, цилиндров, призм для любого момента времени.

По оси абсцисс отложено значение независимой переменной — относительного времени (числа Фурье) в логарифмическом масштабе, а по оси ординат — температурный критерий (относительная температура), представляющий собой отношение текущей разности температуры данной точки и окружающей среды к этой же разности до начала нагрева или охлаждения:

$$\theta = \frac{t_{\Pi} - t_{\text{ПОВ}}}{t_{\Pi} - t_0} . \quad (1.33)$$

Критериальное уравнение представлено в следующем виде:

$$\theta = f(\text{Fo}, \text{Bi}, \frac{x}{S}) \text{ или } \frac{t_{\Pi} - t_{\text{ПОВ}}}{t_{\Pi} - t_0} = f(\frac{a\tau}{S^2}, \frac{\alpha S}{\lambda}, \frac{x}{S}) , \quad (1.34)$$

где  $\theta$  — относительная температура;  $\text{Fo}$  — число Фурье ( $\text{Fo} = \frac{a\tau}{S^2}$ );  $\text{Bi}$  — число

Био ( $\text{Bi} = \frac{\alpha S}{\lambda}$ );  $S$  — половина толщины пластины;  $\frac{x}{S}$  — относительная координата, показывающая положение точки в изделии толщиной  $S$ .

Прямые линии на диаграмме, меняющие свое направление, относятся к различным значениям  $\text{Bi}$ ; изделиям большего сечения соответствует большее значение  $\text{Bi}$ , а изделиям меньшего сечения — меньшее. Промежуточные значения  $\text{Bi}$  определяются интерполяцией. По значению  $\text{Bi}$  и  $\theta$  на графике определяется  $\text{Fo}$ , откуда определяется время нагрева. Далее по  $\text{Bi}$  и  $\text{Fo}$  по графику для нагрева средней плоскости пластины или оси цилиндра можно определить относительную температуру и температуру средней плоскости пластины или оси цилиндра.



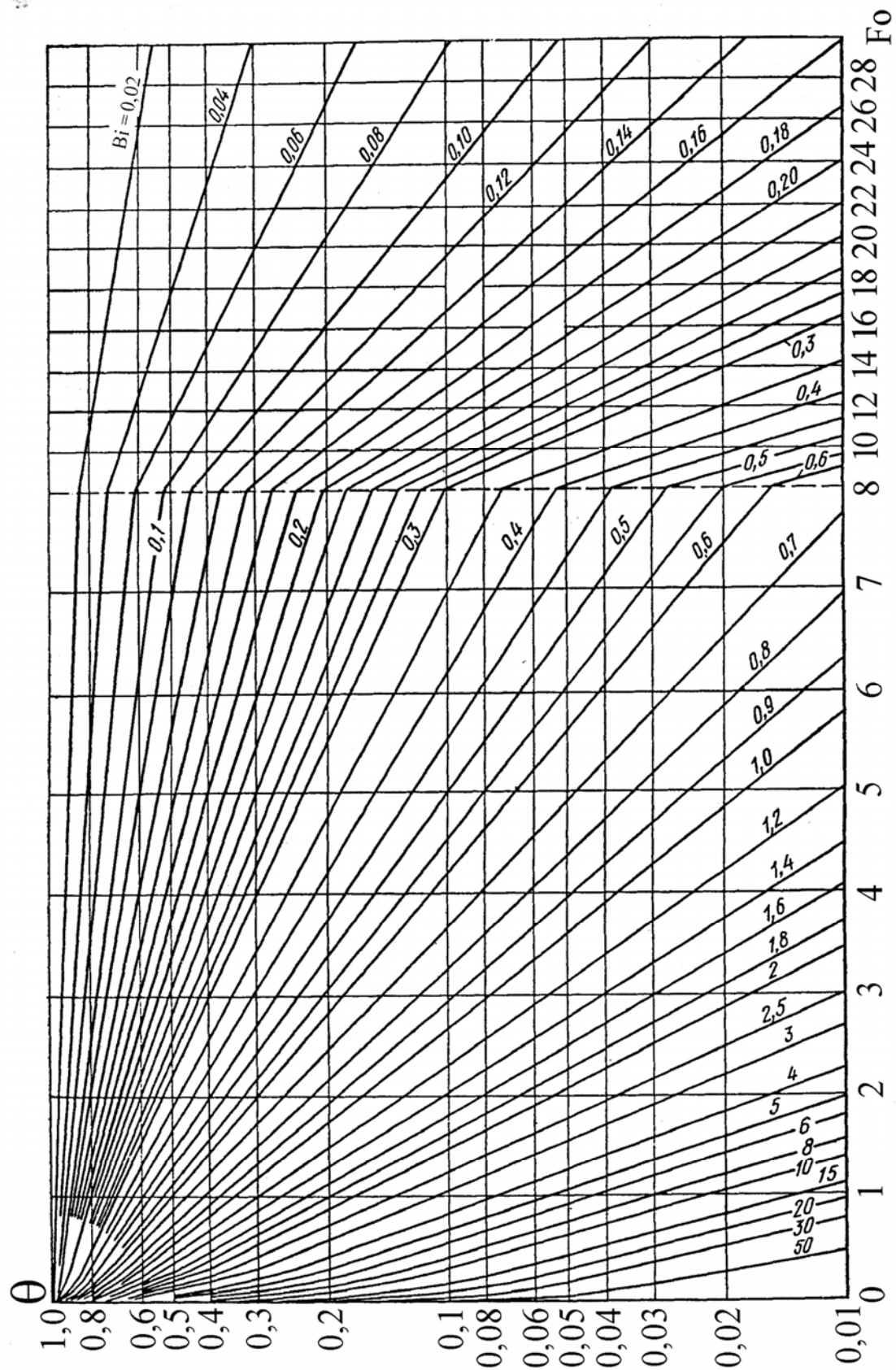


Рис. 1.9.а. График для расчёта времени нагрева или охлаждения поверхности пластины

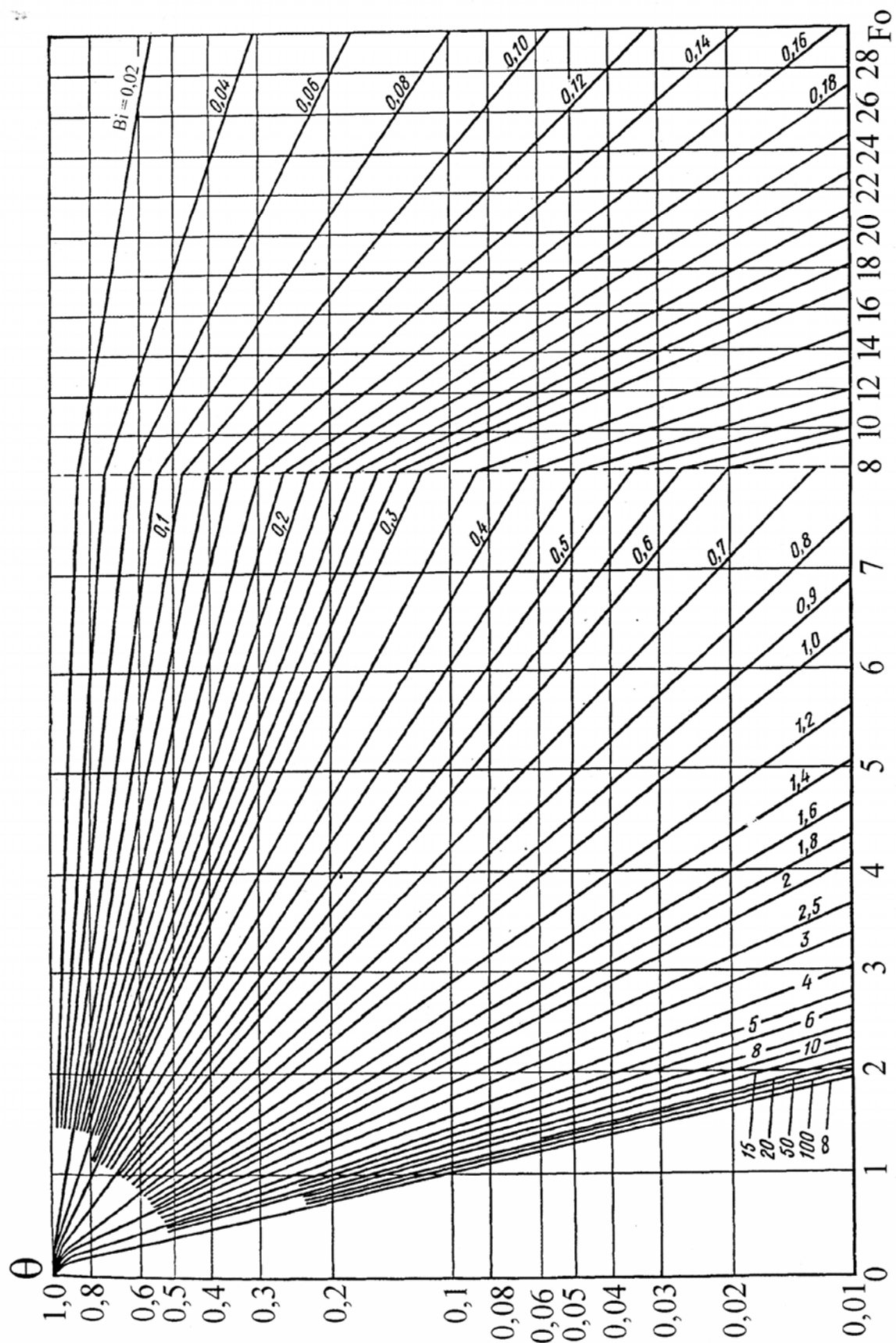


Рис. 1.9.6. График для расчёта времени нагрева или охлаждения средней плоскости пластины

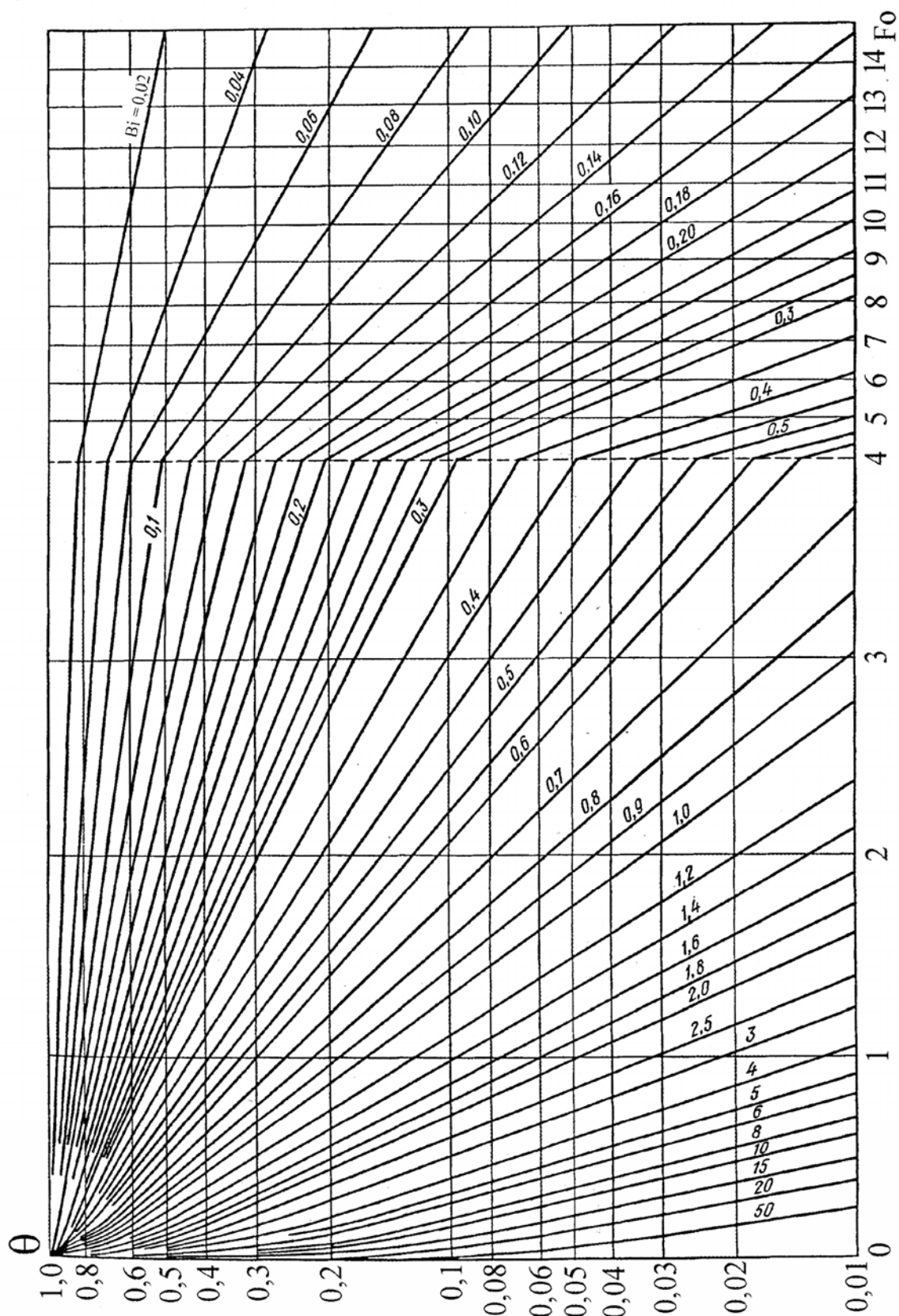


Рис. 1.10.а. График для расчёта времени нагрева или охлаждения поверхности цилиндра

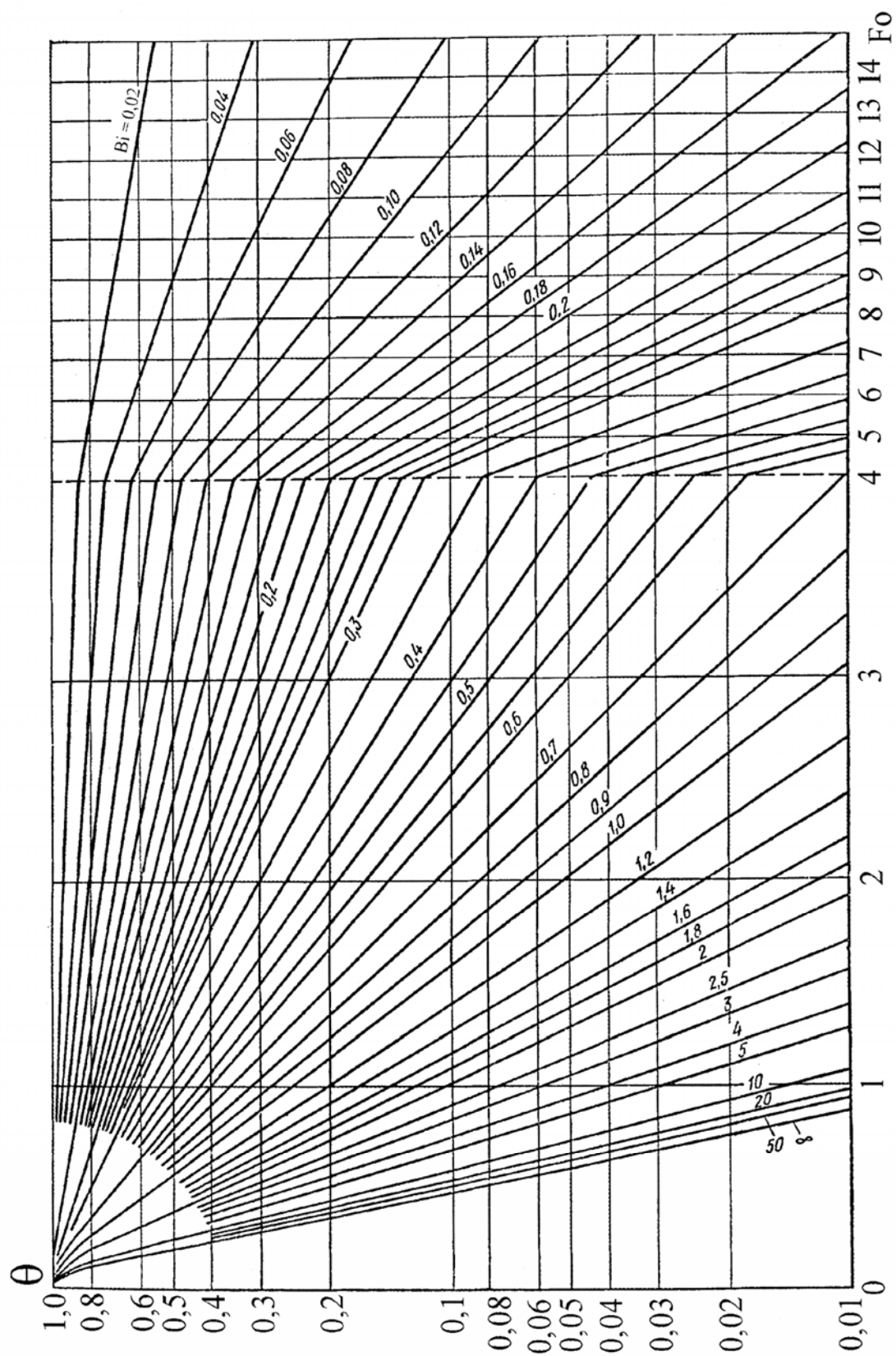


Рис. 1.10.б. График для расчёта времени нагрева или охлаждения оси цилиндра

### 1.2.3. Расчет времени выдержки для выравнивания температуры

После достижения заданной температуры изделиям необходима выдержка для выравнивания температуры. Зависимость перепада температур в конце нагрева от перепада в начале нагрева выражается следующими уравнениями [5]:

для пластины толщиной  $2S$  при  $\frac{a\tau}{S^2} > 0,06$

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{НАЧ}}} = 1,03 \cdot \exp\left(-2,47 \cdot \frac{a \cdot \tau}{S^2}\right);$$

для цилиндра радиуса  $R$  при  $\frac{a\tau}{R^2} > 0,08$

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{НАЧ}}} = 1,11 \cdot \exp\left(-5,78 \cdot \frac{a \cdot \tau}{R^2}\right).$$

Перемножив эти выражения, получим уравнение выравнивания температуры в цилиндре, радиус которого равен  $R$ , а длина  $2S$ :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{НАЧ}}} &= 1,03 \exp\left(-2,47 \cdot \frac{a \cdot \tau}{S^2}\right) \cdot 1,11 \exp\left(-5,78 \frac{a \cdot \tau}{R^2}\right) = \\ &= 1,142 \exp\left(-2,47 \frac{a\tau}{S^2} - 5,78 \frac{a\tau}{R^2}\right). \end{aligned} \quad (1.35)$$

Для цилиндра, у которого радиус равен длине:  $2R=2S$ , или  $R=S$ , уравнение примет следующий вид:

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{НАЧ}}} = 1,142 \cdot \exp\left(-8,25 \cdot \frac{a \cdot \tau}{R^2}\right). \quad (1.36)$$

Аналогично для квадратной призмы сечением  $2S \times 2S$  и для куба со стороной  $2S$  получим:

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{НАЧ}}} = 1,09 \cdot \exp\left(-7,41 \cdot \frac{a \cdot \tau}{S^2}\right). \quad (1.37)$$

Расчет времени для изделий различной формы может быть сделан более простым методом — путем перемножения коэффициентов  $K_F$  и  $K_T$ . Коэффици-

коэффициент  $K_F$  зависит только от формы тела и представляет собой значение  $\frac{a\tau}{L^2}$  ( $L$  — половина минимального размера,  $a$  — коэффициент температуропроводности,  $\tau$  — время), при котором перепад температур  $\Delta t = t_{\text{ПОВ}} - t_{\text{ЦЕНТРА}}$  уменьшается до 1 % своего первоначального значения. Коэффициент  $K_T$  зависит от отношения перепада температур в конце нагрева  $\Delta t$  к его первоначальному значению  $\Delta t_{\text{НАЧ}}$ .

Коэффициенты  $K_T$  и  $K_F$  приведены в табл. 1.2 и 1.3 [5].

Таблица 1.2

Значения коэффициента  $K_T$

$\frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{НАЧ}}}$	$K_T$	$\frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{НАЧ}}}$	$K_T$	$\frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{НАЧ}}}$	$K_T$	$\frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{НАЧ}}}$	$K_T$
0,01	1,00	0,08	0,55	0,20	0,35	0,40	0,20
0,02	0,85	0,10	0,50	0,25	0,30	0,50	0,15
0,05	0,65	0,15	0,41	0,30	0,26	—	—

Таблица 1.3

Значения коэффициента  $K_F$

Параллелепипеды	$K_F$	Параллелепипеды	$K_F$	Цилиндры D×H	$K_F$
1×1×1	0,63	1×2×2	1,25	1×5	0,81
1×1×1,5	0,77	1×2×3	1,39	1×4	0,80
1×1×2	0,85	1×2×4	1,46	1×3	0,79
1×1×3	0,91	1×2×5	1,49	1×2	0,74
1×1×4	0,93	1×3×3	1,57	1×1,5	0,68
1×1×5	0,94	1×3×4	1,67	1×1	0,56
1×1,5×1,5	0,99	1×3×5	1,71	1,5×1	0,91
1×1,5×2	1,09	1×4×4	1,79	2×1	1,18
1×1,5×3	1,21	1×4×5	1,84	3×1	1,52
1×1,5×4	1,27	1×5×5	1,88	4×1	1,76
1×1,5×5	1,29			5×1	1,88

### 1.3. Определение времени нагрева изделий в печах периодического действия

#### 1.3.1. Нагрев теплотехнически «тонких» изделий

Время нагрева тонкого изделия в электрической печи периодического действия зависит от начальной температуры изделия и мощности печи (рис. 1.11).

Процесс нагрева разбивают на два этапа.

Первый этап — от начала нагрева до достижения в камере печи заданной температуры — характеризуется тем, что вследствие низкой температуры садки она поглощает всю выделяющуюся в камере печи полезную мощность и нагрев изделий осуществляется при постоянном тепловом потоке. Тепловой поток, воспринимаемый единицей поверхности нагреваемых изделий, определяется по формуле

$$q_{\Pi} = \frac{N_{\Pi} - N_{\text{пот}}}{F_{\text{М}}}, \quad (1.38)$$

где  $N_{\Pi}$  — мощность печи;  $N_{\text{пот}}$  — мощность тепловых потерь печи;  $F_{\text{М}}$  — тепловоспринимающая поверхность изделий.

Для высокотемпературной печи уравнение теплопередачи примет вид:

$$q_{\Pi} = C_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_{\Pi}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{М}}}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2. \quad (1.39)$$

Здесь  $C_{\text{пр}}$  — приведенный коэффициент излучения.

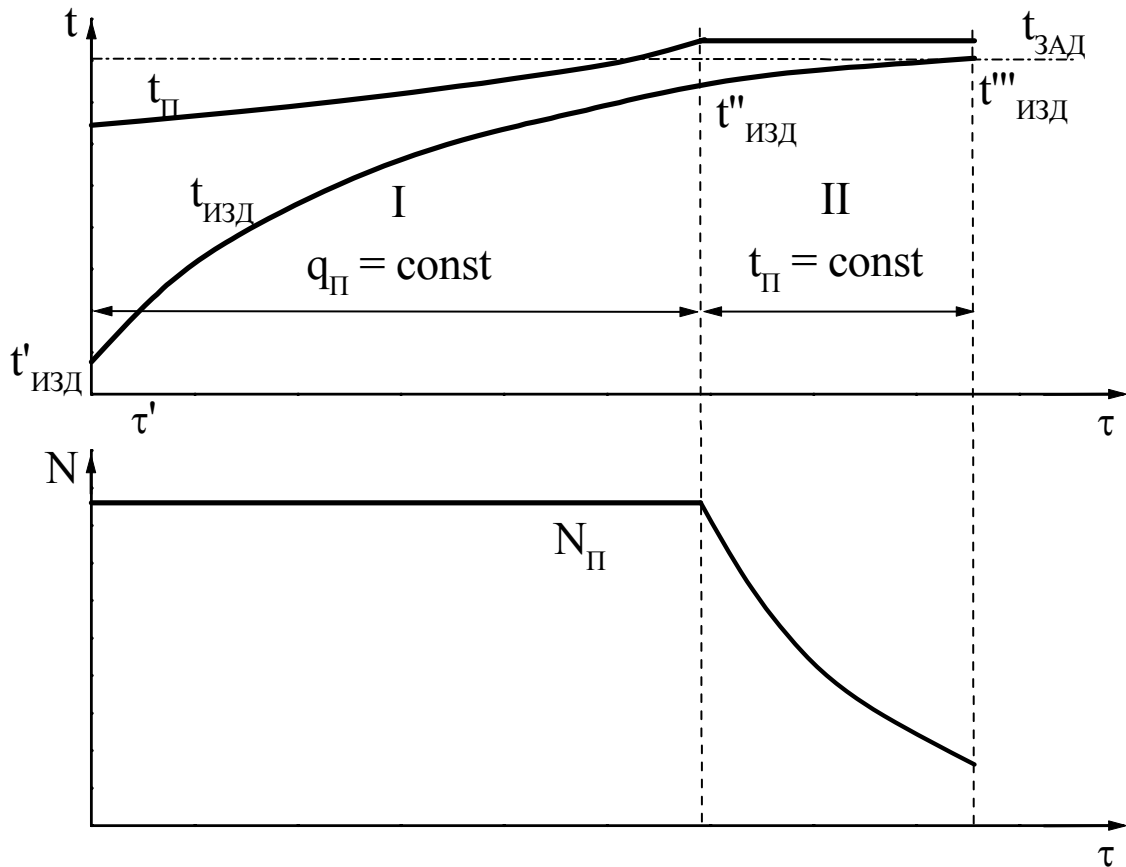


Рис. 1.11. График нагрева теплотехнически тонкого изделия в печи периодического действия

Конец первого и начало второго этапа характеризуются достижением заданного значения температуры рабочего пространства. Температура теплотехнически тонких изделий в этот момент времени в соответствии с формулой (1.39) составляет:

$$t_M^{\Pi} = 100 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{T_{\Pi}}{100}\right)^4 - \frac{q_{\Pi}}{C_{\Pi\P}}} - 273, \quad (1.40)$$

Количество тепла воспринимаемого изделием за период первого этапа,  $q_{\Pi} F_M \tau_1$ , где  $\tau_1$  — длительность первого этапа. Это тепло пойдет на нагрев изделия от начальной температуры  $t_M^I$  до  $t_M^{\Pi}$ , поэтому:

$$q_{\Pi} F_M \tau_1 = Gc \cdot (t_M^{\Pi} - t_M^I), \quad (1.41)$$

и, следовательно,



$$\tau_1 = \frac{Gc}{q_{\Pi}F_M} \cdot (t_M^{\Pi} - t_M^I), \text{ с}, \quad (1.42)$$

где  $G$  — масса изделий;  $c$  — средняя удельная теплоемкость.

Для определения  $\tau_1$  необходимо задаться значением теплового потока ( $q_{\Pi}$ ). Рациональное использование мощности достигается в тех случаях, когда температура загрузки в конце первого периода нагрева ( $t_M^{\Pi}$ ) составляет 80...90 % от заданной температуры нагрева ( $t_M^{\text{III}}$ ).

В случае, когда известны размеры печи и неизвестна её мощность, удельный тепловой поток можно определить из выражения:

$$q_{\Pi} = C_{\text{ПР}} \cdot \left[ \left( \frac{T_{\Pi}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_M^{\Pi}}{100} \right)^4 \right] + 10 \cdot (T_{\Pi} - T_M^{\Pi}), \text{ Вт/м}^2, \quad (1.43)$$

где  $T_{\Pi}$ ,  $T_M^{\Pi}$  — температура соответственно печи и изделия в конце первого периода нагрева, К.

По достижении печью заданного значения температуры начинает работать терморегулятор, поддерживая её неизменной, а потребляемая мощность печи при этом снижается. Таким образом, в течение второго этапа нагрев изделий будет осуществляться при постоянной температуре.

Для низко- и среднетемпературных печей время нагрева во втором периоде (этапе) можно рассчитать по следующей формуле:

$$\tau_2 = \frac{Gc}{\alpha_{\Sigma}F_M} \cdot \ln \frac{t_{\Pi} - t_M^{\Pi}}{t_{\Pi} - t_M^{\text{III}}}, \text{ с}, \quad (1.44)$$

где  $G$  — масса нагреваемых изделий, кг;  $t_M^{\Pi}$  и  $t_M^{\text{III}}$  — температуры нагреваемых изделий соответственно в начале и конце второго периода нагрева, °С;  $t_{\Pi}$  — температура печи во втором периоде нагрева, °С;  $c$  — средняя удельная теплоемкость загрузки во втором периоде нагрева, Дж/(кг·К);  $\alpha_{\Sigma}$  — суммарный коэффициент теплоотдачи во втором периоде нагрева (при  $T_{\Pi}=\text{const}$ ), (Вт/м<sup>2</sup>·К);  $F_M$  — тепловоспринимающая поверхность загрузки, м<sup>2</sup>.

Для высокотемпературных печей (при преобладании лучистого теплообмена) время нагрева на втором этапе определяется по следующей формуле:

$$\tau_2 = \frac{Gc}{C_{\text{пр}} F_M} \cdot \frac{100}{(T_{\text{п}}/100)^3} \cdot \left[ \psi\left(\frac{T_M^{\text{III}}}{T_{\text{п}}}\right) - \psi\left(\frac{T_M^{\text{II}}}{T_{\text{п}}}\right) \right], \text{ с}, \quad (1.45)$$

где  $\psi(T/T_{\text{п}})$  — функция отношения температуры загрузки к температуре печи, значения которой могут быть вычислены по формуле:

$$\psi\left(\frac{T}{T_{\text{п}}}\right) = 0,25 \cdot \ln \frac{1 + (T/T_{\text{п}})}{1 - (T/T_{\text{п}})} + 0,5 \cdot \arctg\left(\frac{T}{T_{\text{п}}}\right). \quad (1.46)$$

Для нахождения значений температурной функции можно также пользоваться графиком, приведенным на рис. 1.7.

### 1.3.2. Нагрев теплотехнически «массивных» изделий

График нагрева в печах периодического действия теплотехнически массивных изделий приведен на рис. 1.12.

Как и в предыдущем случае процесс нагрева разбивается на два периода: первый период — нагрев при постоянном тепловом потоке, второй — нагрев при постоянной температуре печи.

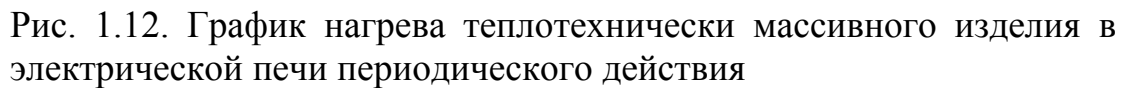
Длительность первого периода (при  $q_{\text{п}} = \text{const}$ ) для бесконечной пластины толщиной  $2S$  определяется по формуле

$$\tau_1 = \tau^{\text{I}} + \tau^{\text{II}} = 0,3 \cdot \frac{S^2}{a} + \frac{c\gamma S}{q_{\text{п}}} \cdot (t_{\text{пов}}^{\text{II}} - t_{\text{пов}}^{\text{I}}), \quad (1.47)$$

для бесконечного цилиндра радиусом  $R$

$$\tau_1 = \tau^{\text{I}} + \tau^{\text{II}} = 0,25 \cdot \frac{R^2}{a} + \frac{c\gamma R}{2q_{\text{п}}} \cdot (t_{\text{пов}}^{\text{II}} - t_{\text{пов}}^{\text{I}}), \quad (1.48)$$

где  $a = \lambda / c\gamma$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\tau^{\text{I}}$  — начальный период нагрева, к концу которого в изделии устанавливается регулярный режим, который характеризуется постоянным перепадом температуры между поверхностью и центром изделия, то есть при  $\Delta t = t_{\text{пов}}^{\text{I}} - t_{\text{центр}}^{\text{I}} = t_{\text{пов}}^{\text{II}} - t_{\text{центр}}^{\text{II}} = \text{const}$ ;  $\tau^{\text{II}}$  — время нагрева изделия в регулярном режиме, с;  $t_{\text{пов}}^{\text{I}}$ ,  $t_{\text{центр}}^{\text{I}}$  — температура соответственно поверхности и центра изделия, конца начального и начала регулярного режима,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{пов}}^{\text{II}}$  — температура поверхности изделия в конце первого периода нагрева,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\gamma$  — плотность металла,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

$$t_{\text{ПОВ}}^{\text{I}} = 1,27 \cdot q_{\text{П}} S / 2\lambda + t_{\text{МН}} , \quad t_{\text{ЦЕНТР}}^{\text{I}} = 0,27 \cdot q_{\text{П}} S / 2\lambda + t_{\text{МН}} .$$
$$t_{\text{IOB}}^{\text{I}} = 1,5 \cdot q_{\text{II}} R / 2\lambda + t_{\text{MH}} , \quad t_{\text{ЦЕНТР}}^{\text{I}} = 0,5 \cdot q_{\text{II}} R / 2\lambda + t_{\text{MH}} .$$

$$t_{\text{POB}}^{\text{II}} - t_{\text{MH}} = 100 \cdot 4 \sqrt{\left(\frac{T_{\text{II}}}{100}\right)^4 - \frac{q_{\text{II}}}{C_{\text{HP}}}} - 273. \quad (1.49)$$

Продолжительность нагрева изделий на втором этапе  $\tau_2$  до заданной температуры  $t''$  можно определить с помощью графиков Д.В.Будрина. При этом относительные температуры  $\theta_{\text{ПОВ}}$  и  $\theta_{\text{ЦЕНТР}}$  определяют из выражений:

$$\theta_{\text{ПОВ}} = \frac{t_{\text{П}} - t_{\text{ПОВ}}^{\text{П}}}{t_{\text{П}} - t_{\text{СР}}^{\text{П}}},$$

$$\theta_{\text{ЦЕНТР}} = \frac{t_{\text{П}} - t_{\text{ЦЕНТР}}^{\text{П}}}{t_{\text{П}} - t_{\text{СР}}^{\text{П}}},$$
(1.50)

где  $t_{\text{СР}}^{\text{П}}$  — средняя температура изделия к концу первого периода нагрева, °С:

для бесконечной пластины  $t_{\text{СР}}^{\text{П}} = t_{\text{ПОВ}}^{\text{П}} - 0,7\Delta t$ ;

для бесконечного цилиндра  $t_{\text{СР}}^{\text{П}} = t_{\text{ПОВ}}^{\text{П}} - 0,6\Delta t$ ;

При определении (с помощью графиков Д.В.Будрина) времени второго периода ( $\tau_2$ ) значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\Sigma}$ , подставляемого в число Био, рассчитывают по формулам, приведённым в разд. 1.1.1.

Расчёт времени нагрева насыпных немонолитных загрузок может быть осуществлен так же, как и монолитных, с учетом их насыпной плотности и эквивалентного коэффициента теплопроводности.

В случае нагрева коротких изделий при определении времени второго периода следует использовать метод перемножения температурных критериев.

### 1.3.3. Особенности расчета многозонных методических печей

В отличие от печей садового типа в методических печах температура в каждой точке нагревательной камеры неизменна во времени, а температура нагреваемых изделий, которые перемещаются в рабочей камере с помощью специального устройства (конвейера, рольганга и др.), возрастает от загрузочного конца к разгрузочному.

С точки зрения увеличения производительности печи целесообразно изделия нагревать при постоянной температуре в рабочей камере. При этом мощность нагревателей по длине печи должна быть различной — максимальной в передней зоне, с постепенным снижением до минимального значения (мощности холостого хода) у разгрузочного окна.

Однако, вследствие трудности практического выполнения данных условий, современные методические печи, как правило, имеют не одну, а несколько (3...4) самостоятельно регулируемых тепловых зон. В таких печах мощность в первой зоне наибольшая, что создает условия для максимальной скорости нагрева изделий, а в последней, в которой мощность нагревателей в основном компенсирует тепловые потери печи, происходит выравнивание температуры по сечению нагреваемых изделий.

В трёхзонных методических печах мощность нагревателей по зонам одинаковой длины распределяют приблизительно в соотношении  $60+30+10=100\%$ , а в четырёхзонных  $40+30+20+10=100\%$ .

Иногда с целью быстрого разогрева холодной печи до технологической температуры мощность последней зоны по сравнению с расчетной значительно увеличивают.

При указанном распределении мощности по зонам (и при загрузке обрабатываемых изделий в печь малыми порциями) температура в нагревательной камере устанавливается приблизительно одинаковой по всей её длине. Это, в свою очередь, позволяет (в первом приближении) расчет времени нагрева в многозонной методической печи вести так же, как и для случая, если бы температура в ней была постоянной.

График нагрева теплотехнически массивных изделий, где показано распределение мощности по зонам и изменение температуры по длине нагревательной камеры приведен на рис. 1.13 [13].

Размеры рабочего пространства методических печей рассчитывают, задаваясь предварительно их шириной, с последующим уточнением.

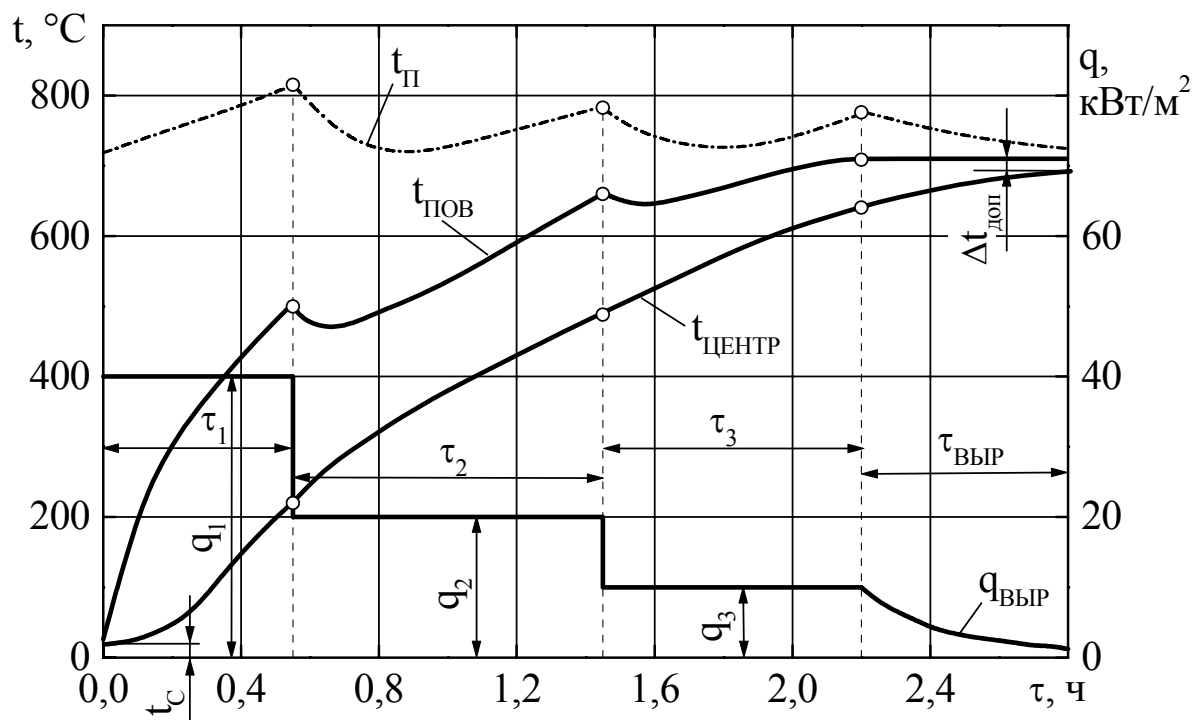


Рис. 1.13. График нагрева теплотехнически массивного изделия в электрической многозонной методической печи

Высоту рабочего пространства принимают конструктивно, исходя из требований быстрого и равномерного нагрева изделий. Так, для определения высоты в конвейерных и толкательных печах при известной ширине можно пользоваться практическими данными, приведенными в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Высота  $h$  рабочего пространства конвейерных и толкательных закалочных печей в зависимости от их ширины  $b$

ширина рабочего пространства печи $b$ , м	0,5...0,6	0,8...1,2	до 1,6
высота рабочего пространства печи $h$ , м	0,4...0,5	0,5...0,55	0,6

Длина рабочего пространства печи  $L$ , м, определяется по формуле [11]:

$$L = \Pi\tau/A, \quad (1.51)$$

где  $\Pi$  — производительность печи, кг / ч,  $\tau$  — время нагрева изделий, ч (расчет времени нагрева изделий см. ниже);  $A$  — масса загрузки, приходящаяся на 1 м длины рабочего пространства печи (погонная загрузка), кг/м.

В процессе проектирования печи значением  $A$  задаются из условий размещения изделий на конвейере, поддоне и т.д. Необходимо отметить, что с целью получения оптимального значения погонной загрузки проектируемой печи обычно выполняют несколько вариантов расчета.

При ориентировочном определении длины рабочего пространства печи используют формулу

$$L = \Pi/pb, \quad (1.52)$$

где  $b$  — ширина рабочего пространства печи, м;  $p$  — удельная производительность печи, кг/(м<sup>2</sup>·ч). Для методических печей  $p=150...250$  кг/(м<sup>2</sup>·ч).

Формула (1.52) служит также для определения действительного значения удельной производительности спроектированной печи, то есть оценки использования её рабочего пространства.

При известной общей длине печи её разбивают на тепловые зоны. Длину отдельной зоны можно определить по формуле:

$$L_{\text{зоны}} = (2...3) \sqrt{hb}, \quad (1.53)$$

где  $h$  и  $b$  — соответственно высота и ширина рабочего пространства печи, м.

Длины отдельных зон могут быть и одинаковыми и различными, в основном они выбираются исходя из конструктивных соображений. Желательно лишь, чтобы они были не очень велики (1...3 м для горизонтальной печи, а для вертикальной на 30...40 % меньше) [11].

После предварительного расчета высоты  $h$  и длины  $L$  рабочего пространства необходимо проверить правильность выбранной ширины  $b$ , руководствуясь практическими данными, приведенными в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Практические значения  $L/b$   
для методических электропечей различного типа

Тип печи	с пульсирующим подом	толкательная закалочная	конвейерная закалочная	толкательная цементационная	толкательная двухрядная
$L/b$	3...6	4...8	4...10	10...16	5...10

Когда задана кривая нагрева изделий во времени, определение суммарного времени пребывания изделий в печи и длины печи  $L_{\Pi}$  не составляет затруднений, так как последняя связана с временем нагрева  $\tau$  соотношением:

$$L_{\Pi} = \Pi \tau / A, \quad (1.54)$$

где  $\Pi$  — заданная производительность печи;  $A$  — погонная загрузка.

Если длина печи определена, то её можно разбить на зоны. По кривой нагрева для начала и конца каждой зоны определяют температуры изделий, а по ним — удельные тепловые потоки зон:

$$\text{для пластины } \tau_{\text{зоны}} = \frac{c\gamma S}{q_{\Pi}} \cdot (t_{\text{ПМК}} - t_{\text{ПМН}}), \quad (1.55)$$

$$\text{для цилиндра } \tau_{\text{зоны}} = \frac{c\gamma R}{2q_{\Pi}} \cdot (t_{\text{ПМК}} - t_{\text{ПМН}}), \quad (1.56)$$

где  $q_{\Pi}$  — постоянный тепловой поток зоны,  $t_{\text{ПМК}}$  и  $t_{\text{ПМН}}$  — соответственно температуры поверхности изделий в конце и начале тепловой зоны.

Эти выражения действительны для всех зон, кроме первой, для которой должно быть учтено время начального периода нагрева  $\tau_1$ .

Полученные значения  $q_{\Pi}$  должны быть проверены с точки зрения допустимых температур печей:

$$q_{\Pi} = C_{\Pi P} \cdot \left[ \left( \frac{T_{\Pi}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\Pi}^{\Pi}}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2, \quad (1.57)$$

где  $T_{\Pi}$  — максимально допустимая с точки зрения стойкости нагревателей температура печи;  $T_{\Pi}^{\Pi}$  — температура поверхности изделий в конце данной зоны.

Максимально допустимое значение теплового потока может быть определено по табл. 1.6 [7].

При предварительных расчетах температура печи может приниматься на 50 °С ниже значений, рекомендуемых для температур нагревателей.

Таблица 1.6

Максимальный тепловой поток  $q_{\Pi \max}$  при нагреве  
ряда материалов, Вт/м<sup>2</sup>

Рабочая температура, °С	Сталь в окислительной среде	Сталь в защитной атмосфере	Медь	Латунь	Алюминий
800	25600	15400	23300	19600	10500
900	36000	22000	32000	28000	15000
1000	55800	30500	44200	38700	20700
1100	67500	41300	59900	52300	28100
1200	89600	54800	79700	69800	—

Когда кривая нагрева не задана, строим её предполагая, что температура по всей длине печи поддерживается постоянной. Для этого, используя формулы (1.55) и (1.56), предварительно задаются общей длиной печи, количеством и длиной тепловых зон. Определяется удельный тепловой поток в последней зоне (конечная температура нагреваемых изделий в которой задана) по формуле:

$$q_{\Pi \text{ зоны}} = C_{\Pi P} \cdot \left[ \left( \frac{T_{\Pi}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\Pi \text{ К}}}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2, \quad (1.58)$$



Чтобы обеспечить необходимую длительность работы установленных электронагревателей, значения теплового потока при расчете не должны превышать значений  $q_{\Pi \max}$  (табл. 1. 6) .

Из выражений:

$$\tau_{\text{зоны}} = c\gamma S/q_{\Pi} \cdot (t_{\Pi \text{МК}} - t_{\Pi \text{МН}}),$$

$$\tau_{\text{зоны}} = c\gamma R/2q_{\Pi} \cdot (t_{\Pi \text{МК}} - t_{\Pi \text{МН}})$$

можно определить температуру поверхности изделий в начале последней зоны или, что то же самое, в конце предыдущей зоны, что позволит найти удельный тепловой поток этой зоны. Действуя таким образом, получаем температуры изделий в каждой зоне и дойдя до начальной температуры их нагрева, строим кривую нагрева изделий. Если число зон получится дробным (в случае несовпадения рассчитанной температуры металла в начале первой зоны), то надо скорректировать их длины в ту или иную сторону, а затем повторить расчет, начиная с последней зоны, и получить температуры изделий в начале и конце каждой зоны и удельные тепловые потоки. По значениям полученных температур строится кривая нагрева, определяется длина отдельных тепловых зон, длина всей печи и общее время нагрева изделий.

Затем уточняют погонную загрузку, находят действительное значение удельной производительности печи и сравнивают её с рекомендуемой.

Следует отметить, что иногда тепловые зоны методических электропечей устанавливаются равными по мощности, но различными по

длине — первую зону наиболее короткой, а последнюю — самой длинной. Достоинством таких печей является возможность использования в каждой из тепловых зон однотипных электронагревателей, кабелей и электроаппаратуры.

В тех случаях, когда задана максимально допустимая скорость нагрева изделий  $V_{\max}$  (°C/ч), максимальный удельный тепловой поток не должен превосходить:

для пластины  $q_{\Pi} = V_{\max} C\gamma S,$

для цилиндра  $q_{\Pi} = 0,5 \cdot V_{\max} C\gamma R .$

Обычно  $V_{\max}$  задается для первой зоны.

Если задан максимально допустимый перепад температур в изделии  $\Delta t$ , то максимальный удельный тепловой поток не должен быть больше, чем

$$q_{\Pi} = \frac{2\lambda \Delta t}{S} \text{ для пластины и}$$

$$q_{\Pi} = \frac{2\lambda \Delta t}{R} \text{ для цилиндра.}$$

Обычно  $\Delta t_{\max}$  задается для последней зоны.

## 1.4. Особенности нагрева изделий в конвекционных печах

### 1.4.1. Нагрев длинномерных изделий в электрических конвекционных печах периодического действия

Большое количество различных длинномерных полуфабрикатов (профили, трубы, листы и т.д.) изготавливается из алюминиевых сплавов. Для термической обработки этих изделий широкое применение находят электрические конвекционные печи.

В конвекционной печи (рис. 1.14) при помощи вентилятора 1 создается циркуляция воздуха. Нагретый до заданной температуры в камере с нагревательными элементами 2 воздух поступает в рабочую камеру 5 печи, где помещаются длинномерные изделия 4. Перемещаясь вдоль изделий, воздушный поток 3 нагревает их, а сам при этом охлаждается. Максимальное охлаждение воздуха происходит в начальный момент, после загрузки холодных изделий в печь. По мере нагрева изделий повышается и температура воздушного потока. Следовательно, температура воздуха меняется в процессе нагрева садки длинномерных изделий как по длине рабочей камеры, так и во времени. В результате этого процесс нагрева изделий по длине будет неравномерным. Скорость нагрева ближнего по направлению воздушного потока конца садки будет больше, чем дальнего.

При расчете времени нагрева длинномерных изделий в конвекционных печах необходимо определять время нагрева дальнего конца садки, так как лишь за это время садка полностью нагреется до заданной температуры. Продолжительность нагрева дальнего конца садки определяется с помощью номограммы (рис. 1.15), построенной на основании аналитического решения задачи о нагреве длинномерных изделий в конвекционных печах [6].

При выполнении расчетов с помощью этой номограммы необходимо, прежде всего, вычислить значения  $K_X$  и  $K_T$ :

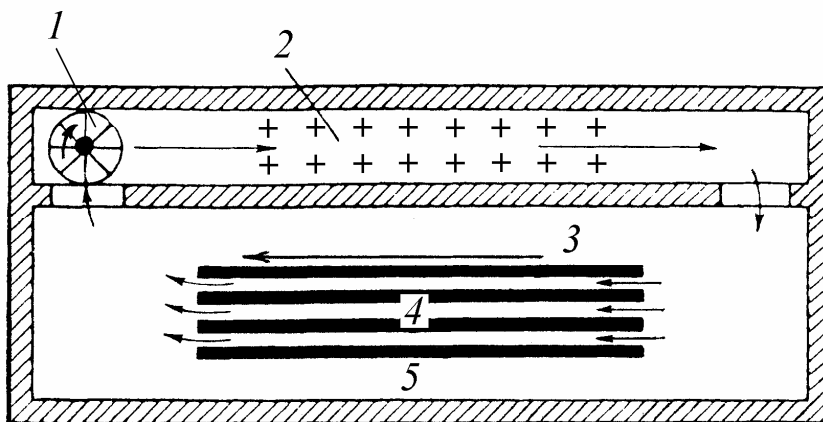


Рис. 1.14. Схема электрической конвекционной печи

$$K_X = \frac{\alpha F_C}{C_P \gamma_B V}, \quad (1.59)$$

$$K_T = \frac{t_{1B} - t_{MH}}{t_{1B} - t_{MK}},$$

где  $C_P$  — теплоемкость воздуха при температуре печи, Дж/(кг·К);  $\gamma_B$  — плотность воздуха при температуре печи кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — объем воздуха, проходящего через сечение рабочей камеры печи в единицу времени, или производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/с;  $F_C$  — поверхность садки длинномерных изделий, м<sup>2</sup>;  $t_{1B}$  — температура воздушного потока на входе в рабочую камеру, °С.

По номограмме необходимо найти соответствующее значение величины  $K_T$ , с помощью которой определяется время нагрева дальнего конца садки

$$\tau_{ДК} = \frac{cG}{\alpha F} K_T, \text{ с.} \quad (1.60)$$

Продолжительность нагрева ближнего конца садки определяется по формуле

$$\tau_{БК} = \frac{cG}{\alpha F} \cdot \ln \frac{t_{1B} - t_{MH}}{t_{1B} - t_{MK}}, \text{ с,} \quad (1.61)$$

где  $\tau_{БК}$  — время нагрева ближнего конца садки, с.

Разница во времени нагрева дальнего и ближнего концов садки, то есть неравномерность процесса нагрева садки, зависит в основном от величины  $K_X$ . Если величина  $K_X \leq 0,1$ , то время нагрева дальнего конца садки не превышает более чем на 10 % время нагрева ближнего конца. При практических расчетах такой неравномерностью процесса нагрева садки, как правило, можно пренебречь. Следовательно, если  $K_X \leq 0,1$ , то с достаточной для практики степенью точности можно считать, что процесс нагрева садки происходит при постоянной температуре воздушного потока в рабочей камере печи. В этом случае время нагрева садки определяется формулой (1.61).

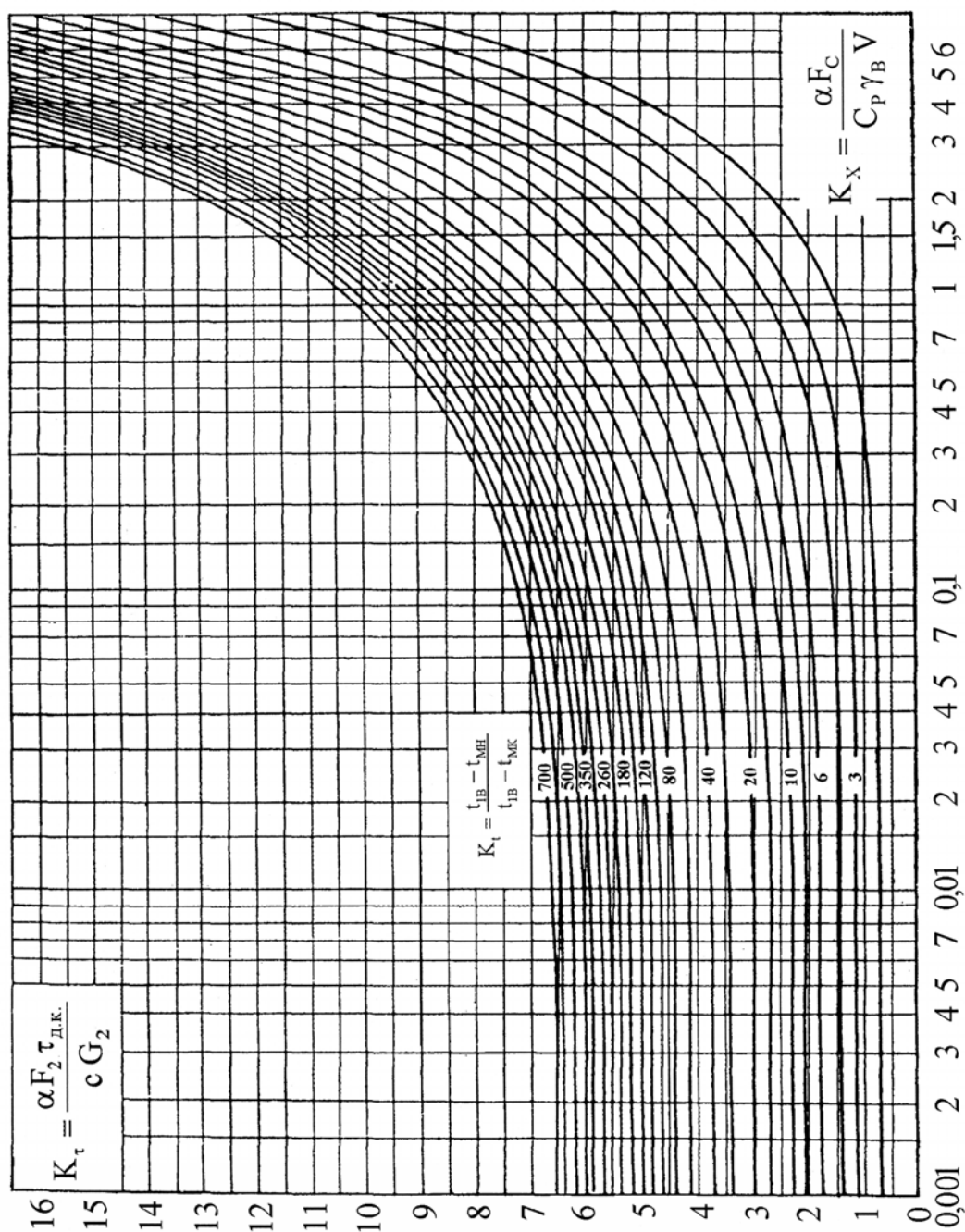


Рис. 1.15. Номограмма для определения продолжительности нагрева длинномерных изделий в конвекционных печах

На равномерность нагрева садки длинномерных изделий в конвекционной печи большое влияние оказывает количество изделий в садке. С увеличением количества изделий растет неравномерность процесса их нагрева, так как увеличивается поверхность садки и значение  $K_X$ .

Неравномерность процесса нагрева садки листов в конвекционной печи зависит от расстояния между листами в садке. Садка листов делит рабочую камеру печи на ряд каналов с практически самостоятельными воздушными потоками (рис. 1.16). Вследствие этого при расчете времени нагрева листов целесообразно рассматривать нагрев одного листа, заменив соответственно часовой объем воздуха, проходящего через рабочую камеру печи, часовым объемом воздуха, проходящего между двумя соседними листами, то есть

$$V = w_t \cdot b h, \quad (1.62)$$

где  $w_t$  — скорость воздушного потока, м/с;  $b$  — ширина листа, м;  $h$  — расстояние между листами в садке, м.

В этом случае значение  $K_X$  определяется так:

$$K_X = \frac{2\alpha L}{C_p \gamma_B w_t h}, \quad (1.63)$$

где  $L$  — длина листа в направлении воздушного потока, м; Так как с увеличением  $h$  величина  $K_X$  уменьшается, снижается также неравномерность процесса нагрева листов.

На рис 1.16. приведены результаты расчета с помощью номограммы (рис. 1.15) зависимости между временем нагрева и расстоянием между листами из дюралюминия: размер листа 4×1 м, толщина 2 мм, температура нагрева листов 495 °С, температура воздушного потока 500 °С, скорость 10 м/с [6].

Расстояние между листами в садке при заданной неравномерности процесса нагрева можно определить следующим образом. По формуле (1.61) определяется время нагрева ближнего конца садки. К его величине добавляется допустимая разница во времени нагрева дальнего и ближнего концов садки и определяется время нагрева дальнего конца. Это позволяет рассчитать величину  $K_t$ , затем рассчитывается  $K_t$ . По полученным значениям  $K_t$  и  $K_t$  и номограмме на рис. 1.15 определяют  $K_X$ , на основании которого вычисляют расстояние между листами.

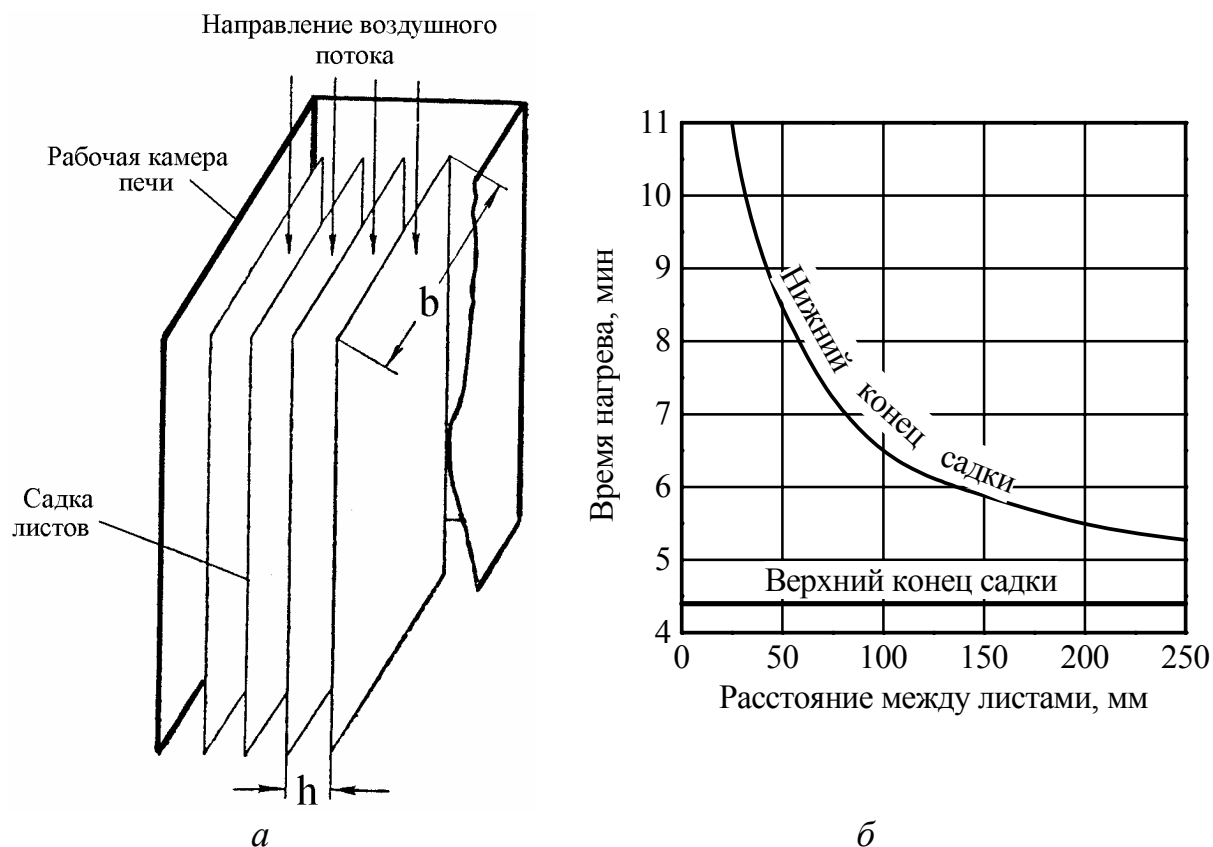


Рис. 1.16. Расположение садки листов в камере конвекционной печи (а) и влияние расстояния между листами на продолжительность нагрева (б)

$$h = \frac{2\alpha L}{K_X c_P \gamma_B w_t}. \quad (1.64)$$

Приведенная методика расчета продолжительности нагрева справедлива лишь при условии, если температура воздушного потока на входе в рабочую камеру печи в процессе нагрева изделий остается постоянной. Однако при недостаточной величине установленной мощности печи, а именно, если

$$N_{\Pi} < \frac{\alpha F (t_{1B} - t_{MH})}{10^3 K_X} \cdot (1 - e^{-K_X}), \text{ кВт}, \quad (1.65)$$

температура воздушного потока на входе в рабочую камеру печи в первый период нагрева изделий уменьшается по сравнению с заданной ( $t_{1B}$ ). Это приводит к увеличению продолжительности нагрева длиномерных изделий. В данном случае время нагрева дальнего конца садки равно

$$\tau_{\text{ДК}} = \frac{Gc(K_{\tau} + \Delta K_{\tau})}{\alpha F}, \text{ с}, \quad (1.66)$$

где величина  $K_{\tau}$  определяется по номограмме (рис. 1.15), а  $\Delta K_{\tau}$  — по номограмме на рис. 1.17 [6]. Продолжительность нагрева ближнего конца садки определяется по следующей формуле:

$$\tau_{\text{БК}} = \frac{Gc(t_{1\text{В}} - t_{\text{МН}})}{10^3 N_{\text{П}}} + \frac{Gc}{\alpha F} \cdot \left( \ln \frac{10^3 N_{\text{П}}}{\alpha F(t_{1\text{В}} - t_{\text{МН}})} - 1 \right), \text{ с}. \quad (1.67)$$

Нагрев длинномерных изделий в конвекционных печах можно рассчитать также методом конечных разностей.

#### **1.4.2. Нагрев изделий в методических печах с конвективным теплообменом**

В методических топливных печах и в электрических печах с искусственной циркуляцией воздуха нагрев изделий происходит как за счет теплообмена излучением, так и конвективного теплообмена. Особенно велика роль конвективного теплообмена в низкотемпературных конвекционных печах.

Процесс нагрева изделий в методических конвекционных печах зависит от схемы движения газов (воздуха) и нагреваемых изделий в рабочей камере печи. Существует три основные схемы движения газов и изделий: схема прямотока (движение газов и изделий в одном направлении); схема противотока (встречное движение газов и изделий) и схема перекрестного тока (движение газов и изделий во взаимно перпендикулярных направлениях).

В печах, работающих по схемам прямотока и противотока, изменение температуры газов по длине рабочей камеры определяется теплообменом между газами и изделиями (рис. 1.18) [6].

При определении продолжительности нагрева изделий в этих печах обычно задаются температура газов (воздуха) на входе в рабочую камеру печи  $t_{1\text{В}}$ , начальная  $t_{\text{МН}}$  и конечная  $t_{\text{МК}}$  температуры изделий. Температура газов на выходе из рабочей камеры печи определяется из уравнения теплового баланса:

$$t_{1\text{ВЫХ}} = t_{1\text{В}} - \frac{c\Pi(t_{\text{МК}} - t_{\text{МН}})}{c_{\text{Р}}\gamma_{\text{Г}}V_{\text{Г}}}, \quad (1.68)$$

где  $c_{\text{Р}}$  — удельная теплоемкость газов в печи, Дж/(кг·К);  $\gamma_{\text{Г}}$  — плотность газов в печи, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{\text{Г}}$  — объем газов, проходящий в единицу времени через

поперечное сечение рабочей камеры печи, м<sup>3</sup>/ч; П — производительность печи, кг/ч;  $c$  — удельная теплоемкость изделий, Дж/(кг·К).

Установившийся квазистационарный режим теплообмена в рассматриваемых печах позволяет определить среднюю разность температур газов и изделий:

$$\text{для схемы прямотока } \Delta t_{\text{CP}} = \frac{(t_{1\text{B}} - t_{\text{MH}}) - (t_{1\text{ВЫХ}} - t_{\text{МК}})}{\ln[(t_{1\text{B}} - t_{\text{MH}})/(t_{1\text{B}} - t_{\text{МК}})]},$$

$$\text{для схемы противотока } \Delta t_{\text{CP}} = \frac{(t_{1\text{ВЫХ}} - t_{\text{MH}}) - (t_{1\text{B}} - t_{\text{МК}})}{\ln[(t_{1\text{ВЫХ}} - t_{\text{MH}})/(t_{1\text{B}} - t_{\text{МК}})]}.$$

В результате этого время нагрева изделий определяется следующим образом:

$$\tau_{\text{H}} = \frac{Gc(t_{\text{МК}} - t_{\text{MH}})}{\alpha F \Delta t_{\text{CP}}}, \text{ с}, \quad (1.69)$$

где  $G$  — масса изделия, кг;  $F$  — активная поверхность изделия, м<sup>2</sup>.

Анализ нагрева изделий в методических конвекционных печах показывает, что схема прямотока с теплотехнической точки зрения менее эффективна, чем схема противотока. В печах, работающих по схеме прямотока, необходима повышенная температура газов на входе в рабочую камеру печи:

$$t_{1\text{B}} > t_{\text{МК}} + (t_{\text{МК}} - t_{\text{MH}}) \cdot \frac{c\Pi}{c_{\text{P}}\gamma_{\Gamma}V_{\Gamma}}. \quad (1.70)$$

Это создает опасность перегрева и пережога изделий в случае изменения ритма работы печи, например при задержке подачи изделий в печь или остановке конвейера печи и т.д. Схема противотока обеспечивает также повышенную скорость нагрева изделий при данном режиме работы печи.

Методические конвекционные печи с перекрестным током разбиваются по длине печи на ряд самостоятельных тепловых зон (рис. 1.19) [6].

Длина зоны определяется шириной газового (воздушного) потока, создаваемого одним или двумя вентиляторами. Большая интенсивность, высокая турбулентность потока обеспечивает практически постоянную температуру в зоне. Устанавливая температуру отдельно в каждой зоне, можно получить требуемое распределение температуры по длине печи.

Расчет нагрева изделий в печах с перекрестным током необходимо выполнять по отдельным зонам или по группе зон, имеющих одинаковую температуру. Так как температура газового потока постоянная, то для расчета нагрева изделий в отдельной зоне можно применить формулу (1.29). При



этом конечная температура нагрева изделий в данной зоне принимается за начальную в следующей зоне.

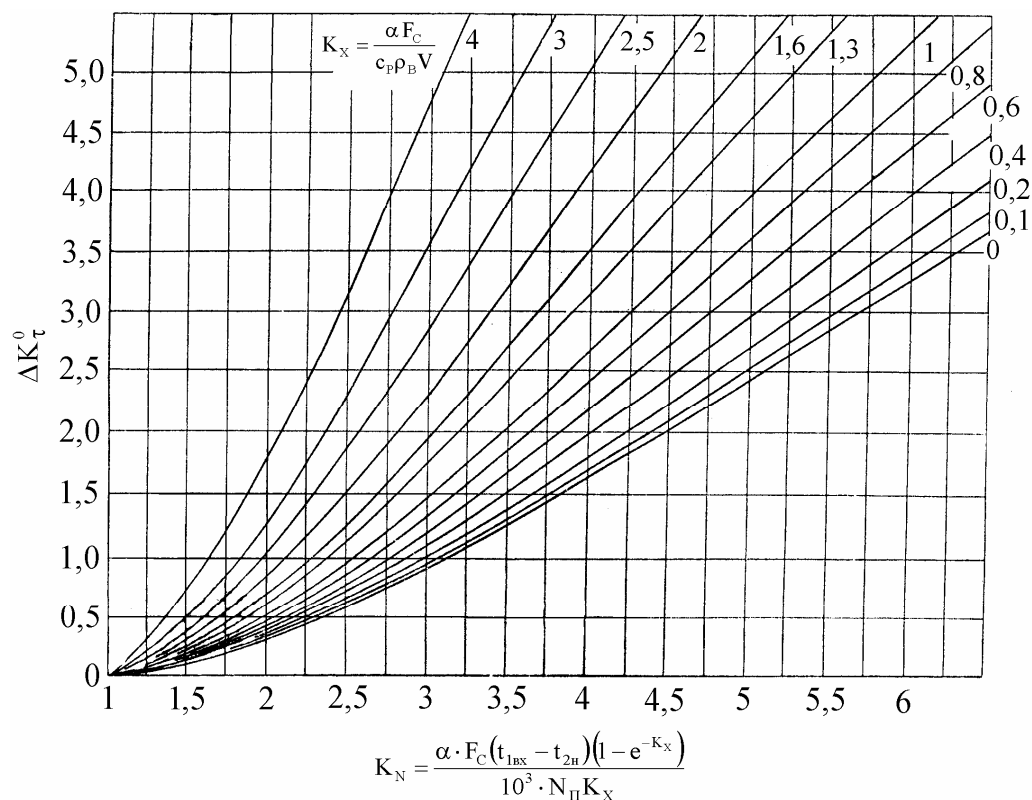


Рис. 1.17. Номограмма для определения увеличения времени нагрева длинномерных изделий из-за уменьшения установленной мощности конвекционной печи

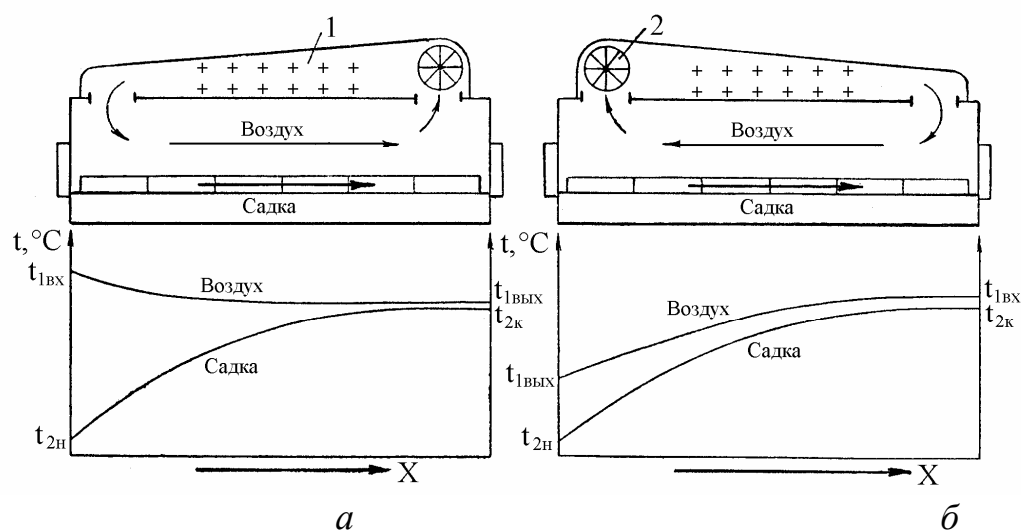


Рис. 1.18. Схемы прямоточной (а) и противоточной (б) методических конвекционных печей и распределение температуры по их длине. 1 — нагревательные элементы; 2 — вентилятор

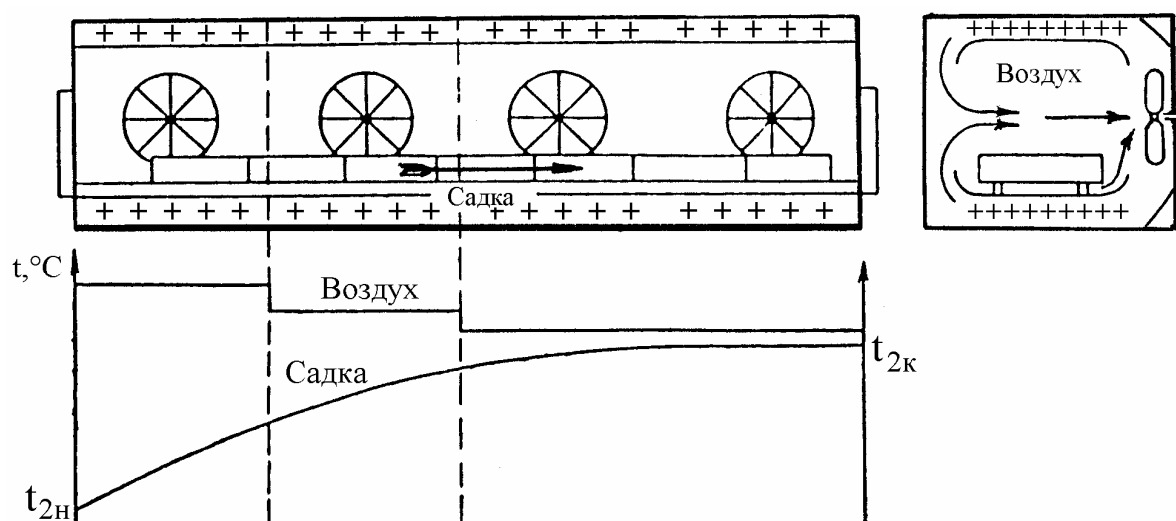


Рис. 1.19. Схема методической конвекционной печи с перекрестным током и возможное распределение температуры по её длине

## 1.5 . Расчет нагрева изделий в печах с жидким теплоносителем

### 1.5.1. Особенности теплообмена в печах-ваннах

Для термической обработки стали и цветных сплавов широко применяются печи с жидкой средой, то есть печи-ванны, в которых в качестве нагревающей среды используются расплавленные соли, щелочи и металлы, а также масла.

В отличие от печей с газовой средой, при нагреве изделий в печах-ваннах теплообмен лучеиспусканием отсутствует, так как жидкие среды практически непрозрачны для лучистой энергии. Передача тепла от жидкости к поверхности погруженного в неё изделия происходит путем теплообмена теплопроводностью и конвекцией. Вследствие этого интенсивность нагрева изделий в печах-ваннах в наибольшей степени зависит от физических свойств жидких сред и от степени их перемешивания.

Физические свойства расплавов некоторых солей, щелочей и других жидких сред, применяемых в печах-ваннах, приведены в табл. 1.7. Значения физических констант даются в зависимости от температуры среды.

Скорость нагрева изделий в печах-ваннах в 4...7 раз больше, чем в топливных и электрических печах. Это связано с высокими значениями коэффициента теплоотдачи при нагреве в расплавленных солях, щелочах или металлах. Расчетных методов определения коэффициентов теплоотдачи в печах-ваннах нет, поэтому они определяются экспериментально.

Таблица 1.7

## Физические свойства некоторых жидких сред [6]

Наименование материала	Температура плавления, °С	Плотность $\gamma$ при температуре t		Удельная теплоёмкость $c_p$ при температуре t	
		t, °С	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	t, °С	$c_p$ , Дж/(кг·К)
NaNO <sub>3</sub>	271	300	1820	300	2220
		400	1740	400	2010
		500	1630	550	1720
KNO <sub>3</sub>	335	400	1820	400	1420
		500	1750	500	1300
		600	1680	600	1210
NaNO <sub>3</sub>	317	400	1850	400	1800
		500	1780	500	1720
		600	1710	550	1590
Смесь 45% NaNO <sub>3</sub> + 55% KNO <sub>3</sub>	218	300	1940	300	1590
		400	1840	400	1550
		500	1750	500	1470
Смесь 45% NaNO <sub>2</sub> + 55% NaNO <sub>3</sub>	220	300	1880	300	1970
		400	1800	400	1840
		500	1730	500	1760
Смесь 45% NaNO <sub>2</sub> + 55% KNO <sub>3</sub>	137	200	1950	200	2010
		300	1870	300	1760
		400	1790	400	1550
		500	1720	500	1470
NaCl	810	900	1490	900	1510
		1000	1420	950	1470
KCl	768	800	1510	800	1170
		900	1450	900	1050
BaCl <sub>2</sub>	960	1100	3060	—	—
		1200	3000	—	—
		1300	2940	1010	570
Смесь 50% BaCl <sub>2</sub> + 50% CaCl <sub>2</sub>	600	—	—	650	790
		800	2650	750	750
		900	2600	960	710
Смесь 28% NaCl + 72% CaCl <sub>2</sub>	500	700	1960	550	1170
		850	1880	850	1130
NaOH	322	400	1750	455	1930
		500	1700	505	1840
Pb	327	400	10510	400	1550
		600	10270	500	1550

Согласно работам Д.Я.Вишнякова, коэффициенты теплоотдачи для расплавленных солей и щелочей находятся в прямолинейной зависимости от их

температуры. При температурах плавления солей, их смесей и щелочей коэффициенты теплоотдачи имеют практически постоянную величину, равную 230...265 Вт/(м<sup>2</sup>·К). С повышением температуры коэффициенты теплоотдачи растут. На рис. 1.20 показано изменение коэффициентов теплоотдачи в расплавах различных солей и щелочей в зависимости от перегрева их выше температуры плавления [6]. При этом по оси абсцисс отмечены температуры перегрева расплава, а за начало отсчета принята температура плавления солей.

При погружении холодных изделий в ванну в первый момент на их поверхности может образоваться «настыль» в виде корки закристаллизовавшейся соли. Толщина корки зависит от температуры расплава, и чем она выше, тем тоньше корка.

Толщина корки зависит также от теплоёмкости расплава, поэтому наиболее массивная корка получается в хлористых солях, имеющих более низкую теплоемкость. Возможность образования корки затвердевшего расплава на поверхности изделий необходимо принимать во внимание при расчетах нагрева изделий в печах-ваннах.

Во время расплавления корки температура поверхности изделий будет ниже температуры плавления соли. В связи с этим создаются условия замедленного нагрева изделий, соответствующие предварительному подогреву их перед загрузкой в ванну с высокой температурой. Таким образом, наличие корки затвердевшей соли на поверхности изделий в первый период нагрева в ванне предохраняет их от образования трещин в связи с быстрым нагревом в расплаве.

При погружении в ванну холодных изделий возможно также значительное падение температуры всего расплава в случае недостаточного его объема. Это приводит к образованию большой «настыли» на поверхности изделий и сильно увеличивает продолжительность их нагрева, так как одновременно с нагревом изделий требуется повышение температуры расплава до заданной величины. Если же масса изделий по отношению к объему расплава взята несоразмерно малой, печь-ванна окажется недогруженной. В обоих случаях производительность печи-ванны снижается. Следовательно, необходимо определить оптимальную массу изделий, загружаемых в ванну.

Масса садки изделий, соответствующая заданному снижению температуры расплава в момент загрузки изделий в ванну, определяется исходя из уравнения теплового баланса ванны:

$$G = \frac{c_p \gamma_p V_p \Delta t}{kc(t - t_{MH})}, \text{ кг}, \quad (1.71)$$

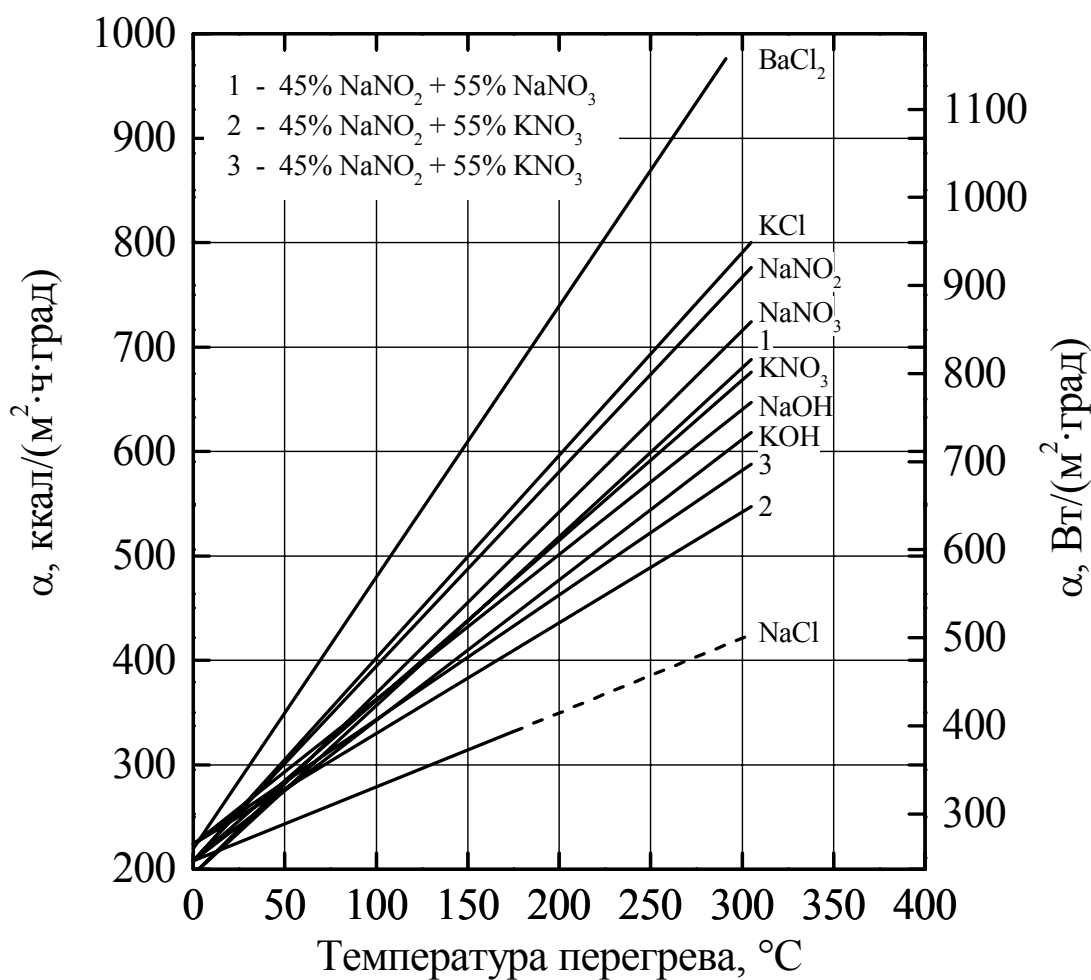


Рис. 1.20. Коэффициенты теплоотдачи при нагреве в расплавленных солях и щелочах

где  $c_p$  — удельная теплоемкость расплава, Дж/(кг·К);  $\gamma_p$  — плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>;  $V_p$  — объем расплава, м<sup>3</sup>;  $c$  — удельная теплоемкость изделий, Дж/(кг·К);  $t_{\text{МН}}$  — начальная температура изделий, °С;  $t$  — заданная температура ванны, °С;  $\Delta t$  — допустимое падение температуры расплава, град;  $k$  — доля тепла, получаемого изделиями в результате снижения температуры расплава, от общего количества тепла, необходимого для нагрева изделий (в среднем можно принять  $k \approx 0,6 \dots 0,9$ ).

В большинстве случаев допустимое падение температуры расплава в печах-ваннах при загрузке изделий ограничивается 10...30 град.

### 1.5.2. Расчеты времени нагрева и охлаждения изделий в печах с жидким теплоносителем

Расчет времени нагрева или охлаждения изделий в расплавленных солях, щелочах, металлах и маслах производится по графикам Д.В.Будрина. Для расчета коэффициент теплоотдачи принимается средним в интервале темпе-

ратур от 20 °С до  $t_k$ , так же как и коэффициент теплопроводности  $\lambda$ . Значение коэффициента теплоотдачи при нагреве в жидких средах приведено на рис. 1.21 [5].

Как указывалось ранее, одна из особенностей нагрева в жидких средах состоит в том, что при посадке в ванну загрузки, имеющей температуру ниже точки затвердевания или загустевания жидкой среды, в начальной стадии нагрева на поверхности загрузки появляется слой затвердевшей соли или загустевшего масла, причем толщина слоя увеличивается с течением некоторого промежутка времени до максимального значения, а после достижения поверхностью изделий температуры плавления жидкой среды уменьшается до нуля. С учетом этой особенности теплообмен в жидких средах принято рассматривать в виде двух последовательно протекающих стадий.

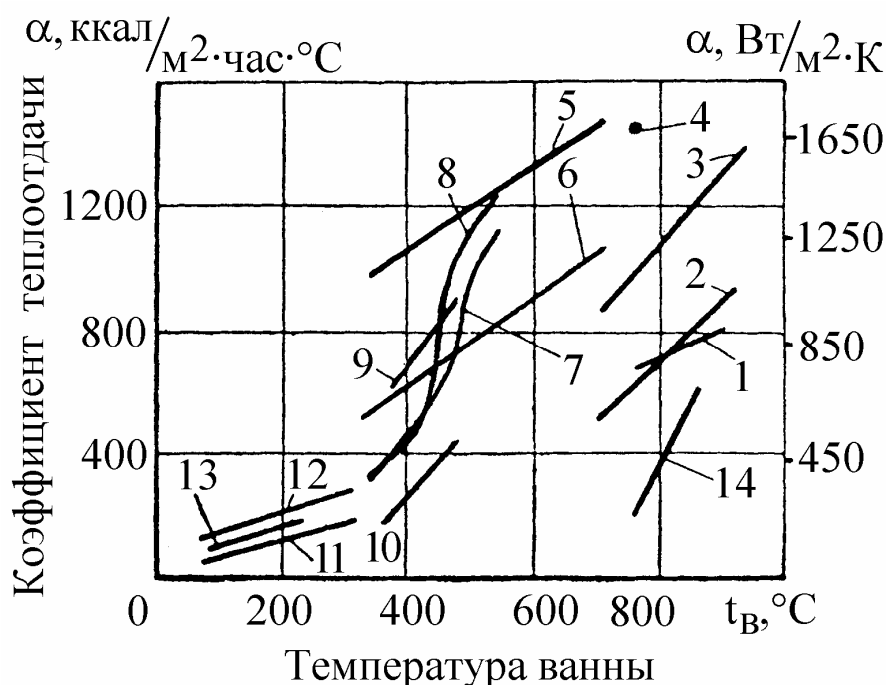


Рис. 1.21. Коэффициент теплоотдачи при нагреве в жидких средах.

1 — 35% NaCl + 65% KCl при циркуляции среды в электродной ванне; 2 — 44% NaCl + 56% KCl при  $w=0$  м/мин; 3 — то же при  $w=4,5$  м/мин; 4 — свинец; 5 — 97% NaOH + 3% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> при  $w=4,5$  м/мин; 6 — то же при  $w=0$  м/мин; 7 — 90% NaNO<sub>3</sub> + 3% NaNO<sub>2</sub> + 3% KNO<sub>3</sub> + 4% NaCl; 8 — 70% NaNO<sub>3</sub> + 10% NaNO<sub>2</sub> + 9% KNO<sub>3</sub> + 11% NaCl; 9 — 65% NaNO<sub>3</sub> + 12% NaCl + 11,5% KCl + 3,3% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + 1,4% Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> + 6,8% H<sub>2</sub>O при механическом перемешивании среды; 10 — то же без механического перемешивания среды; 11 — цилиндрическое масло 52 («Вапор») при  $w=0$  м/мин; 12 — то же при  $w=4,5$  м/мин; 13 — цилиндрическое масло 11 (2) при  $w=0$  м/мин; 14 — KCl при циркуляции среды в электродной ванне С-100

На первой стадии нагрева загрузка окружена слоем отвердевшей соли или загустевшего масла, причем чем больше толщина этого слоя, тем меньше коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$ . На этой стадии нагрева в расчет обычно вводится некоторое среднее значение коэффициента теплоотдачи. Вторая стадия нагрева, протекающая при непосредственном контакте поверхности изделий с жидкой средой, характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_2$ , не зависящим от температуры загрузки, но зависящим от температуры жидкой среды.

Ниже приводятся линейные зависимости коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_2$  от температуры печи ( $t_{\text{п}}$ ) при нагреве металлической загрузки в цилиндрическом масле и в некоторых расплавах солей и щелочей.

При нагреве в легком цилиндрическом масле марки 2 в диапазоне температур  $t_{\text{п}}$  от 60 до 190 °С коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  изменяется от 80 до 170 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При нагреве в тяжелом цилиндрическом масле марки 52 («Вапор») в диапазоне температур  $t_{\text{п}}$  от 100 до 330 °С коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  изменяется от 60 до 230 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При нагреве в расплаве хлористого калия (KCl) в диапазоне температур  $t_{\text{п}}$  от 770 до 870 °С коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  изменяется от 300 до 700 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При нагреве в расплаве 44% NaCl + 56% KCl в диапазоне температур  $t_{\text{п}}$  от 680 до 940 °С коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  изменяется от 550 до 1160 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Для первой стадии нагрева определение среднего коэффициента теплоотдачи  $\alpha_1$  представляет собой значительную сложность. При нагреве стальных изделий может быть использована приближенная зависимость

$$\alpha_1 = \alpha_2 \cdot 0,15 \left( B + \frac{F}{V} \right), \quad (1.72)$$

где  $B$  — коэффициент, учитывающий теплофизические свойства жидкой среды: для цилиндрического масла  $B=4,0$ , для расплавов хлористых солей  $B=1,4$  и для расплавов щелочей  $B=1,9$ ;  $F/V$  — отношение поверхности загрузки к её объему, см<sup>-1</sup>.

Затем определяются число Био и относительная температура. По этим данным, пользуясь графиками Д.В.Будрина, находят число Фурье и определяют время нагрева изделий.

### 1.5.3. Методы расчета времени нагрева стальных изделий и инструмента в печах-ваннах

Продолжительность пребывания нагреваемых изделий в соляной ванне при температуре закалки может быть определена по формуле:

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{\text{СП}} + \tau_{\text{ВЫД}}, \quad (1.73)$$

где  $\tau_{\Sigma}$  — общее время нагрева в мин;  $\tau_{\text{СП}}$  — время сквозного прогрева изделия в мин;  $\tau_{\text{ВЫД}}$  — время необходимое для завершения фазовых превращений в стали после прогрева изделия, мин.

Продолжительность прогрева изделий при полном погружении изделия в ванну. При полном погружении в ванну продолжительность нагрева изделий простой формы линейно зависит от значения их характеристического размера и может быть найдена из выражения

$$\tau_{\text{СП}} = \frac{kV}{F}, \quad (1.74)$$

где  $k$  — коэффициент в мин/см;  $V/F$  — характеристический размер образца, равный отношению его объема ко всей тепловоспринимающей поверхности, см.

Значения величины  $V/F$  для тел простой формы могут быть найдены из простых геометрических соотношений (табл. 1.8).

Таблица 1.8

Отношение объема тел простой формы к их поверхности [12]

Тело	Принято за минимальный размер D или C, см	Другие размеры, см	Формула для определения V/F, см
Шар	Диаметр	—	$D/6$
Куб	Ребро	—	$D/6$
Сплошной цилиндр	Диаметр	Высота H	$\frac{HD}{2D + 4H}$
Прямая призма с правильным многогранником в основании	Диаметр вписанного круга	Высота H	$\frac{HD}{2D + 4H}$
Полый цилиндр (кольцо)	Наружный диаметр	Внутренний диаметр d	$\frac{H(D - d)}{2(D - d) + 4H}$
Пластина	Толщина пластины C	Габаритные размеры C, B, A	$\frac{ABC}{2(AB + BC + AC)}$



Значение коэффициента  $k$  зависит от химического состава и физических свойств нагреваемой стали, состава и свойств солей в ванне и от выбранной температуры нагрева. Экспериментально найденные значения коэффициента  $k$  для разных случаев нагрева под закалку инструментальных сталей приведены в табл. 1.9 [12].

Перемножив найденные по одной из формул значения  $V/F$  и взятые из таблицы 1.9 значения коэффициента  $k$ , по формуле (1.74) находим время сквозного прогрева ( $\tau_{\text{сп}}$ ) образца простой формы.

При расчете времени нагрева инструментов в расчет для гладких тел вводится поправка на изрезанность канавками фасонной рабочей части этих инструментов.

Таблица 1.9

Значение коэффициента  $k$  при нагреве инструментальных сталей

Сталь	Температура нагрева, °C	k, мин/см, при нагреве в расплавах		Удельное время прогрева $m \cdot k$ в средах			
		78% BaCl <sub>2</sub> + 22% NaCl*	100% BaCl <sub>2</sub> **	44% NaCl + 56% KCl*	100% NaCl	Свинец	Воздух
Углеродистая и низколегированная	800	12,5	—	0,9k	1,2k	0,5k	3k...5k
	850	11,3	—				
	870	10,8	—				
	900	10,0	—				
	950	8,8	—				
Среднелегированная (высокохромистая и др.)	1000	—	8,0	—	—	—	—
	1050		7,4				
	1100		6,7				
	1150		6,0				
Высоколегированная (быстро-режущая и др.)	1180	—	5,7	—	—	—	—
	1200		5,4				
	1210		5,3				
	1220		5,1				
	1230		5,0				
	1240		4,9				
	1250		4,8				
	1275		4,4				
	1300		4,1				
	560		10,3***				

\* Предварительный подогрев до 400...500 °C. \*\* Предварительный подогрев до 860...880 °C. \*\*\* Нагрев при отпуске в расплаве KNO<sub>3</sub>

Количественное влияние этого фактора может быть выражено коэффициентом формы инструмента  $Z_{\Phi}$ , равным отношению времени прогрева инструмента  $\tau_{СП}^{ИН}$  к времени прогрева образца  $\tau_{СП}^{ОБ}$  простой и подобной ему формы, имеющего те же габаритные размеры, что и данный инструмент:

$$Z_{\Phi} = \frac{\tau_{СП}^{ИН}}{\tau_{СП}^{ОБ}} . \quad (1.75)$$

Значения коэффициентов формы различных инструментов, нагреваемых целиком, приведены в табл. 1.10 [12].

Чтобы перейти от времени прогрева образцов простой формы к времени прогрева фасонных инструментов, необходимо значение  $\tau_{СП}^{ОБ}$  умножить на коэффициент формы данного инструмента  $Z_{\Phi}$ :

$$\tau_{СП}^{ИН} = Z_{\Phi} \cdot \tau_{СП}^{ОБ} = Z_{\Phi} \cdot kV/F . \quad (1.76)$$

Таблица 1.10

Значения коэффициента формы  $Z_{\Phi}$  для различных инструментов

Инструменты	Нагреваемая часть инструмента	Коэффициент формы $Z_{\Phi}$
Фрезы цилиндрические отрезные, ножи, плашки плоские	Целиком	0,9
Фрезы пазовые, одноугловые, дисковые трехсторонние, полукруглые выпуклые и вогнутые, зенкеры насадные	«	0,85
Фрезы червячные, резьбовые, насадные, торцевые насадные	«	0,80
Фрезы модульные дисковые	«	0,75
Развертки ручные и машинные, протяжки, фрезы концевые, метчики трубные	Отрезанная рабочая	0,80
Метчики ручные и гаечные	То же	0,66
Сверла	То же	0,57
Плашки круглые	Целиком	0,45

Продолжительность прогрева при частичном погружении в ванну. При местном нагреве стержневого инструмента один из торцов не участвует в нагреве и, кроме того, некоторое количество тепла отводится через непогруженную в ванну хвостовую часть инструмента, что примерно в 1,27 раза увеличивает время нагрева по сравнению с нагревом при полном погружении в ванну. Эта величина  $\beta=1,27$  называется коэффициентом замедления нагрева и учитывается при определении времени нагрева стержневых инструментов.

Если отношение длины нагреваемой рабочей части к диаметру велико, то можно пренебречь членом  $2D$  в знаменателе формулы для цилиндров и приближенно принять время прогрева стержневого инструмента пропорциональным его диаметру. Это позволяет выразить продолжительность прогрева в секундах на миллиметр сечения.

Если удельную норму прогрева инструментов обозначить коэффициентом  $n$ , то в общем виде время их прогрева  $\tau_{СП}$  можно выразить следующей формулой:

$$\tau_{СП} = D \cdot \frac{n}{60}, \text{ мин}, \quad (1.77)$$

где  $n$  – коэффициент из табл. 1.11 [12].

Таблица 1.11

Значения коэффициента  $n$  или удельная продолжительность прогрева в с/мм различных стержневых фасонных инструментов

Инструмент	Марка стали			
	У12А	9ХС	Р9	Р18
Развертки ручные и машинные, протяжки, фрезы концевые, метчики	11,7	10,1	4,6	4,2
Метчики ручные и гаечные	9,7	—	3,8	3,5
Сверла	—	7,2	3,3	3,0

При нагреве изделий в приспособлениях, погружаемых в солевой расплав вместе с изделиями, расчетное время прогрева увеличивается на 20...30%.

При работе на автоматических агрегатах и поточных линиях, обеспечивающих подогрев инструмента из быстрорежущей стали в хлорбариевой ванне при 1050 °С, расчетное время окончательного сквозного прогрева уменьшается и должно приниматься равным 0,7...0,8 от  $\tau_{СП}$ , определяемого при подогреве до 860...880 °С.

Продолжительность выдержки после прогрева изделий. Значения величины  $\tau_{\text{выд}}$  в формуле (1.73), то есть выдержки после прогрева, необходимой для завершения фазовых превращений в стали приведены в табл. 1.12.

Таблица 1.12

Значения величины  $\tau_{\text{выд}}$  для сталей различных марок

Марка стали	Температура закалки, °C	Значение $\tau_{\text{выд}}$ , мин
У12А	800	1,00
ХВГ	830	1,62
9ХС	870	1,69
ХГСВФ	860	2,18
Р9	1230	0,65
Р18	1275	1,16
Р18К5Ф2	1280	1,16
Р14Ф4	1250	1,64

Общая продолжительность пребывания изделий в печах-ваннах. Подставив в формулу (1.73) значение величины  $\tau_{\text{сп}}$  из формул (1.74), (1.76) и (1.77), получим следующие выражения для определения общего времени пребывания изделий в ванне при нагреве под закалку.

Для изделий простой формы при полном погружении в ванну:

$$\text{сплошных цилиндров} \quad \tau_{\Sigma} = k \cdot \frac{Dl}{2D + 4l} + \tau_{\text{выд}}; \quad (1.78)$$

$$\text{полых цилиндров} \quad \tau_{\Sigma} = k \cdot \frac{(D - d)l}{2(D - d) + 4l} + \tau_{\text{выд}}; \quad (1.79)$$

$$\text{прямоугольной призмы} \quad \tau_{\Sigma} = k \cdot \frac{ВНl}{2(ВН + Вl + Нl)} + \tau_{\text{выд}}. \quad (1.80)$$

Для фасонных инструментов:

инструментов с отверстиями, нагреваемых полностью

$$\tau_{\Sigma} = Z_{\Phi} k \cdot \frac{(D - d)l}{2(D - d) + 4l} + \tau_{\text{выд}}; \quad (1.81)$$

пластин, ножей, плоских плашек и других инструментов прямоугольной формы, нагреваемых полностью

$$\tau_{\Sigma} = Z_{\Phi} k \cdot \frac{BHl}{2(BH + Bl + Hl)} + \tau_{\text{выд}}; \quad (1.82)$$

стержневого инструмента, при частичном погружении в ванну

$$\tau_{\Sigma} = D \frac{n}{60} + \tau_{\text{выд}}. \quad (1.83)$$

Эти формулы и являются расчетными; значения коэффициентов  $Z_{\Phi}$ ,  $k$ ,  $n$  и  $\tau_{\text{выд}}$  определяются из соответствующих таблиц, размеры изделия ( $D$ ,  $d$ ,  $l$ ,  $B$  и  $H$ ) при вычислении по формулам (1.78) и (1.81) выражаются в см, а по формуле (1.83) — в мм.

### **1.6. Определение времени охлаждения загрузки при постоянной температуре охлаждающей среды**

По технологии термической обработки часто требуется охлаждение изделий с определенной скоростью, например, при отжиге, нормализации и закалке. Охлаждение изделий может осуществляться на спокойном воздухе, в камерах с искусственной циркуляцией воздуха, в специальных муфелях, в защитной атмосфере или в вакууме, в колодцах, вместе с нагревательной печью и в различных закалочных устройствах.

Время охлаждения изделий можно рассчитать с помощью методов, разработанных для определения времени нагрева. Однако расчет осложняется тем, что охлаждение загрузки протекает с непрерывным изменением теплового потока, выделяемого её поверхностью. Одновременно изменяются и условия теплоотдачи: если в процессе нагрева коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности печи к тепловоспринимающей поверхности загрузки в течение большей части времени изменяется незначительно, то в процессе охлаждения он существенно меняется с уменьшением температуры загрузки. В связи с этим расчет времени охлаждения следует вести по отдельным температурным интервалам, определяя для каждого из них средние значения коэффициента теплоотдачи. Величину расчетного интервала целесообразно выбирать в пределах 50...200 °С. Чем меньше величина расчётного интервала, тем точнее расчёт времени охлаждения. При расчете времени охлаждения изделий на каждом температурном интервале определяются средние для него

значения теплофизических свойств загрузки. Расчет начинают с определения критерия Био.

При охлаждении изделий на спокойном воздухе их температура изменяется во времени, а остывающая загрузка выделяет тепло излучением и конвекцией. В этом случае время охлаждения «тонкой» загрузки можно определить, пользуясь формулами (1.44) и (1.45), в которых температуру печи необходимо заменить температурой воздуха и учесть изменение направления теплового потока. Для определения времени охлаждения изделий до 700 °С, когда конвективным теплообменом можно пренебречь, используют следующую формулу:

$$\tau_i = \frac{Gc}{C_{\text{пр}}F} \cdot \frac{100}{(T_B/100)^3} \cdot \left[ \Psi\left(\frac{T_H}{T_B}\right) - \Psi\left(\frac{T_K}{T_B}\right) \right], \text{ с}, \quad (1.84)$$

где  $G$  — масса изделия, кг;  $c$  — средняя удельная теплоёмкость в расчетном интервале температур, Дж/(кг·К);  $T_H$  — начальная температура расчетного интервала, К;  $T_K$  — конечная температура расчетного интервала, К;  $T_B$  — температура воздуха, К;  $C_{\text{пр}}$  — приведенный коэффициент лучеиспускания, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Для определения времени охлаждения «тонкой» загрузки до температур ниже 700 °С может быть использована следующая формула:

$$\tau_i = \frac{Gc}{\alpha_{\Sigma}F} \ln \frac{t_H - t_B}{t_K - t_B}, \text{ с}, \quad (1.85)$$

где  $c$  — средняя удельная теплоёмкость в расчетном интервале температур, Дж/(кг·К);  $t_H$ ,  $t_K$  — соответственно начальная и конечная температуры расчетного интервала температур, °С;  $\tau_i$  — время охлаждения загрузки в расчетном интервале температур, с;  $\alpha_{\Sigma}$  — среднее значение коэффициента теплоотдачи излучением и конвекцией в интервале температур  $t_H \dots t_K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Значение среднего (в интервале температур  $t_H \dots t_K$ ) коэффициента теплоотдачи излучением и конвекцией рассчитывают по формуле:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{1}{2} \cdot [(\alpha_L^H + \alpha_K^H) + (\alpha_L^K + \alpha_K^K)], \quad (1.86)$$

где  $\alpha_L^H$ ,  $\alpha_K^H$  — коэффициенты теплоотдачи излучением в начале и конце расчетного температурного интервала соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_L^K$ ,  $\alpha_K^K$  — коэффициенты теплоотдачи конвекцией в начале и конце расчетного интервала температур соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коэффициенты теплоотдачи излучением и конвекцией в начале и в конце расчетных температурных интервалов можно определить по формулам:

$$\alpha_{\text{Л}}^{\text{Н}} = C_{\text{ПР}} \cdot \frac{\left[ \left( \frac{T_{\text{Н}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{В}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{Н}} - t_{\text{В}}}, \quad (1.87)$$

$$\alpha_{\text{Л}}^{\text{К}} = C_{\text{ПР}} \cdot \frac{\left[ \left( \frac{T_{\text{К}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{В}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{К}} - t_{\text{В}}}, \quad (1.88)$$

$$\alpha_{\text{К}}^{\text{Н}} = 2,56 \cdot \sqrt[4]{t_{\text{Н}} - t_{\text{В}}}, \quad (1.89)$$

$$\alpha_{\text{К}}^{\text{К}} = 2,56 \cdot \sqrt[4]{t_{\text{К}} - t_{\text{В}}}, \quad (1.90)$$

где  $t_{\text{Н}}$  — начальная температура интервала, °С;  $t_{\text{К}}$  — конечная температура интервала, °С;  $t_{\text{В}}$  — температура воздуха, °С.

Время охлаждения «массивной» загрузки в расчетном интервале температур можно определить с помощью графиков Д.В.Будрина и правила перемножения относительных температур. Выполняя расчеты, необходимо в формулах температуру печи заменить температурой воздуха и учесть изменение направления теплового потока. В этом случае относительная температура для поверхности (центра) пластины или цилиндра

$$\theta = \frac{t_{\text{К}} - t_{\text{В}}}{t_{\text{Н}} - t_{\text{В}}}, \quad (1.91)$$

где  $t_{\text{В}}$  — температура воздуха, °С;  $t_{\text{Н}}$ ,  $t_{\text{К}}$  — соответственно начальная и конечная температуры расчетного интервала, °С.

Далее по графикам Д.В.Будрина находят значение критерия Фурье ( $Fo$ ) и определяют время охлаждения поверхности (центра) пластины или цилиндра в данном расчетном интервале температур:

$$\tau_i = \frac{Fo \cdot S^2}{a}, \quad (1.92)$$

где  $S$  — половина толщины пластины или радиус цилиндра, м;  $a$  — коэффициент температуропроводности изделия в расчетном интервале температур, м<sup>2</sup>/с.

Коэффициент температуропроводности изделия в расчетном интервале температур находят, используя выражение:

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}, \quad (1.93)$$

где  $\lambda$  — средний для данного интервала температур коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $c$  — средняя удельная теплоемкость загрузки в расчетном интервале температур, Дж/(кг·К);  $\gamma$  — плотность изделия, кг/м<sup>3</sup>.

Полное время охлаждения загрузки как «тонкой» так и «массивной» на спокойном воздухе определяется суммированием времени охлаждения по расчетным температурным интервалам:

$$\tau = \sum_{i=1}^n \tau_i, \quad (1.94)$$

где  $\tau_i$  — время охлаждения на  $i$ -м участке;  $n$  — число участков (расчетных температурных интервалов) охлаждения.



## 2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Тепловой расчет печи сводится к составлению теплового баланса, который представляет собой уравнение, связывающее приход и расход тепла. При проектировании печи тепловой баланс составляют с целью определения расхода топлива (в пламенных печах) или мощности (в электрических печах). В этом случае статьи расхода и прихода определяют расчетным путем по соответствующим формулам [4, 11, 13, 14, 16 и др.]. Тепловой баланс действующей печи составляют с целью определения технико-экономических показателей её работы. В этом случае статьи баланса можно определять как экспериментально, так и расчетом.

Для печей непрерывного действия тепловой баланс обычно составляют на единицу времени, для печей периодического действия — на время цикла (или отдельного периода работы).

### 2.1. Основные статьи теплового баланса термических печей

#### Приходные статьи.

1. Тепло, получающееся при сжигании топлива:

$$Q_T = Q_H^P \cdot B, \text{ Вт}, \quad (2.1)$$

где  $Q_H^P$  — низшая (рабочая) теплота сгорания топлива, Дж/м<sup>3</sup> или Дж/кг;  $B$  — расход топлива, м<sup>3</sup>/с или кг/с.

2. Физическое тепло, вносимое подогретым воздухом:

$$Q_{\text{Физ В}} = BV_B c_B t_B, \text{ Вт}, \quad (2.2)$$

где  $V_B$  — действительный расход воздуха, подаваемый для сжигания 1 м<sup>3</sup> или 1 кг топлива;  $c_B$  — средняя теплоемкость воздуха (в интервале температур 0... $t_B$ ), Дж/(кг·К);  $t_B$  — температура подогрева воздуха, °С.

3. Физическое тепло, вносимое подогретым топливом:

$$Q_{\text{Физ Т}} = Bc_T t_T, \text{ Вт}, \quad (2.3)$$

где  $c_T$  — средняя теплоемкость топлива (в интервале температур 0... $t_T$ ), Дж/(кг·К);  $t_T$  — температура подогрева топлива, °С.

Для термических печей топливо не подогревается, так как их рабочие температуры невелики. В приходных статьях теплового баланса термических

печей не учитывается также тепло экзотермических реакций и физическое тепло нагреваемого металла, в случае посадки в печь холодных деталей.

Статьей прихода энергии в электрической печи сопротивления является теплота, выделяющаяся в нагревательных элементах, которая является суммой всех расходных статей теплового баланса печи.

#### Расходные статьи.

**1.** Полезное тепло, расходуемое на нагрев металла:

$$Q_M = \Pi c_M (t_{MK} - t_{MH}), \text{ Вт}, \quad (2.4)$$

где  $\Pi$  — производительность печи кг/с;  $c_M$  — средняя теплоемкость металла в интервале температур от  $t_{MH}$  до  $t_{MK}$ , Дж/(кг·К);  $t_{MH}$  — начальная температура металла, °С;  $t_{MK}$  — конечная температура нагрева металла, °С.

Для печей периодического действия

$$Q_M = \frac{G}{\tau_H} c_M (t_{MK} - t_{MH}), \text{ Вт}, \quad (2.5)$$

где  $G$  — масса изделий, кг;  $\tau_H$  — время нагрева изделий в печи, с.

**2.** Потери тепла на нагрев приспособлений (тары) [13]:

$$Q_T = g_T c_T (t_K - t_H), \text{ Вт}, \quad (2.6)$$

где  $g_T$  — масса приспособлений, нагреваемая в единицу времени;  $c_T$  — средняя теплоемкость металла приспособления в интервале температур от  $t_H$  до  $t_K$ , Дж/(кг·К);  $t_H$  — температура загружаемого в печь приспособления, °С;  $t_K$  — температура выгружаемого из печи приспособления, °С.

**3.** Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки печи [4, 5, 13]:

$$Q_{KL} = 2 \cdot Q_{\text{БОК.СТ.}} + 2 \cdot Q_{\text{ТОРЦ.СТ.}} + Q_{\text{СВОДА}} + Q_{\text{ПОДА}}. \quad (2.7)$$

Потери тепла в результате теплопроводности через свод, под и стены печи определяются по уравнению (для плоской многослойной стенки):

$$Q_{СТ} = \frac{t_{\Pi} - t_0}{\frac{S_1}{\lambda_1 F_1} + \frac{S_2}{\lambda_2 F_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n F_n} + \frac{1}{\alpha_B F_{НАР}}}, \text{ Вт}, \quad (2.8)$$

где  $t_{\Pi}$  — температура рабочего пространства печи, °С;  $t_0$  — температура окружающего воздуха, °С;  $S_1, S_2, \dots, S_n$  — толщина отдельных слоев кладки, м;  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  — коэффициенты теплопроводности слоев кладки, Вт/(м·К);  $F_1, F_2, \dots, F_n$  — средние расчетные поверхности слоев кладки, м<sup>2</sup>;  $\alpha_B$  — коэффи-

коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности кладки печи в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·К). Для термических печей  $\alpha_B$  может быть принят равным 12...18 Вт/(м<sup>2</sup>·К), для электрических печей 12, для пламенных печей, имеющих меньшую тепловую изоляцию, 18 Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_{НАР}$  — наружная поверхность кладки.

Для цилиндрической стенки [4]:

$$Q_{СТ} = \frac{2\pi l(t_{П} - t_0)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{r_{НАР}}{r_n} + \frac{1}{\alpha_B r_{НАР}}}, \text{ Вт}, \quad (2.9)$$

где  $l$  — высота или длина цилиндрической стенки, м;  $r_{НАР}$  — радиус наружной поверхности кладки, м;  $r_1, r_2, \dots, r_n$  — радиусы соответствующих слоев кладки, м.

Для определения средних расчетных поверхностей каждого из слоев кладки ( $F_1, F_2, \dots, F_n$  и  $F_{НАР}$ ) необходимо иметь эскиз футеровки печи, пользуясь которым рассчитывают размеры каждого слоя, причем упрощенно они могут быть найдены по диагональным стыкам (рис. 2.1). Зная эти размеры, можно оценить внутреннюю  $F_{ВН}$  и наружную  $F_{НАР}$  площади кладки, а также площади между отдельными слоями  $F_{1,2}, F_{2,3}, \dots$ . Далее рассчитывают средние площади отдельных слоев:

$$F_1 = \sqrt{F_{ВН} F_{1,2}}; \quad F_2 = \sqrt{F_{1,2} F_{2,3}}; \text{ и т.д.} \quad (2.10)$$

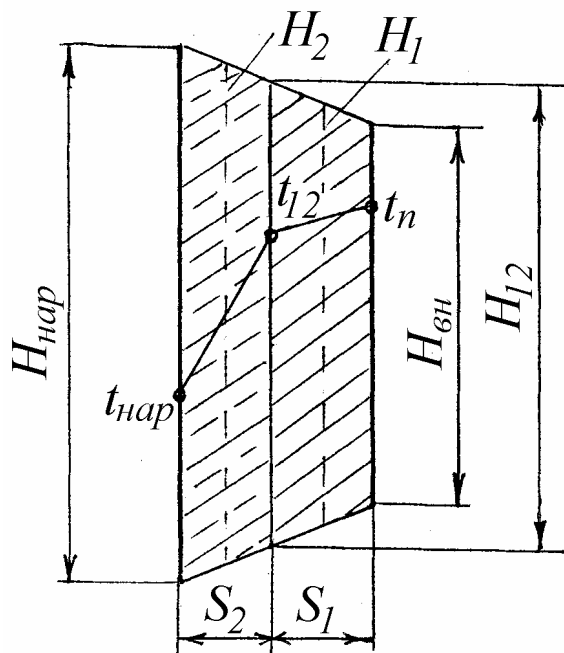


Рис. 2.1. Эскиз к расчёту потерь тепла теплопроводностью через стенку печи

Коэффициенты теплопроводности огнеупорных и теплоизоляционных материалов обычно рассчитывают по формуле

$$\lambda = a + b \cdot t_{\text{CP}}, \quad (2.11)$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные, характеризующие материал;  $t_{\text{CP}}$  — средняя температура слоя. Соответствующие значения коэффициентов теплопроводности приведены в справочной литературе.

Если принять температуру внутренней поверхности футеровки равной температуре печи  $t$  и обозначить температуру между отдельными слоями через  $t_{1,2}$ ,  $t_{2,3}$ , ...,  $t_{n-1,n}$ , а температуру наружной поверхности кладки печи через  $t_{\text{НАР}}$ , то средние температуры первого, второго и других слоев:

$$t_1 = \frac{t_{\text{П}} + t_{1,2}}{2}; \quad t_2 = \frac{t_{1,2} + t_{2,3}}{2}; \quad \dots, \quad t_n = \frac{t_{n-1,n} + t_{\text{НАР}}}{2}. \quad (2.12)$$

Для того, чтобы определить температуры слоев кладки и, соответственно, коэффициенты теплопроводности этих слоев, задаются температурой наружной стенки печи и температурами на границе слоев кладки. При этом следует иметь в виду, что при рабочей температуре до 1000 °С и хорошей теплоизоляции значение температуры внешней стенки электрической печи устанавливается в пределах 40...70 °С, а пламенной печи 100...150 °С.

Далее, пользуясь формулой, определяют теплотери через кладку. После этого уточняют полученные значения.

Тепловые потери через кладку можно представить в виде:

$$Q_{\text{КЛ}} = \frac{t_{\text{П}} - t_0}{R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{\text{НАР}}}, \text{ Вт.} \quad (2.13)$$

Здесь  $R_1$ ,  $R_2$ , ...,  $R_n$  — тепловые сопротивления слоев кладки;  $R_{\text{НАР}}$  — сопротивление передаче тепла от поверхности кладки окружающей среде.

Поскольку тепловой поток, проходящий через кладку, постоянен, можно записать:

$$Q_{\text{СТ}} = \frac{t_{\text{П}} - t_{1,2}}{R_1}; \quad Q_{\text{СТ}} = \frac{t_{1,2} - t_{2,3}}{R_2}; \quad \dots; \quad Q_{\text{СТ}} = \frac{t_{n-1,n} - t_{\text{НАР}}}{R_n}, \quad (2.14)$$

откуда

$$\begin{aligned} t_{1,2} &= t_{\text{П}} - Q_{\text{СТ}} \cdot R_1; \quad t_{2,3} = t_{\text{П}} - Q_{\text{СТ}} \cdot (R_1 + R_2); \quad \dots; \\ t_{\text{НАР}} &= t_{\text{П}} - Q_{\text{СТ}} \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n). \end{aligned} \quad (2.15)$$

Если полученные в результате проверки температуры будут отличаться от выбранных не более чем на 10 °С, то расчет произведен правильно. Если расхождение превышает эту величину, то задаются значениями температур  $t_{\text{нар}}$ ,  $t_{1,2}$ , ...,  $t_{n-1,n}$ , близкими к значениям, полученным при проверке, и снова производят расчет и проверку до тех пор, пока проверка не даст хорошего совпадения.

Следует заметить, что потери тепла через под печи, опирающийся на фундамент, приближенно можно считать равными потерям через стенку шамота толщиной 1 м.

**4. Потери тепла излучением через открытые загрузочные и разгрузочные окна и другие отверстия в футеровке.**

Расчет потерь тепла излучением в окружающую среду производится по формуле:

$$Q_{\text{луч}} = C_0 \varepsilon \phi F_{\text{отв}} \left[ \left( \frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right] \cdot \Delta \tau, \text{ Вт}, \quad (2.16)$$

где  $\varepsilon$  — степень черноты излучающего тела (стенки печи, печные газы, нагретый металл);  $F_{\text{отв}}$  — площадь поперечного сечения отверстия,  $\text{м}^2$ ;  $T_{\text{п}}$ ,  $T_{\text{в}}$  — температура соответственно печи и окружающего воздуха, К;  $\Delta \tau = \tau_{\text{откр}} / \tau_{\text{общ}}$  — доля времени, в течение которого окно открыто, с/с;  $\phi$  — коэффициент диафрагмирования, зависящий от соотношения ширины и высоты отверстия и от толщины стенки (рис. 2.2) [11].

Коэффициент диафрагмирования для обычных окон может быть принят равным примерно 0,9. Для малых и узких отверстий в толстых стенках он уменьшается до 0,5 (в результате уменьшения угла лучеиспускания). Для окон, закрытых металлическими экранами  $\phi = 0,5$ .

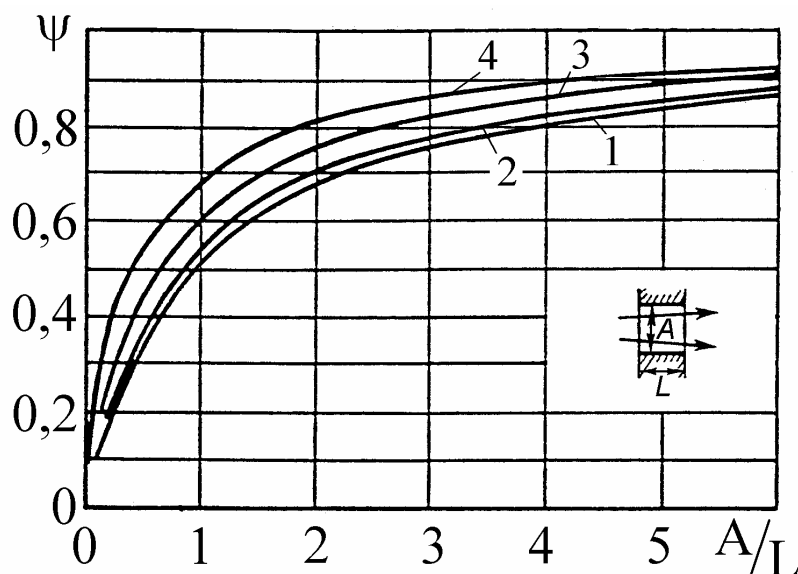


Рис. 2.2. Коэффициент диафрагмирования отверстий. Форма отверстия: 1 — круглое отверстие; 2 — квадратное отверстие; 3 — прямоугольное отверстие при ширине окна  $B=2A$  ( $A$  — высота,  $L$  — глубина окна); 4 — узкая щель высотой  $A$  ( $B \gg A$ ).

5. Потери тепла вследствие тепловых коротких замыканий  $Q_{\text{ТКЗ}}$ , вызванных нарушением сплошности изоляции в тех местах, где через кладку проходят переключки из более теплопроводных материалов: термодарные трубки, выходы нагретателей, направляющие, оси роликов, выходящие из печи, закладные желобы и т.п. В большинстве случаев эти потери не могут быть точно учтены и их принимают обычно равными 50...100% от потерь теплоты через стенки [4], то есть

$$Q_{\text{ТКЗ}} = (0,5...1,0) \cdot Q_{\text{СТ}}, \text{ Вт.} \quad (2.17)$$

6. Тепло, уносимое водой, охлаждающей внутренние части печи (направляющие для движения поддонов, оси водоохлаждаемых роликов), арматуру заслонок и т.п. Потери тепла с охлаждающей водой могут быть определены по формуле:

$$Q_{\text{ВОД}} = P_{\text{В}} c_{\text{В}} (t_{\text{К}} - t_{\text{Н}}), \text{ Вт,} \quad (2.18)$$

где  $P_{\text{В}}$  — часовой расход воды;  $c_{\text{В}}$  — теплоемкость воды;  $t_{\text{К}}$  — температура воды на выходе из охлаждаемых устройств (45...50°C);  $t_{\text{Н}}$  — температура воды на входе в охлаждаемые устройства (15...25°C).

7. Затраты тепла на нагрев контролируемой атмосферы.

Тепло, затрачиваемое на нагрев контролируемой атмосферы, может быть определено по следующей формуле [13]

$$Q_{\text{АТМ}} = q_{\text{АТМ}} c_{\text{СР}} (t_{\text{К}} - t_0), \text{ Вт,} \quad (2.19)$$

где  $q_{\text{АТМ}}$  — средний расход атмосферы м<sup>3</sup>/с;  $c_{\text{СР}}$  — средняя объемная теплоемкость атмосферы в диапазоне температур от  $t_0$  до  $t_{\text{К}}$ , Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_0$ ,  $t_{\text{К}}$  — начальная и конечная температуры атмосферы, °С.

Для определения расхода защитной атмосферы в камерных электропечах рекомендуется эмпирическая формула [13]

$$q_{\text{АТМ}} = (2,1 \cdot \Pi^{1,6} + 0,5), \quad (2.20)$$

где  $\Pi$  — периметр загрузочного проема, м.

При определении расхода атмосферы в методических электропечах также можно пользоваться формулой [13]

$$q_{\text{АТМ}} = G \cdot k, \quad (2.21)$$

где  $G$  — производительность печи, кг/ч;  $k$  — удельный расход атмосферы на единицу массы загрузки печи, который для методических печей принимают равным  $0,1 \dots 0,15 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Иногда в практике расход защитной атмосферы в электрических печах определяют по формуле

$$q_{\text{АТМ}} = V_{\text{П}} k, \quad (2.22)$$

где  $V_{\text{П}}$  — объем рабочего пространства печи,  $\text{м}^3$ ;  $k$  — коэффициент, показывающий кратность обмена (для печей с объемом камеры до  $1 \text{ м}^3$  принимают  $k=10 \text{ ч}^{-1}$ , при больших значениях объема печной камеры  $k=5 \text{ ч}^{-1}$ ).

**8.** Тепло, уносимое уходящими продуктами сгорания [14]:

$$Q_{\text{ПС}} = BV_{\text{ПС}}c_{\text{ПС}}t_{\text{ПС}}, \text{ Вт}, \quad (2.23)$$

где  $V_{\text{ПС}}$  — количество продуктов сгорания на  $1 \text{ кг}$  или  $1 \text{ м}^3$  топлива при нормальных условиях,  $\text{м}^3/\text{кг}$  или  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $t_{\text{ПС}}$  — температура уходящих дымовых газов,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $c_{\text{ПС}}$  — теплоемкость уходящих дымовых газов,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ . Значение  $V_{\text{ПС}}$  определяется из расчёта горения топлива (см. раздел 4).

Для предварительных оценок рекомендуется принимать следующие температуры продуктов сгорания, покидающих печь:

а) методические печи при холодном посаде углеродистой стали:  $t_{\text{ПС}}=800 \dots 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

б) полуметодические печи и методические печи при загрузке горячего металла  $t_{\text{ПС}}=1050 \dots 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

в) камерные печи с поштучной загрузкой и выгрузкой изделий:  $t_{\text{ПС}}=t_{\text{МК}} + (50 \dots 100) \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для электрических печей данная статья расхода не рассчитывается.

**9.** Тепло, аккумулированное кладкой (в печах периодического действия) [5]:

$$Q_{\text{АКК}} = V_{\text{КЛ}} \gamma_{\text{КЛ}} c_{\text{КЛ}} (t_{\text{КЛ}}^{\text{К}} - t_{\text{КЛ}}^{\text{Н}}) / \tau, \text{ Вт}, \quad (2.24)$$

где  $V_{\text{КЛ}}$  — объем кладки,  $\text{м}^3$ ;  $\gamma_{\text{КЛ}}$  — плотность кладки,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c_{\text{КЛ}}$  — теплоемкость кладки, средняя в интервале  $t_{\text{КЛ}}^{\text{Н}} \dots t_{\text{КЛ}}^{\text{К}}$ ,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  $t_{\text{КЛ}}^{\text{К}}$ ,  $t_{\text{КЛ}}^{\text{Н}}$  — средние конечная и начальная температуры кладки,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau$  — период работы печи, с.

Среднюю температуру находят по распределению температуры кладки, определенному по методу конечных разностей.

В печах с выкатным подом необходимо учитывать тепло, аккумулируемое тележкой.

**10.** Потери тепла через зеркало расплавленной соли (определяется для печей-ванн).

Передача тепла через зеркало ванны в окружающее пространство происходит лучеиспусканием и потери тепла могут быть определены по формуле [5]:

$$Q_{\text{изл}} = C\phi F_{\text{изл}} \left[ \left( \frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт}, \quad (2.25)$$

где  $C=4,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  — коэффициент лучеиспускания расплавленной соли;  $F_{\text{изл}}$  — поверхность зеркала ванны,  $\text{м}^2$ ;  $\phi$  — коэффициент диафрагмирования (определяется из рис. 2.1);  $T_{\text{п}}$  — температура расплава, К;  $T_0$  — температура окружающей среды, К.

#### Составление теплового баланса печи.

Просуммировав отдельно приходные и расходные статьи теплового баланса и приравняв  $Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}}$ , получим для пламенных печей уравнение с одним неизвестным, которым будет расход топлива  $B$ . Для электрических печей  $Q_{\text{прих}} = N$ ;  $N$  — расчетная мощность печи, значение которой находят при суммировании расходных статей теплового баланса. При расчёте теплового баланса щелочных и селитровых печей-ванн, используемых в термическом производстве в качестве охлаждающих устройств при изотермической или ступенчатой закалках, вводится статья прихода тепла, вносимого в расплав нагретым металлом. В расходной части баланса рассчитываются затраты тепла на охлаждение тигля ванны специально подаваемым воздухом.

При расчёте теплового баланса лабораторных печей, используемых, как правило, для нагрева небольших по массе садок, основными расходными статьями являются потери теплопроводностью через футеровку и на аккумуляцию тепла при разогреве печи. Обычно тепловой баланс печи представляют в виде таблицы (табл. 2.1)



Таблица 2.1

## Тепловой баланс рабочего пространства печи

№ п/п	Статьи прихода	Вт	%	№ п/п	Статьи расхода	Вт	%
1	Тепло, полученное при сжигании топлива			1	Полезное тепло на нагрев материалов		
2	Тепло, вносимое подогретым воздухом			2	Тепло на нагрев транспортирующих средств		
3	...			3	...		
...	...			...	...		
...	...			...	...		
...	...			...	...		
Итого			100	Итого			100

**2.2. Расход топлива и мощность печи**

Расход топлива определяют из уравнения теплового баланса. Полученное значение увеличивают на 10...20% для печей непрерывного действия и на 20...100% для печей периодического действия с целью обеспечения возможности работы на худших сортах топлива и обеспечения форсированного нагрева металла. Таким образом,

$$B_{\text{МАКС}} = k B, \quad (2.26)$$

где  $k=1,1...1,2$  — печи непрерывного действия;  $k=1,2...2,0$  — печи периодического действия.

Для электрических печей установленная мощность определяется по формуле

$$N_{\text{УСТ}} = k N_{\text{РАСЧ}}, \text{ Вт (кВт)}, \quad (2.27)$$

где  $k$  — коэффициент запаса мощности, принимаемый в пределах 1,2...1,6 (для печей мощностью выше 300 кВт  $k=1,2...1,4$ , мощностью 100...300 кВт  $k=1,3...1,5$  и мощностью до 100 кВт  $k=1,4...1,6$ );  $N_{\text{РАСЧ}}$  — общий расход теплоты, Вт (кВт).

Избыток установленной мощности необходим по следующим причинам:  
— вследствие колебания напряжения в сети;

- из-за старения нагревательных элементов;
- в целях компенсации возможных ошибок при расчете тепловых потерь;
- для создания повышенного теплового потока от нагревательных элементов к изделиям во время первого периода нагрева (для садочных печей);
- для возможности форсирования нагрева и уменьшения длительности разогрева печи до технологической температуры (коэффициент запаса для некоторых типов печей, например, стенда колпаковой печи, принимают иногда значительно выше общепринятых величин, и он может иметь значение 3...5 и даже больше).

Коэффициент полезного действия для термических печей определяется по формуле

$$\eta = \frac{Q_M}{Q_{\text{РАСХ}}} \cdot 100\%, \quad (2.28)$$

где  $Q_M$  — тепло, идущее на нагрев металла;  $Q_{\text{РАСХ}}$  — суммарные затраты тепла печью выбранной конструкции.

Обычно КПД топливных печей 10...40%, а электрических 50...80%, так как в последних нет потерь тепла с уходящими газами. Электрические печи-ванны имеют более низкий КПД (30...40%) вследствие значительных потерь тепла через зеркало ванны.

### 3. РАСЧЁТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

#### 3.1. Основы расчёта горения топлива

Химическая энергия топлива является одним из источников получения тепла в промышленных печах. При сжигании топлива в окислителе (в большинстве случаев это кислород воздуха) образуются продукты сгорания, обладающие высокой температурой. Расчёт горения топлива является необходимой составной частью теплотехнического расчёта промышленных пламенных печей. Расчёт выполняют с целью определения:

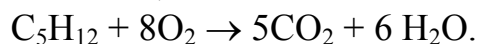
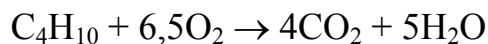
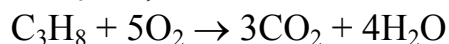
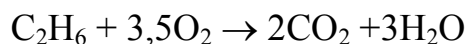
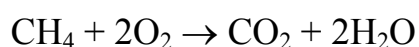
- а) количества необходимого для горения воздуха или обогащённого кислородом дутья;
- б) количества и состава продуктов сгорания;
- в) температуры горения.

##### 3.1.1. Определение расхода воздуха и обогащённого кислородом дутья

В основу расчета расхода воздуха положены стехиометрические реакции горения, составленные для всех компонентов данного вида топлива. По реакциям горения составляющих топлива производим расчет потребного теоретического количества воздуха для сжигания топлива, определяя потребное количество кислорода для сжигания отдельных составляющих топлива, а затем по количеству кислорода рассчитываем теоретическое необходимое количество воздуха.

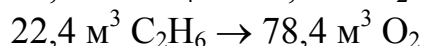
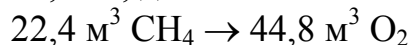
Рассмотрим расчёт на примере горения природного газа следующего состава: 96,3%  $\text{CH}_4$ ; 2,82%  $\text{C}_2\text{H}_6$ ; 0,18%  $\text{C}_3\text{H}_8$ ; 0,07%  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ; 0,02%  $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ; 0,11  $\text{CO}_2$ ; 0,5%  $\text{N}_2$ .

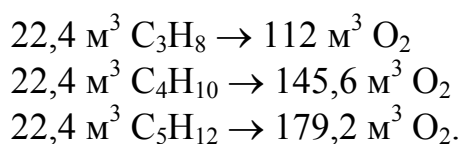
Составим стехиометрические реакции горения горючих компонентов топлива:



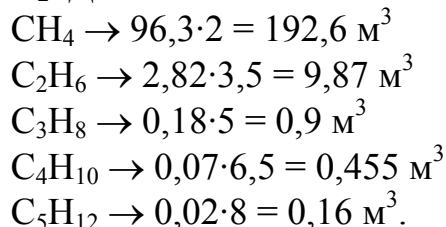
Из реакций видно, что для сжигания 1 моля  $\text{CH}_4$  требуется 2 моля  $\text{O}_2$ ; соответственно 1 моль  $\text{C}_2\text{H}_6$  — 3,5 моля  $\text{O}_2$ ; 1 моль  $\text{C}_3\text{H}_8$  — 5 моля  $\text{O}_2$ ; 1 моль  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  — 6,5 моля  $\text{O}_2$ ; 1 моль  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  — 8 моля  $\text{O}_2$ .

Поскольку 1 кмоль любого газа занимает один и тот же объем, равный  $22,4 \text{ м}^3$ , для полного сжигания компонентов газа требуется:





В  $100 \text{ м}^3$  природного газа рассматриваемого состава содержится  $96,3 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$ ;  $2,82 \text{ м}^3 \text{ C}_2\text{H}_6$ ;  $0,18 \text{ м}^3 \text{ C}_3\text{H}_8$ ;  $0,07 \text{ м}^3 \text{ C}_4\text{H}_{10}$ ;  $0,02 \text{ м}^3 \text{ C}_5\text{H}_{12}$ ;  $0,15 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$ ;  $0,5 \text{ м}^3 \text{ N}_2$ . Для сжигания этих компонентов соответственно требуется:



Итого  $203,985 \text{ м}^3$  кислорода.

Если сжигание происходит в сухом воздухе, то доля кислорода в нем по объему составляет 21% , а остальные 79% приходятся на азот. Таким образом , количество азота в воздухе в  $79/21 = 3,762$  раза больше количества кислорода. Поэтому расход воздуха для сжигания  $100 \text{ м}^3$  газа рассматриваемого состава будет равен:

$$V_B = 203,985 + 203 \cdot 3,762 = 971,37 \text{ м}^3.$$

Расчет по стехиометрическим реакциям позволяет определить наименьшее, необходимое для сжигания газа, количество кислорода (воздуха), называемое теоретическим ( $V_{\text{ТЕОР}}$ ). На практике для полного сжигания топлива требуется количество воздуха, несколько превышающее теоретическое и называемое действительным расходом ( $V_{\text{ДЕЙСТВИТ}}$ ). Отношение  $\alpha = V_{\text{ДЕЙСТВИТ}}/V_{\text{ТЕОР}}$  называют коэффициентом расхода воздуха. Значения  $\alpha$  для топлива разных видов и топливосжигающих устройств некоторых типов приведены ниже.

Газ в горелках без предварительного смешения	1,10...1,15
Газ в горелках с предварительным смешением	1,05
Мазут	1,10...1,20
Каменный и бурый угли в топках с ручным обслуживанием	1,50...1,80
Каменный и бурый угли в механических топках	1,20...1,40
Пылевидное топливо	1,20...1,30
Дрова в шахтных топках	1,25...1,35

В последнее время для интенсификации процессов горения и технологических реакций широко используется дутьё, обогащённое кислородом. Очевидно, что при обогащении кислородом соотношение  $\text{N}_2/\text{O}_2$  в дутье меняется. Так, при использовании дутья, содержащего 30%  $\text{O}_2$ , соотношение  $\text{N}_2/\text{O}_2$  в нём в объёмных единицах составит  $70/30=2,33$ , что приведёт к уменьшению количества азота.

### 3.1.2. Определение количества и состава продуктов сгорания

Определение количества и состава продуктов сгорания производится аналогично определению количества воздуха. Если сжигание топлива происходит при коэффициенте расхода воздуха  $\alpha > 1$ , то общее количество продуктов сгорания будет больше, поскольку в них увеличится количество азота и появится избыточный кислород.

При расчете горения необходимо составить материальный баланс, определяя массы исходных веществ и образующихся продуктов сгорания.

Расчет процесса горения ведут на  $100 \text{ м}^3$  газообразного топлива. Расход воздуха, состав и количество продуктов сгорания природного газа приведены в табл. 3.1.

Для горения газа, рассматриваемого состава в воздухе при  $\alpha = 1,0$  материальный баланс выглядит следующим образом:

Поступило:

$\text{CH}_4$	$96,3 \cdot 0,714 \text{ кг} = 68,758 \text{ кг}$
$\text{C}_2\text{H}_6$	$2,82 \cdot 1,339 \text{ кг} = 3,775 \text{ кг}$
$\text{C}_3\text{H}_8$	$0,18 \cdot 1,964 \text{ кг} = 0,353 \text{ кг}$
$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$0,07 \cdot 2,589 \text{ кг} = 0,181 \text{ кг}$
$\text{C}_5\text{H}_{12}$	$0,02 \cdot 3,214 \text{ кг} = 0,064 \text{ кг}$
$\text{CO}_2$	$0,15 \cdot 1,904 \text{ кг} = 0,294 \text{ кг}$
$\text{O}_2$	$203,986 \cdot 1,428 \text{ кг} = 291,292 \text{ кг}$
$\text{N}_2$ из воздуха	$767,39 \cdot 1,25 \text{ кг} = 959,237 \text{ кг}$
$\text{N}_2$ из газа	$0,5 \cdot 1,25 = 0,625 \text{ кг}$
Итого:	<u><math>1324,579 \text{ кг}</math></u>

Получено:

$\text{CO}_2$	$(0,15 + 103,01) \cdot 1,964 \text{ кг} = 202,606 \text{ кг}$
$\text{H}_2\text{O}$	$202 \cdot 0,803 \text{ кг} = 162,206 \text{ кг}$
$\text{N}_2$ из воздуха	$959,237 \text{ кг}$
$\text{N}_2$ из газа	$0,625 \text{ кг}$
Итого:	<u><math>1324,674 \text{ кг}</math></u>

Расхождение в приходной и расходной частях материального баланса, обусловленное накоплением ошибки при вычислениях, является приемлемым, поскольку не превышает  $0,1 \%$ .

Таблица 3.1

Расход воздуха, состава и количества продуктов сгорания природного газа в воздухе

Топливо			Воздух, м³			Продукты сгорания, м³				
Компо- ненты	Содер- жание, %	Коли- чество, м³	O₂	N₂	Всего	CO₂	H₂O	O₂	N₂	Всего
CH₄	96,3	96,3	192,6	203,99× ×3,762=	767,39	96,3	192,6	—	767,39	—
C₂H₆	2,82	2,82	9,87			5,64	8,46	—		—
C₃H₈	0,18	0,18	0,90			0,54	0,72	—		—
C₄H₁₀	0,07	0,07	0,455			0,28	0,35	—		—
C₅H₁₂	0,02	0,02	0,16			0,10	0,12	—		—
CO₂	0,15	0,15	—	767,39	—	0,15	—	—	0,50	—
N₂	0,50	0,50	—			—	—	—		—
α=1,0										
Σ	100	100	203,99	767,39	971,38	103,01	202,25	—	767,89	1073,15
Σ, %	—	—	21,0	79,0	100	9,6	18,8		71,6	100
α=1,1										
Σ	100	100	224,39	844,16	1068,55	103,01	202,25	20,4	844,16	1169,82
Σ, %	—	—	21,0	79,0	100	8,8	17,3	1,7	72,2	100

### 3.1.3. Определение температуры горения

Если бы все тепло, выделяющееся при сгорании топлива, пошло на нагрев продуктов горения, то оно имело бы температуру, которая называется калориметрической:

$$t_K = \frac{Q_H^P}{V_{\text{ПС}} \cdot c}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.1)$$

где  $Q_H^P$  – теплота сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup>;  $V_{\text{ПС}}$  – объем продуктов сгорания, образующихся при сгорании единицы объема топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $c$  – средняя объемная теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(м<sup>3</sup>·град).

Требуемую для расчета калориметрической температуры горения низшую теплоту сгорания топлива  $Q_H^P$ , определяем расчетным путем, зная тепловые эффекты реакций горения соединений, входящих в состав топлива и доли этих составляющих в газе:

$$Q_H^P = \frac{\sum Q_i x_i}{22,4} = (805560 \cdot 0,963 + 1323580 \cdot 0,0283 + 2044156 \cdot 0,0018 + 2648745 \cdot 0,017) / 22,4 = 36545,528 \text{ кДж/м}^3 \quad (3.2)$$

Для определения температуры воспользуемся понятием энтальпии, представляющей собой произведение теплоемкости на температуру:

$$i = c \cdot t, \text{ кДж/м}^3. \quad (3.3)$$

Поскольку теплоемкость газов является функцией температуры, а для нахождения калориметрической температуры необходимо знать теплоемкость продуктов сгорания, воспользуемся методом последовательных приближений.

Найдем энтальпию продуктов сгорания при  $\alpha=1,1$ :

$$i_0 = c \cdot t_K = \frac{Q_H^P}{V_{\text{ПС}}} = \frac{36545}{11,7} = 3123,5 \text{ кДж/м}^3 \quad (3.4)$$

Зададимся возможной температурой продуктов горения 1900°С:

$$i_{\text{CO}_2} = 0,08 \cdot 4634,76 = 370,78$$

$$i_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1726 \cdot 3657,85 = 631,34$$

$$i_{\text{O}_2} = 0,0174 \cdot 2971,30 = 51,7$$

$$i_{N_2} = 0,722 \cdot 2808,22 = 2027,53$$

---


$$i_{1900} = 3081,35$$

Поскольку значение  $i_0 > i_{1900}$ , зададимся температурой продуктов горения  $2000^\circ\text{C}$ :

$$i_{CO_2} = 0,08 \cdot 4910,51 = 392,84$$

$$i_{H_2O} = 0,1726 \cdot 3889,72 = 671,37$$

$$i_{O_2} = 0,0174 \cdot 3142,76 = 54,68$$

$$i_{N_2} = 0,722 \cdot 2970,25 = 2144,52$$

---


$$i_{2000} = 3263,41$$

Поскольку  $i_{2000} > i_0$ , то действительная калориметрическая температура лежит в пределах  $1900 \dots 2000^\circ\text{C}$  и может быть найдена интерполяцией:

$$t_K = 1900 + \frac{3123,5 - 3081,35}{3263,41 - 3081,35} \cdot 100 = 1906^\circ\text{C}.$$

### **3.2. Расход топлива в пламенных печах и виды топливосжигающих устройств**

Расход топлива в печах зависит от типа, назначения и режима работы печи, состояния кладки, её теплоизоляции, температуры посяда металла, температуры подогрева воздуха (газа) за счёт тепла отходящих продуктов сгорания, организации процесса теплообмена, автоматизации тепловых процессов, производительности печи и др. Оценить в количественном отношении влияние каждого из перечисленных факторов на расход топлива затруднительно, а часто и невозможно.

Существенное влияние на расход топлива оказывает производительность печи. С увеличением производительности общий расход топлива возрастает примерно по линейному закону, а удельный расход, наоборот, уменьшается.

На рис. 3.1 показана зависимость удельного расхода тепла от производительности некоторых печей [21]. Характер кривых для всех печей примерно одинаков. Такие зависимости могут быть получены расчётом, экспериментально, а также статистически — путём обработки эксплуатационных данных.

Сжигание газообразного топлива осуществляется в горелках. Характеристика газогорелочных устройств различных типов и методы их расчёта наиболее подробно описаны в [22]. Поэтому в данном разделе ограничимся кратким описанием конструкций горелок, применяемых в термических печах.



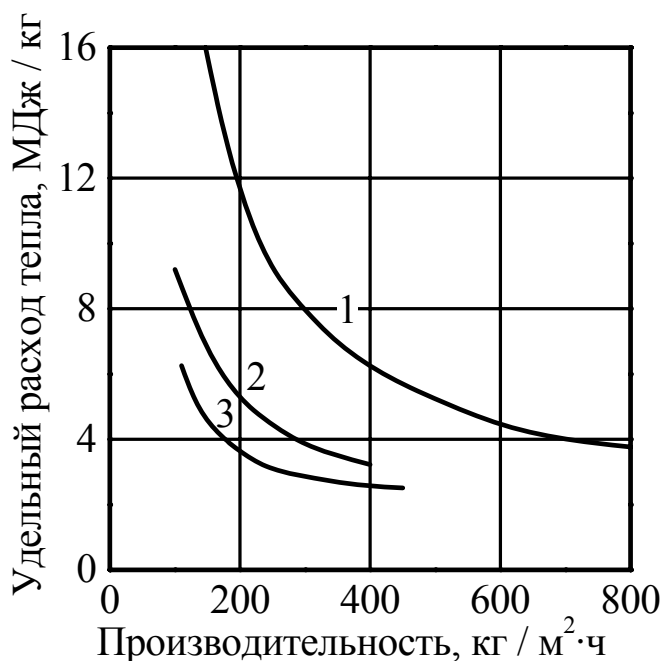


Рис. 3.1. Зависимость удельного расхода тепла от удельной производительности печи.

1 — камерная, 2 — полуметодическая,  
3 — методическая печь

Основным параметром горелки является скорость газовой смеси при её выходе. Диаметр выходного сопла  $d_{н.г.}$  (диаметр носика горелки) является «калибром» горелки. По его размеру классифицируют горелки различных типов и конструкций. Минимальная скорость газовой струи в выходном сечении должна быть такой, чтобы не допускать проскока пламени внутрь горелки. Максимальная же скорость зависит от конструкции горелки, давления газа и воздуха и требуемой длины факела. Горелки всех многочисленных конструкций можно разделить на три основных типа:

- без предварительного смешения;
- с улучшенным смешением;
- с предварительным смешением.

#### Горелки без предварительного смешения типа «труба в трубе».

Эти горелки характеризуются раздельным подводом газа и воздуха. Смешение струй газа и воздуха начинается на расстоянии 30...60 мм от выходного сопла. Коэффициент расхода воздуха составляет  $\alpha = 1,10...1,15$ . При таком  $\alpha$  и сжигании холодного газа с холодным воздухом действительная температура печи может снижаться на 100...150°C, что обусловлено содержанием балластного азота в избытке воздуха. Другим недостатком данных горелок является принудительная подача воздуха и необходимость регулирования соотношения газ-воздух.

Преимуществами данных горелок являются:

- широкие пределы регулирования;
- отсутствие опасности проскока пламени внутрь горелки;

- компактность и малые габариты по сравнению с горелками с предварительным смешением;
- удалённость области высоких температур от кладки, что обусловлено растянутостью факела;
- возможность концентрированного подвода тепла при небольшом числе горелок высокой производительности.

Горелки «труба в трубе» нормализованы Стальпроектом. При расчёте этих горелок следует исходить из следующих положений.

1. Горелки могут работать при давлении газа, поступающего из сети. Давление газа перед ответвлением около горелок можно принимать для природного газа 4...6 кПа, для коксового 1,5...2,0 кПа, для доменного 1,5 кПа.

2. Давление воздуха перед горелками 2...3 кПа.

3. Скорость газа внутри горелки на участке до выходного сопла может быть примерно в два раза больше, чем скорость в подводящем газопроводе, то есть 20...25 м/с.

4. Общее сопротивление по газовому или воздушному тракту горелки составляет 1,5...1,7 скоростных давлений в выходном сечении соответственно газового сопла или воздушной коробки. Скорость истечения газа из сопла определяют по формуле

$$w_{\Gamma} = \sqrt{\frac{2p}{k\rho_{\Gamma}}}, \quad (4.5)$$

где  $p$  — давление газа в газопроводе перед горелкой, Па;  $k$  — коэффициент, равный 1,5...1,7;  $\rho_{\Gamma}$  — плотность газа, кг/м<sup>3</sup>. Скорость истечения газа из сопла не должна превышать 80...100 м/с.

5. Отношение выходных скоростей воздуха и газа должно быть 1/2, но не менее 1/3...1/4.

6. Скорость газозвушной смеси в носике горелки при максимальном расходе газа и воздуха может составлять 25...30 м/с, а минимальная скорость 4...5 м/с.

#### Горелки с улучшенным смешением

Горелки с улучшенным смешением могут работать на низком давлении газа и воздуха также как и горелки типа «труба в трубе». Их недостаток — необходимость принудительной подачи и регулирования воздуха. Опасность проскока пламени внутрь горелки для них несколько выше, чем для горелок «труба в трубе». Для предупреждения проскока пламени минимальную выходную скорость газозвушной смеси в носике горелки рекомендуется принимать не менее 5...8 м/с.

Во избежание отрыва пламени при низкой температуре рабочего пространства печи скорость вылета смеси из носика горелки не должна превы-

шать  $w_{\text{НГ}} = 20$  м/с. Однако, если рабочее пространство печи раскалено, то скорость можно повысить до максимально возможных пределов, определяемых допустимыми давлениями газа и воздуха.

Способы улучшения смешения газа с воздухом заключается в следующем:

- а) разделяют потоки газа и воздуха на мелкие струи, что увеличивает поверхность их соприкосновения;
- б) увеличивают путь и время перемешивания газа с воздухом внутри горелки;
- в) направляют газ и воздух под углом друг к другу;
- г) создают закручивание потоков газа и воздуха.

Эти способы улучшения смешения положены в основу конструирования горелок.

Основными достоинствами горелок с улучшенным смешением являются уменьшение длины факела по сравнению с факелом горелок типа «труба в трубе» и уменьшение коэффициента расхода воздуха  $\alpha$  при сжигании газа до 1,05...1,10.

При расчёте горелок с улучшенным смешением можно исходить из тех же положений, что и при расчёте горелок типа «труба в трубе». Горелки с улучшенным смешением нормализованы Стальпроектом и Теплопроектом.

Горелки Теплопроекта (ГНП) — многосопловые. Они рассчитаны на сжигание природного газа с теплотой сгорания  $Q_{\text{Н}}^{\text{P}} = 36$  МДж/м<sup>3</sup>. При давлении газа 2,5 кПа производительность горелки нормализована в пределах 1,5...200 м<sup>3</sup>/ч.

Турбулентные горелки Стальпроекта и Теплопроекта (ГТН) — это горелки с закручиванием струи воздуха. Они рассчитаны на сжигание газа с низкой теплотой сгорания  $Q_{\text{Н}}^{\text{P}} = 3,75...5,85$  МДж/м<sup>3</sup> и средней теплотой сгорания  $Q_{\text{Н}}^{\text{P}} = 5,85...9,20$  МДж/м<sup>3</sup>. При давлении газа 2,5 кПа производительность горелок нормализована в диапазоне от 130 до 2200 м<sup>3</sup>/ч в зависимости от теплоты сгорания газа. При сжигании газа с высокой теплотой сгорания, например, природного газа, эти горелки работают неудовлетворительно.

#### Горелки с полным предварительным смешением (инжекционные горелки)

В инжекционных горелках смешение газа с воздухом осуществляется по длине газоздушного потока от места поступления воздуха в горелку до выходного сопла. Воздух в горелку засасывается под влиянием инжектирующей струи газа при выходе из газового сопла. Преимущества инжекционных горелок по сравнению с горелками рассмотренных выше типов следующие:

- а) коэффициент расхода воздуха  $\alpha = 1,00...1,05$ ;
- б) для инжекционных горелок не требуется принудительной подачи воздуха и принудительной регулировки соотношения газ-воздух;

в) инжекционные горелки имеют короткий факел, что особенно важно для печей с малым рабочим пространством.

Инжекционным горелкам присущи следующие недостатки:

а) при работе на инжекционных горелках для обеспечения их нормальной работы необходимы газоповысительные станции, поскольку давление природного газа должно быть не менее 50 кПа, а для доменного газа не менее 10 кПа;

б) невысокие пределы регулирования вследствие опасности проскока пламени внутрь горелки;

в) ограниченные температуры подогрева воздуха или газа и воздуха вследствие опасности самовоспламенения смеси внутри корпуса горелки;

г) малые допустимые пределы изменения теплоты сгорания для газа; при изменении  $Q_H^P$  для газа на  $\pm 0,62 \dots 1,13$  МДж необходимо менять сопло;

д) при работе на газе с высокой теплотой сгорания (коксовый, природный) в туннелях горелок развиваются весьма высокие температуры, что приводит к сужению пределов регулирования и уменьшению стойкости кладки печи вокруг горелочного туннеля и самих горелок;

е) сложность конструкции и большие габариты горелок, что иногда препятствует их расположению в заданных габаритах печи.

Инжекционные горелки нормализованы Стальпроектом и подразделены на три типа:

— горелки типа В предназначены для работы на высококалорийных газах (природный, коксовый) и холодном воздухе;

— горелки типа Н предназначены для работы на низкокалорийных газах ( $Q_H^P = 3,75 \dots 9,20$  МДж/м<sup>3</sup>) и холодном воздухе;

— горелки типа П предназначены для работы на подогретом воздухе и подогретом или холодном низкокалорийном газе.

Расчёт инжекционных горелок достаточно сложен. Методика расчёта приведена в специальной литературе — например, [17, 22].

## **4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЛАМЕННЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ**

### **4.1. Особенности термических печей как объектов автоматического регулирования.**

Основным параметром, который характеризует нагрев металла, является температура. Наиболее важной характеристика нагреваемого металла должна быть температура поверхности нагреваемого металла, но её контролировать трудно. Для управления нагревом используют косвенный метод, регулируя температуру печи, которая представляет собой некую усреднённую характеристику температурного состояния её рабочего пространства. Она всегда выше температуры нагреваемого металла и определяет направление теплового потока к садке.

Основная задача системы автоматического регулирования (САР) это стабилизация температуры печи на определённом уровне. Для термических печей допускается регулирование температуры с точностью до  $10^{\circ}\text{C}$ . Разность, между максимальной и минимальной температурами на поверхности изделий, не должна превышать  $20^{\circ}\text{C}$ . В ряде случаев, при обработке цветных металлов и сплавов, предъявляются более жесткие требования.

Следует различать также, по сложности построения системы автоматического регулирования, печи периодического действия (камерные или садочные) и печи непрерывного действия (проходные). В печах непрерывного действия металл непрерывно перемещается в рабочем пространстве и постепенно нагревается. Тепловой режим печи постоянный, поскольку не меняются ни статические, ни динамические характеристики печи, как объекта регулирования. Возмущения также постоянны, они связаны с периодическим открыванием окон и загрузкой металла, т.е. являются возмущениями по нагрузке печи. Поэтому печи непрерывного действия сравнительно легко поддаются автоматизации.

В печах периодического действия различают период нагрева, когда тепло расходуется на нагрев металла и покрытие тепловых потерь печи и период выдержки, когда тепло идет только на покрытие теплопотерь. Переход от периода нагрева к периоду выдержки производится изменением тепловой мощности печи. При этом меняются статические и особенно динамические характеристики объекта регулирования. Основное возмущение связано с периодическим температурным режимом печи. Оно вносится регулирующим устройством и называется возмущением по заданию. Такие печи сложнее, как объекты регулирования, чем печи непрерывного действия.

Крупные термические печи относятся к объектам с распределёнными параметрами, поскольку температура является функцией рабочего простран-

ва печи. Такие печи разделяют на отдельные *тепловые зоны*. Каждая зона имеет свое питание и свою систему автоматического регулирования.

Автоматическое регулирование пламенных термических печей имеет свою специфику, поскольку помимо регулирования температуры, необходимо регулировать давление печных газов в рабочем пространстве, регулировать соотношение топлива и воздуха, стабилизировать давление в подводящих топливо и воздух трубопроводах. Рассмотрим эти системы регулирования более подробно.

#### **4.2. Система автоматического регулирования (САР) температуры в рабочем пространстве печи**

Для регулирования температуры используют регуляторы непрерывного и релейного действия. Регуляторы непрерывного действия применяют в том случае, когда при работе печи её потребная мощность меняется в широких пределах. Это печи периодического действия, в которых тепловая нагрузка значительно меняется при переходе от периода нагрева к периоду выдержки, а также некоторые печи непрерывного действия, в которых загрузка и выгрузка металла создаёт значительные возмущения.

При использовании регуляторов непрерывного действия пропорциональный закон регулирования (П-регулятор) не находит применения из-за наличия значительной статической ошибки, величина которой меняется при изменении загрузки печи. Интегральный закон регулирования (И-регулятор) используется редко, т.к. при этом возникает длительный переходный процесс, который сопровождается большими отклонениями температуры от задания. Наиболее широко применяется пропорционально-интегральный закон регулирования (ПИ-регулятор) в сочетании с электрическим (изодромным) регулятором. Принципиальная схема регулирования температуры с ПИ-регулятором приведена на рис.4.1.

Электрический ПИ-регулятор работает совместно с электрическим автоматическим потенциометром (например КСП-3), имеющим реостатный датчик. Датчик САР – обычно термопара. С реостатного датчика сигнал поступает в ПИ-регулятор. Он пропорционален величине отклонения температуры от задания. Регулятор формирует закон регулирования и управляет работой исполнительного механизма, который перемещает заслонку, изменяя подачу топлива в горелки. Схема предусматривает возможность ручного управления регулирующим органом с помощью универсального переключателя (УП) и кнопок управления (КУ).

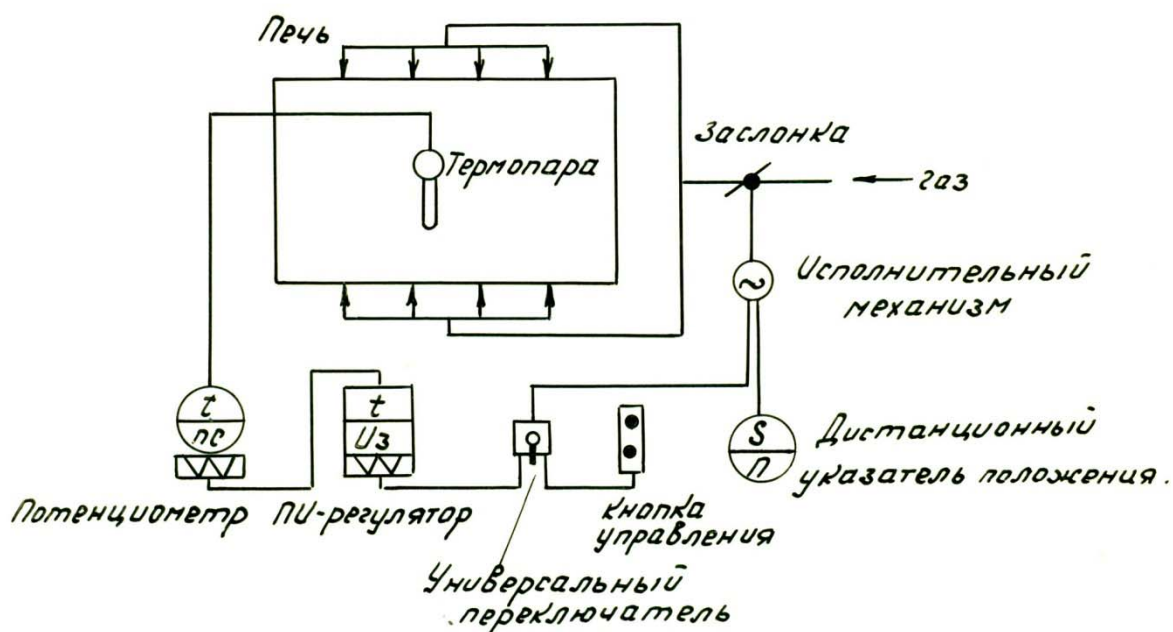


Рис.4.1. Схема автоматического регулирования температуры печи с автоматическим регулятором непрерывного действия.

На печах непрерывного действия с небольшими возмущениями применяют иногда релейные регуляторы, реализующие двухпозиционный закон регулирования. Заслонка на трубопроводе при этом занимает 2 фиксированных положения, которые соответствуют максимальной и минимальной подаче топлива. Заслонка при этом не должна полностью перекрывать подачу топлива, во избежание потухания горелок. Регулятором является электронный потенциометр с приставкой для позиционного регулирования. Двухпозиционное регулирование облегчается, если печь отапливается горелками инжекционного типа.

Если печь разбита на несколько тепловых зон, то для каждой зоны создают свою систему регулирования температуры. Каждая система имеет свой регулятор, но можно использовать и один многоканальный регулятор к которому периодически подключают регистрирующие устройства от разных зон.

### 4.3. Регулирование соотношения газ-воздух

Регулирование соотношения газ-воздух предусмотрено на печах с двухпроводными горелками, к которым подводят газ и воздух. Задача регулирования – поддержание постоянного коэффициента избытка воздуха.

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  поддерживается на необходимом постоянном уровне, обычно  $\alpha = 1.05 \dots 1.10$ , для обеспечения экономичного сжигания топлива. Иногда, в случае создания безокислительных печных атмосфер, топливо сжигают со значительным недостатком воздуха. Коэффици-

ент избытка воздуха поддерживается на уровне  $\alpha = 0,45 \dots 0,55$ . При этом образуется атмосфера предохраняющая от окисления и обезуглероживания. Изменяя коэффициент избытка воздуха, можно также, обеспечить более равномерный нагрев. Поскольку при изменении  $\alpha$  меняется температура и конфигурация факела горелочных устройств, регулированием  $\alpha$  можно устранить местный перегрев изделий.

При регулировании  $\alpha$  ведущим потоком является топливо. Регулятор соотношения оценивает расход топлива, сравнивает его с расходом воздуха и изменяет его так, чтобы поддерживать  $\alpha$  постоянным. Удовлетворительно качество регулирования обеспечивает интегральный закон регулирования, реже применяю ПИ-регуляторы. При использовании электрических регуляторов, схема регулирования имеет следующий вид (рис.4.2).

Расход газа и воздуха определяют расходомерами переменного перепада давления, который включает сужающее устройство, бесшкальный дифференциальный манометр и вторичный прибор. Сигнал с него поступает в регулятор соотношения, который управляет работой исполнительного механизма и перемещает заслонку на воздухопроводе. Предусмотрено также ручное управление заслонкой с помощью универсального переключателя (УП) и кнопок управления (КУ).

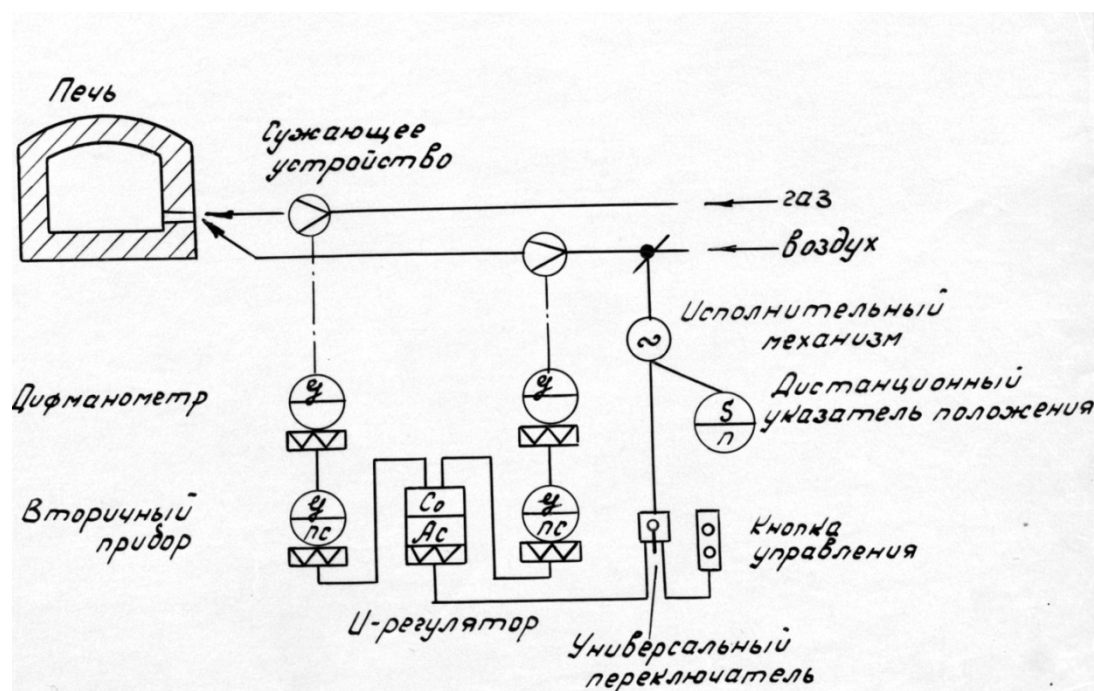


Рис 4.2. Принципиальная схема регулирования соотношения газ-воздух с электрическим регулятором с интегральным законом регулирования.

Такие системы устанавливают преимущественно на печах периодического действия. На печах непрерывного действия, с небольшими колебаниями расхода газа и воздуха, используют механическое сочленение регулирующих органов, т.е. заслонки соединяют с помощью жесткой тяги (рис.4.3).



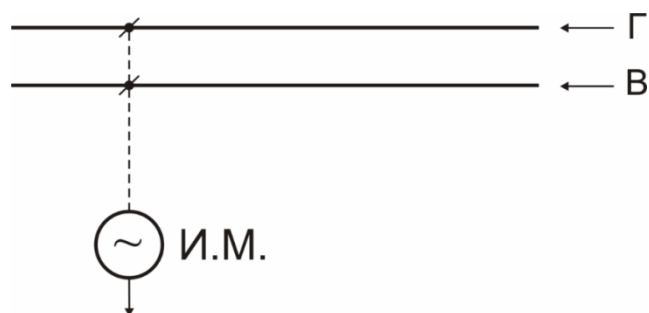


Рис. 4.3. Механическое сочленение заслонок подачи газа и воздуха на методических печах.

При этом, когда исполнительный механизм регулятора температуры открывает заслонку подачи газа, одновременно открывается заслонка подачи воздуха, увеличивая его подачу. Механическое сочленение заслонок подачи газа и воздуха удобно при двухпозиционном регулировании температуры на печах непрерывного действия.

Если печь разбита на несколько тепловых зон, то для каждой зоны проектируется собственная система автоматического регулирования соотношения газ-воздух.

Точное регулирование соотношения газ-воздух можно осуществить на основе контроля состава продуктов сгорания топлива. Величина  $\alpha$  определяет содержание в продуктах сгорания  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ . При полном сгорании достаточно следить за соотношением  $O_2$  и  $CO_2$ . Для этого используют автоматические газоанализаторы. Содержание этих газов сравнивают с заданными и вводят соответствующий сигнал в регулятор соотношения. Но следует отметить, что такие системы эффективны, но дороги.

#### **4.4. Система автоматического регулирования (САР) давления в рабочем пространстве печи**

Уровень давления в рабочем пространстве влияет на качество нагрева металла и экономичность работы пламенных печей. Избыток давления вызывает прорыв (выбивание) продуктов сгорания через несплошности в кладке печи в окружающую среду, возникают дополнительные тепловые потери, вызывающие дополнительный расход топлива, ускоряет износ конструкций печи, затрудняет её обслуживание.

Разряжение в рабочем пространстве, наоборот, вызывает подсос холодного воздуха, подстуживая нагреваемый металл. При этом возрастает расход топлива на нагрев холодного воздуха. Поэтому наиболее рациональным является поддержание на уровне пода печи нулевого избыточного давления. Тогда под сводом будет небольшое избыточное давление (4...100 мм вод.ст.).

Давление в печи регулируют перемещением шибер, установленного в дымовом канале, по которому отводят продукты сгорания.

Оптимальное место отбора давления для печей непрерывного действия находится под сводом печи. В печах периодического действия. Для которых характерны значительные изменения объёмов продуктов сгорания, давление колеблется в широких пределах. При нулевом давлении на уровне пода печи, избыточное давление под сводом может значительно изменяться. Поэтому в печах периодического действия отбор давления целесообразно производить на уровне пода.

Инерционность печи при регулировании давления мала. Даже в крупных печах давление во всех точках рабочего пространства при наличии возмущений выравнивается очень быстро. Поэтому печи не делят на зоны и предусматривают одну систему автоматического регулирования давления на печь.

Для регулирования применяют интегральные регуляторы с И-законом регулирования. При использовании электрических регуляторов система автоматического регулирования давления в рабочем пространстве печи имеет вид, представленный на рис. 4.4.

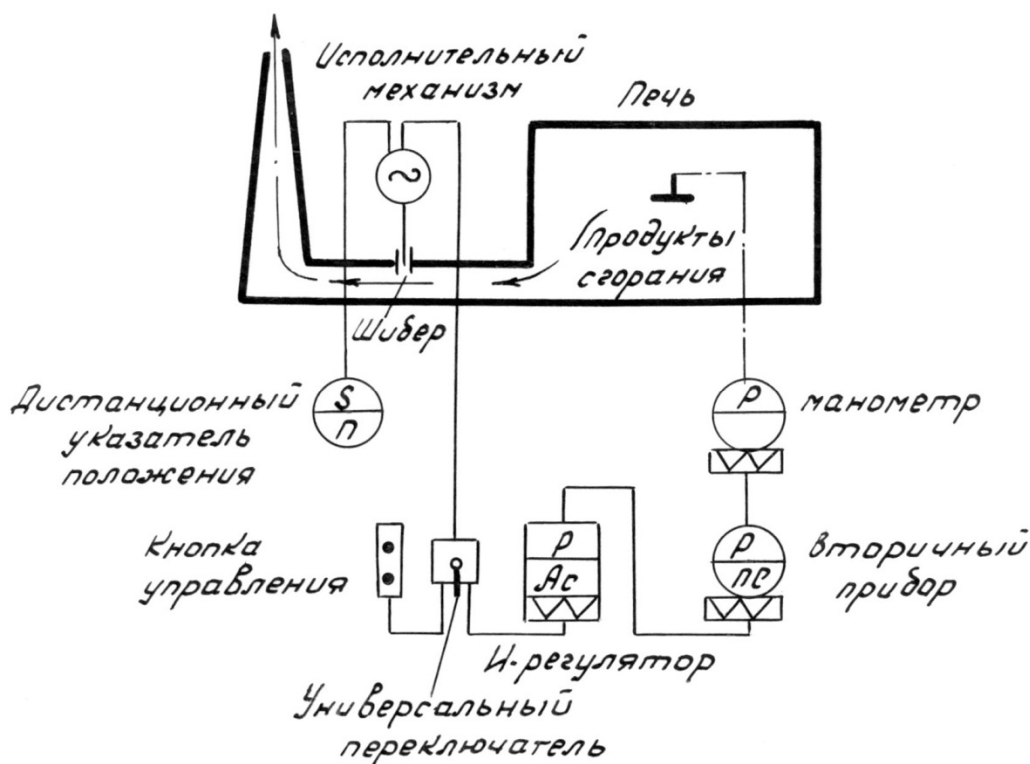


Рис. 4.4. Схема автоматического регулирования давления в печи

Давление измеряется бесшкальным манометром, работающим в паре со вторичным прибором. Сигнал со вторичного прибора поступает в регулятор, который управляет работой исполнительного механизма (ИМ). Шибер имеет

большие габариты и массу, поэтому исполнительный механизм должен обладать достаточной мощностью. Схема предусматривает также ручное управление шибером.

#### 4.5 Система автоматического регулирования (САР) давления газа и воздуха в трубопроводах

Стабилизация давления газа и воздуха в подводящих трубопроводах облегчает работу САР температуры и САР соотношения газ-воздух. Жестких требований к качеству регулирования не предъявляется. Система автоматического регулирования (САР) давления газа и воздуха в трубопроводах может быть одна на цех или группу печей, хотя наиболее оптимальным считается установка системы для каждой печи. Для регулирования давления можно использовать регуляторы прямого действия, но применяют электрические регуляторы с интегральным законом регулирования. Схема САР аналогична предыдущей (рис.4.5). В неё входят бесшкальный манометр, вторичный прибор, интегральный регулятор и исполнительный механизм (заслонка).

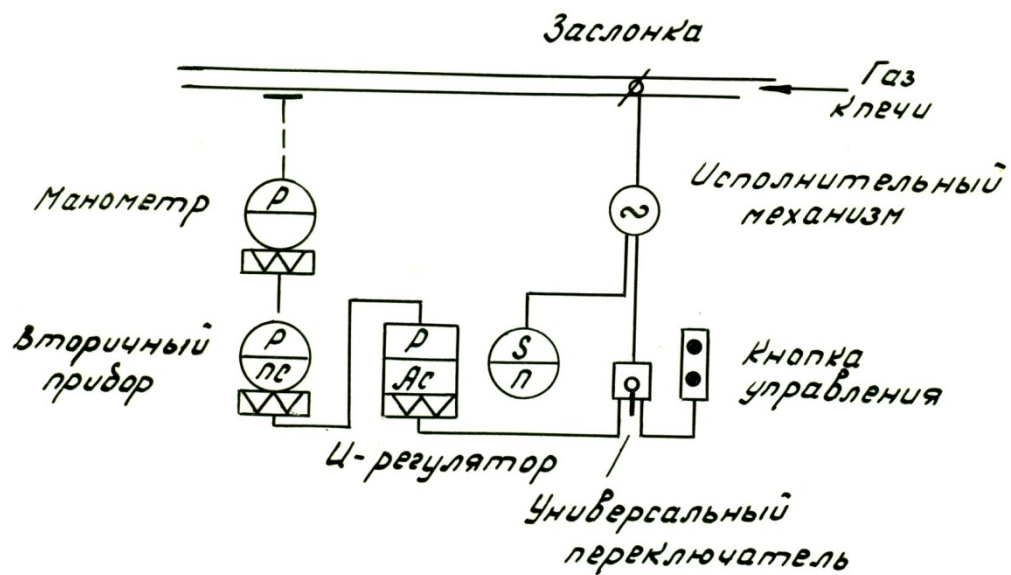


Рис.4.5. Схема автоматического регулирования давления газа в трубопроводе

Отбор давления всегда производится за заслонкой, регулирующей давление в трубопроводе.

#### 4.6. Система аварийной сигнализации падения давления

## газа и воздуха.

При падении давления газа или воздуха может произойти погасание горелок, рабочее пространство заполнится газом и произойдет образование взрывоопасной смеси. Для исключения таких ситуаций предусмотрена система аварийного отключения подачи газа с помощью сигнализатора падения давления (СПДМ), приведенного на рис.4.6.

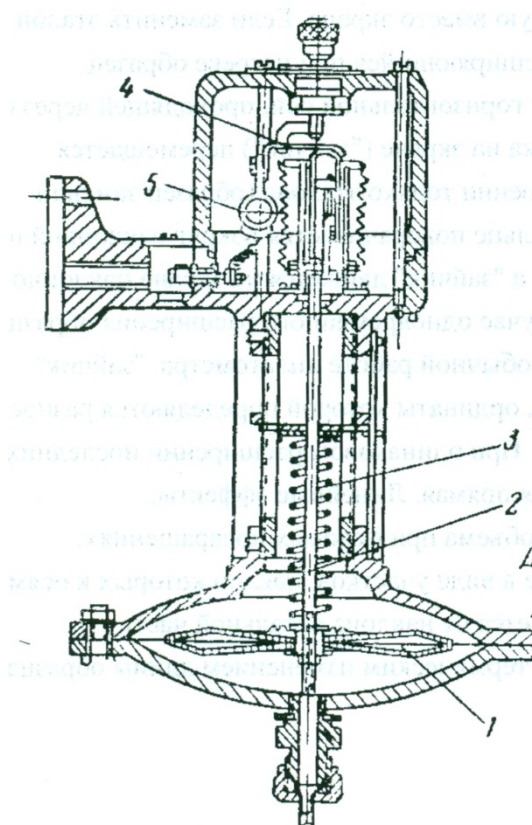


Рис.4.6. Сигнализатор падения давления мембранный типа СПДМ. 1 – мембрана; 2 – шток; 3 – пружина задатчика; 5 - выключатель; 4 - задатчик.

Система включает два сигнализатора падения давления на газовом и воздушном трубопроводах. Срабатывание любого из них приводит к перекрытию подачи газа электромагнитным клапаном и включение сигнальных ламп и сирены, которую может отключить оператор с помощью кнопки управления. Схема автоматического отключения подачи газа к горелкам печи при падении давления газа или воздуха приведена на рис.4.7.

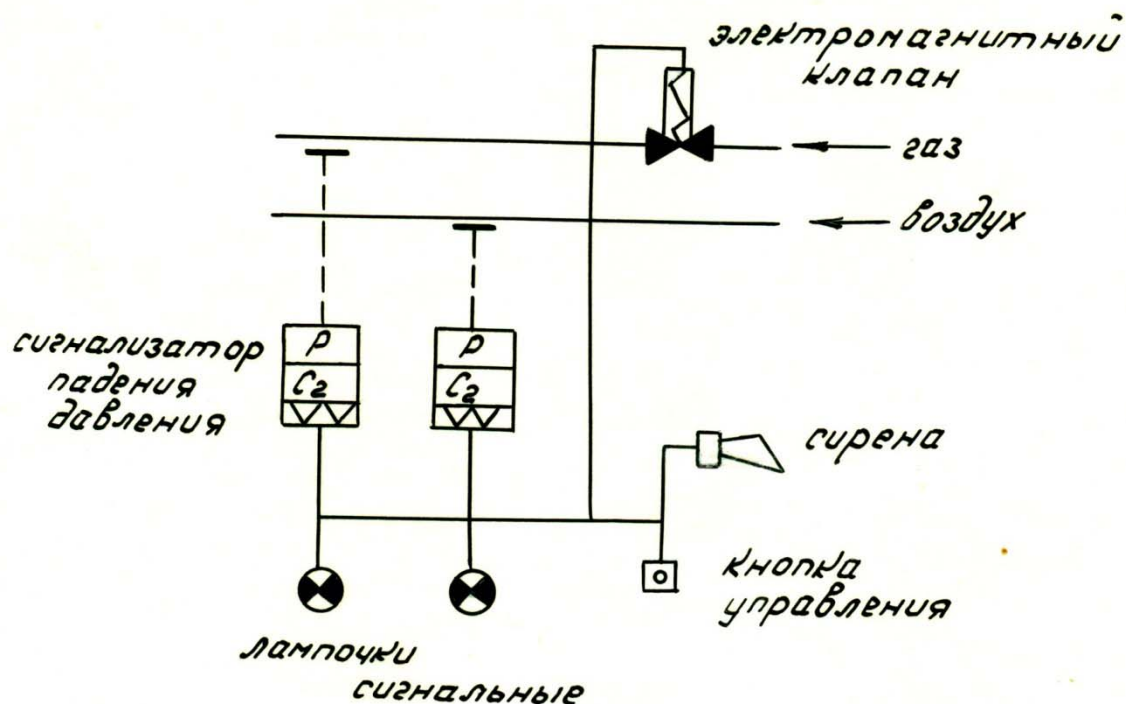


Рис.4.7. Схема автоматической отсечки подачи газа к печи при падении давления газа или воздуха.

#### 4.7. Система контроля параметров печи

Кроме САР предусматриваются дополнительные системы контроля.

Для больших печей, размеры тепловых зон которых велики, для контроля температуры в пределах одной тепловой зоны, устанавливают дополнительные термопары. Эти термопары подключаются к многоточечному регистрирующему прибору или устанавливаются дополнительные приборы контроля на щите управления. Кроме того контролируют давление газа и воздуха перед горелками, контролируют расход газа и воздуха подводимых к печи.

Используемые в настоящее время схемы автоматического регулирования и контроля параметров теплового режима термических и нагревательных печей значительно упрощены по сравнению с предлагаемыми схемами автоматического выбора и управления тепловой нагрузкой печи, а также регулирования процесса горения и качества продукции. Это связано с тем, что промышленная печь представляет объект, который трудно поддается авторегулированию, что, в свою очередь, связано со спецификой технологии нагрева и термической обработки металла. Поэтому используемые схемы можно отнести к схемам частичного автоматического регулирования тепловых про-

цессов, сопутствующих нагреву. В этих схемах практически отсутствуют элементы управления тепловой мощностью. автоматическое управление качеством нагреваемого металла. Кроме того, регулирование процессом горения топлива не отвечает наиболее экономичному режиму его сжигания.

Однако отсюда не следует, что существующие схемы автоматического регулирования и контроля параметров теплового режима печи недостаточно эффективны. Несмотря на ряд указанных недостатков, они облегчают и улучшают весьма сложный процесс управления промышленными термическими печами.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

П.1.1. Плотность  $\gamma$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda$   
некоторых металлов и сплавов [8, 9, 16]

Металл или сплав	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup> при 20°C	$\lambda$ , Вт/(м·К), при температуре, °C					
		20	200	400	600	800	1000
Железо	7880	72	65	53	41	30	28
Сталь 08 кп	7850	66	56	45	37	29	27
У10	7830	46	44	37	31	24	26
Низколегированные стали							
50Г, 40Х, 40ХС	7830	49	45	40	34	27	24
ШХ15, 9ХС	7800	43	40	35	30	27	—
30ХГС, 20ХН3А	7840	40	36	33	29	27	—
30ХН3М	7830	38	36	36	32	27	28
Высоколегированные стали							
Р18, Р6М5	8690	24	27	28	27	26	28
3Х13, 3Х2В8	8200	25	27	27	26	25	27
Х18Н9	7920	16	17	20	24	27	28
Цветные металлы и сплавы							
Алюминий	2700	210	220	249	—	—	—
Дуралюминий	2750	160	194	260	—	—	—
Медь	8940	390	378	365	354	333	—
Титан	4540	15,2	16,3	17,51	—	—	—

П.1.2. Средняя теплоемкость некоторых металлов, сталей и сплавов в интервале температур от 0 до  $t$ , °С, кДж/(кг·К) [9, 13, 16]

Металл или сплав	Температура, °С								
	100	200	300	400	600	700	800	900	1000
Углеродистые стали	0,486	0,507	0,503	0,540	0,590	0,620	0,695	0,695	0,691
Низколегированные стали	0,486	0,502	0,519	0,536	0,586	0,645	0,695	0,687	0,674
Жаростойкие и жаропрочные стали:									
хромистые	0,469	0,486	0,507	0,532	0,599	0,636	0,682	—	—
хромоникелевые	0,502	0,511	0,523	0,536	0,553	0,561	0,569	0,574	0,582
Алюминий	0,913	0,938	0,955	0,979	1,022	—	—	—	—
Медь	0,394	0,398	0,402	0,406	0,414	0,419	0,423	0,428	0,435

П.1.3. Степень черноты  $\varepsilon$  для различных материалов [8, 13]

Наименование	Температура, °С	$\varepsilon$
Алюминий полированный	225...575	0,039...0,057
Алюминий шероховатый	20	0,055
Алюминий, окисленный при 600°С	200...600	0,11...0,19
Асбест в виде картона и бумаги	20...470	0,93...0,96
Бронза полированная	50	0,24...0,31
Бумага, наклеенная на металл	20	0,92
Вода	0...100	0,95...0,963
Вольфрам	100	0,039
	700	0,070
	1300	0,195
	1900	0,263
	3100	0,345
Гипс	20	0,903
Графит искусственный	1000...2800	0,77...0,83



Продолжение приложения П.1.3

Наименование	Температура, °С	$\varepsilon$
Железо полированное	425...1020	0,144...0,377
Железо литое необработанное	900...1100	0,87...0,95
Железо окисленное	125...525	0,78...0,82
Железо горячекатаное	130	0,6
Золото	100...800	0,029...0,06
Кварц плавный шероховатый	20	0,932
Кирпич динасовый	100	0,80
	1100	0,85
Кирпич красный	20	0,93
Кирпич шамотный шероховатый	20	0,80...0,90
Кирпич глазурованный	1100	0,75
Краски алюминиевые	100	0,27...0,67
Краски масляные различных цветов	100	0,92...0,96
Лак алюминиевый по шероховатой поверхности	20	0,39
Лак белый эмалевый по шероховатой поверхности	20	0,906
Лак чёрный блестящий, распыленный на гладкой стальной поверхности	20	0,875
Лак чёрный матовый	40...95	0,96...0,98
Латунный прокат необработанный	20	0,06
Латунный прокат грубообработанный	20	0,2
Латунь с тусклой поверхностью	50...350	0,22
Латунь, окисленная при 600°С	20...600	0,6
Медь электролитическая полированная	20...800	0,025...0,061
Медный прокат с блестящей поверхностью	20	0,072
Медь, окисленная при 600°С	20...600	0,57...0,87
Медь расплавленная	1085...1275	0,16...0,13

Наименование	Температура, °С	$\varepsilon$
Молибден	800	0,105
	1800	0,225
	2500	0,282
Мрамор серый полированный	20	0,93
Никель с чистой поверхностью	225...1200	0,088...0,196
Никель, окисленный при 600°С	200...600	0,37...0,48
Нихром	125...1035	0,64...0,76
Нихромовая проволока окисленная	50...500	0,95...0,98
Оксид алюминия	1200...1700	0,23...0,40
Оксид бериллия белая	1310...1650	0,22...0,23
Оксид бериллия чёрная	1310...1650	0,82...0,89
Оксид кальция	800...1300	0,27
Оксид магния	1000...1200	0,16...0,17
Оксид меди	800...1100	0,66...0,54
Оксид никеля	650...1255	0,59...0,86
Оксид тория	1000...1700	0,26...0,55
Оксид цинка	1000...1200	0,48...0,65
Оксид хрома	800...1300	0,73...0,97
Олово и лужёная поверхность блестящая	20	0,043...0,064
Платина полированная	225...625	0,054...0,104
Платиновая проволока	500...1400	0,1...0,18
Рений	700	0,164
	1300	0,225
Родий	700	0,084
	1600	0,15
	1900	0,183
Ртуть чистая	0...100	0,09...0,12
Сажа	20...370	0,94...0,96
Свинец с окисленной поверхностью	20	0,281
Свинец, окисленный при 200°С	200	0,63
Серебро чистое полированное	20...800	0,019...0,046

Наименование	Температура, °С	$\varepsilon$
Сталь листовая шлифованная	940...1100	0,55...0,61
Сталь, окисленная при 600°C	200...600	0,8
Сталь оцинкованная блестящая	20	0,23
Сталь оцинкованная окисленная	20	0,28
Сталь полированная	740...1040	0,52...0,56
Стекло гладкое	20	0,937
Тантал	700	0,132
	2500	0,267
	3000	0,316
Титан	600	0,217
	1200	0,286
Титан, окисленный при 500°C	500...1000	0,5...0,6
Толь	20	0,91
Уголь очищенный (0,9% золы)	125...625	0,81...0,79
Уголь в виде нити	1045...1405	0,526
Фарфор глазурованный	20	0,924
Хром	100...1100	0,08...0,26
Цинк технический полированный	225...325	0,045...0,053
Цинк, окисленный при 400°C	400	0,11
Цирконий	800	0,204
	1400	0,255
	1800	0,278
Чугун, окисленный при 600°C	200...600	0,64...0,70
Чугун расплавленный	1540	0,29
Чугун с обработанной поверхностью	830...990	0,6...0,7
Шеллак на лужёной поверхности	20	0,821
Штукатурка известковая шероховатая	10...90	0,91
Эмаль, припавленная к металлу	20	0,897

П.2.1. Основные теплофизические характеристики  
огнеупорных и теплоизоляционных материалов [7, 9, 14, 16, 27]

Наименование и марка материала	$\gamma_K$ , кг/м <sup>3</sup>	$t_{\text{МАКС}}$ , °С	$\lambda$ , Вт/м·К	$c_p$ , Дж/кг·К
Огнеупорные материалы				
Шамот класса А (ША)	2160	1450	$0,980+0,278 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Шамот класса Б (ШБ)	1850	1400	$0,923+0,438 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Шамот-легковес ШЛ-1,3	1300	1400	$0,442+0,535 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Шамот-легковес ШЛ-1,0	1000	1300	$0,520+0,349 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Шамот-легковес ШЛ-0,9	900	1270	$0,400+0,383 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Шамот-легковес ШЛ-0,4	400	1150	$0,100+0,286 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Шамотно-тальковый легковес ШЛ-0,6	600	1200	$0,250+0,267 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$879+0,41 \cdot t$
Хромомагнезитовый кирпич ХМ	2800	1500	$2,600-0,750 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$447+0,61 \cdot t$
Муллитовый кирпич МЛЮ, МЛУ	2300	1500	$2,310-2,320 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$768+0,25 \cdot t$
Корунд К (алунд)	3600	1850	$12,20-0,860 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$630+0,42 \cdot t$
Корундовый легковес КЛ-1,3	1300	1500	$0,710-0,118 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$630+0,42 \cdot t$
Муллитокорундовый кирпич МКО, МКП	2400	1550	$1,570-0,200 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$768+0,25 \cdot t$
Муллитовый легковес МЛЛ-1,3	1300	1500	$0,550-0,100 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$768+0,25 \cdot t$
Муллитокремнеземистый легковес МКРЛ-0,8	800	1300	$0,494-0,145 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$768+0,25 \cdot t$
Муллитокремнеземистый легковес МКРЛ-0,5	500	1300	$0,214+0,145 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$768+0,25 \cdot t$
Карборунд КА	2500	1450	$23,75-10,45 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$963+0,15 \cdot t$

Наименование и марка материала	$\gamma_K$ , кг/м <sup>3</sup>	$t_{\text{МАКС}}$ , °С	$\lambda$ , Вт/м·К	$c_p$ , Дж/кг·К
Теплоизоляционные материалы				
Диатомит обожженный в порошке (засыпке)	650	800	$0,110+0,232 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$900+0,02 \cdot t$
Кирпич диатомитовый Д-500	500	900	$0,105+0,233 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$900+0,02 \cdot t$
Кирпич диатомитовый Д-600	600	900	$0,132+0,233 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$900+0,02 \cdot t$
Кирпич диатомитовый Д-700	700	900	$0,159+0,233 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$900+0,02 \cdot t$
Кирпич пенодиатомитовый ПД-400	400	900	$0,077+0,314 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$900+0,02 \cdot t$
Перлит вспученный в порошке	200	900	$0,060+0,186 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$880+0,05 \cdot t$
Асбест листовой	1200	500	$0,157+0,221 \cdot 10^{-3} \cdot t$	835
Асбест распушенный А и АС	900	500	$0,163+0,174 \cdot 10^{-3} \cdot t$	835
Минеральная (шлаковая) вата марки 150	150	750	$0,059+0,186 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$932+0,19 \cdot t$
Минеральная (шлаковая) вата марки 200	200	750	$0,060+0,198 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$932+0,19 \cdot t$
Минеральная (шлаковая) вата марки 250	250	750	$0,060+0,198 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$932+0,19 \cdot t$
Вата каолиновая ВГВ-80	80	1100	$0,058+0,186 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$941+0,25 \cdot t$
Вата каолиновая ВГВ-200	200	1100	$0,058+0,186 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$941+0,25 \cdot t$
Рулонный каолиновый материал ВГР-150	150	1100	$0,058+0,186 \cdot 10^{-3} \cdot t$	$941+0,25 \cdot t$
Керамоперлитные изделия КП-350	350	900	$0,087+0,186 \cdot 10^{-3} \cdot t$	920
Войлок углеграфитовый ВВПН-250	250	2000	0,2 (в вакууме)	835

Примечание:  $\gamma$  — кажущаяся плотность;  $t_{\text{МАКС}}$  — предельная температура применения;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $c_p$  — удельная теплоемкость;  $T$  — средняя температура слоя материала футеровки.

П.2.2. Средняя теплоемкость простых газов, кДж/(м<sup>3</sup>·К) [10]

T, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
0	1,3059	1,2987	1,2766	1,2992	1,5998	1,4943
100	1,3126	1,3004	1,2908	1,3017	1,7003	1,5052
200	1,3352	1,3038	1,2971	1,3071	1,7873	1,5223
300	1,3561	1,3109	1,2992	1,3167	1,8627	1,5424
400	1,3775	1,3205	1,3021	1,3289	1,9297	1,5645
500	1,3980	1,3322	1,3050	1,3427	1,9887	1,5897
600	1,4168	1,3452	1,3080	1,3574	2,0411	1,6148
700	1,4345	1,3586	1,3121	1,3720	2,0884	1,6412
800	1,4499	1,3717	1,3168	1,3862	2,1311	1,6680
900	1,4645	1,3846	1,3226	1,3996	2,1692	1,6956
1000	1,4775	1,3971	1,3289	1,4126	2,2035	1,7229
1100	1,4892	1,4089	1,3360	1,4248	2,2349	1,7501
1200	1,5006	1,4202	1,3431	1,4361	2,2639	1,7769
1300	1,5106	1,4306	1,3511	1,4465	2,2898	1,8028
1400	1,5202	1,4407	1,3590	1,4566	2,3136	1,8280
1500	1,5294	1,4499	1,3674	1,4658	2,3354	1,8527

### П.2.3. Физические свойства воздуха [10, 14, 15]

$T, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(м}^3\cdot\text{К)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$a, 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$	$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,2930	1,2971	0,0243	0,188	13,23	0,705
100	0,9458	1,3004	0,0319	0,337	23,15	0,694
200	0,7457	1,3071	0,0387	0,514	34,85	0,689
300	0,6157	1,3172	0,0448	0,715	48,24	0,692
400	0,5242	1,3289	0,0505	0,930	62,95	0,697
500	0,4564	1,3427	0,0562	1,155	79,32	0,703
600	0,4041	1,3565	0,0615	1,384	96,75	0,708
700	0,3625	1,3708	0,0666	1,635	115,0	0,710
800	0,3287	1,3842	0,0720	1,885	135,5	0,714
900	0,3010	1,3976	0,0761	2,163	154,8	0,717
1000	0,2773	1,4098	0,0804	2,461	176,7	0,721
1100	0,2571	1,4215	0,0848	2,762	199,1	0,722
1200	0,2377	1,4328	0,0916	3,165	224,6	0,724
1300	0,2258	1,4453	0,0961	3,415	248,1	0,726
1400	0,2110	1,4529	0,0100	3,780	275,0	0,727

Примечание:  $\gamma$  — плотность;  $c_p$  — средняя теплоемкость;  $\lambda$  — теплопроводность;  $a$  — температуропроводность;  $\nu$  — кинематическая вязкость; Pr — число Прандтля.

#### П.2.4. Физические свойства продуктов сгорания [10, 14, 15]

$T, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$a, 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$	$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,295	1,359	0,0228	0,169	12,20	0,72
100	0,950	1,370	0,0313	0,308	21,54	0,69
200	0,748	1,381	0,0401	0,489	32,80	0,67
300	0,617	1,397	0,0484	0,698	45,41	0,65
400	0,525	1,415	0,0570	0,941	60,38	0,64
500	0,457	1,431	0,0656	1,213	76,30	0,63
600	0,405	1,448	0,0742	1,510	93,61	0,62
700	0,363	1,460	0,0827	1,843	112,1	0,61
800	0,329	1,472	0,0915	2,200	131,8	0,60
900	0,301	1,485	0,100	2,581	152,5	0,59
1000	0,275	1,498	0,109	3,014	174,3	0,58
1100	0,257	1,511	0,118	3,460	197,1	0,57
1200	0,240	1,523	0,126	3,918	221,0	0,56
1300	0,225	1,535	0,135	4,450	24,1	0,55
1400	0,212	1,548	0,144	5,010	270,5	0,54



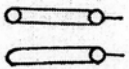



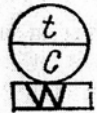


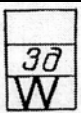
Примечание:  $\gamma$  — плотность;  $c_p$  — средняя теплоемкость;  $\lambda$  — теплопроводность;  $a$  — температуропроводность;  $\nu$  — кинематическая вязкость; Pr — число Прандтля.



### П.2.5. Тепловые эффекты реакций горения газов $Q_{\text{ГОР}}$ [10]

Реакции	Молекулярная масса компонентов реакции	$Q_{\text{ГОР}}$ , МДж		
		исходного газа		продуктов сгорания
		на 1 кг	на 1 м <sup>3</sup>	на 1 м <sup>3</sup>
$\text{CO} + 0,5\text{O}_2 = \text{CO}_2$	28+16=44	10,10	12,63	12,63
$\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$	2+16=18	119,1	10,79	10,79
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 =$ $=\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	16+64= =44+36	50,06	35,83	11,95
$\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5\text{O}_2 =$ $= 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	30+112= =88+64	47,53	63,79	12,76
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 =$ $= 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	44+160= =132+72	46,40	91,28	13,05
$\text{C}_4\text{H}_{10} + 6,5\text{O}_2 =$ $= 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	58+208= =176+90	45,77	118,67	13,19
$\text{C}_5\text{H}_{12} + 8\text{O}_2 =$ $= 5\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	72+256= =220+108	45,40	146,19	13,29
$\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{O}_2 =$ $= 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	28+96= =88+36	47,28	59,06	14,76
$\text{C}_3\text{H}_6 + 4,5\text{O}_2 =$ $= 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	42+144= =132+54	45,82	86,01	14,34
$\text{H}_2\text{S} + 1,5\text{O}_2 =$ $= \text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	34+48= =64+18	15,23	23,17	11,59

П.3. Условные графические обозначения измерительных преобразователей и приборов для измерения и регулирования параметров термических печей

№ п.п.	Условные обозначения элемента схемы	Наименование элемента схемы	Тип прибора или регулятора
1		Отборное устройство давления, уровня, состава	Импульсная трубка
2		Сужающее устройство для измерения расхода	Измерительная диафрагма, например ДДН
3		Отбор импульса по температуре	Термопары градуировок ПП, ХА, ХК и др.
4		Исполнительный механизм электрический	БИМ, МЭК (МЭО) и др.
5		Вторичный прибор с встроенным ферродинамическим датчиком или без него	ДФСМ и др.
6		Вторичный прибор с встроенным ферродинамическим датчиком или без него	ВФСМ и др.
7		Вторичный прибор с встроенным ферродинамическим датчиком или без него	ВФСМ и др.
8		Дифманометр-тягианопоро-метр с встроенным ферродинамическим датчиком или без него	ДКОФМ и др.
9		Дифманометр-тягианопоро-метр с встроенным ферродинамическим датчиком или без него	ДКОФМ и др.
10		Задатчик электрический дистанционный с встроенным ферродинамическим датчиком или без него	ДЗФМ и др.

Продолжение приложения П.3

№ п.п.	Условные обозначения элемента схемы	Наименование элемента схемы	Тип прибора или регулятора
11		Задатчик соотношения электрический с встроенным ферродинамическим датчиком или без него	БРМ и др.
12		Вторичный прибор с встроенным ферродинамическим датчиком или без него	ДФСМ и др.
13		Потенциометр показывающий с задатчиком	КСП2, КСП3, КСП4
14		Потенциометр показывающий без задатчика	КСП2, КСП3, КСП4
15		Потенциометр показывающий с задатчиком	КСП2, КСП3, КСП4
16		Сигнализатор падения давления	СПДМ
16		Указатель положения	УП, ДУП и др.
17	-----	Механическая передача	
18	—————	Электрическая передача	
19		Электрический звонок	Звонок громкого боя
20		Кнопки управления	КУ
21		Универсальный переключатель	УП
22		Сигнальная лампа	ЛС

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эйсмонтт, Ю.Г., Термическое оборудование и его расчет. — В 4-х кн. — Кн. 1. Оборудование для нагрева: учебное пособие / Ю.Г. Эйсмонтт, Ю.Д.Корягин — Челябинск: Изд. ЧГТУ, 1996. — 141 с.
2. Электротермическое оборудование: справочник / под ред. Альтгаузена А.П. — М.: Энергия, 1980. — 416 с.
3. Тимошпольский, В.И. Печи и сушила машиностроительного и металлургического производства / В.И. Тимошпольский, А.П. Несенчук, И.Н.Трусова и др. — М.: Теплотехника, 2008. — 240 с.
4. Соколов, К.Н. Оборудование термических цехов: учебное пособие/ К.Н. Соколов — Киев–Донецк: Вища школа, 1984. — 328 с.
5. Рустем, С.Л. Оборудование и проектирование термических цехов: учебник/ С.Л.Рустем — М.: Машгиз, 1962. — 568 с.
6. Вишняков, Д.Я. Ростовцев Г.Н., Неуструев А.А. Оборудование механизация и автоматизация в термических цехах: учебное пособие/ Д.Я. Вишняков, Г.Н.Ростовцев, А.А. Неуструев — М.: Металлургия, 1964. — 467 с.
7. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей. Т. 2.: Мастрюков Б.С. Расчеты металлургических печей: учебник. — М.: Металлургия, 1986. — 272 с.
8. Казанцев, Е.И. Промышленные печи: справочное руководство для расчетов и проектирования/ Е.И. Казанцев. — М.: Металлургия, 1975. — 368 с.
9. Сатановский, Л.Г. Нагревательные и термические печи в машиностроении/ Л.Г. Сатановский, Ю.А. Мирский. — М.: Металлургия, 1971. — 383 с.
10. Общепромышленные электрические печи непрерывного действия/ Арендарчук А.В., Катель Н.М., Липов В.Я. и др. — М.: Энергия, 1977. — 247 с.
11. Смольников, Е.А. Термическая обработка инструментов в соляных ваннах/ Е.А.Смольников. — М.: Машиностроение, 1981. — 271 с.
12. Кацевич, Л.С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей: учебник для техникумов/ Л.С. Кацевич. — М.: Энергия, 1977. — 304 с.
13. Материалы для электротермических установок. справочное пособие / Большакова Н.В., Борисанова К.С., Бурцев В.И. и др./ под. ред. М.Б.Гутмана. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 296 с.
14. Расчет нагревательных и термических печей. справочное издание/ Василькова С.Б., Генкина М.М., Гусовский В.Л. и др. / под ред. Тымчака В.М. и Гусовского В.Л. — М.: Металлургия, 1983. — 480 с.
15. Теплотехнические расчеты металлургических печей./ под ред. А.С. Телегина. — М.: Металлургия, 1970. — 528 с.

16. Расчет и конструирование нагревателей электрических печей сопротивления. /И.А. Фельдман, М.Б. Гутман, Г.К. Рубин и др./ М.–Л.: Энергия, 1966. — 104 с.
17. Корягин, Ю.Д., Термическое оборудование и его расчет. — В 4-х кн. — Кн. 4. Расчёты термического оборудования: учебное пособие/ Ю.Д. Корягин, Ю.Г. Эйсмонт — Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1998. — 161 с.
18. Корягин, Ю.Д. Тепловые и электрические расчеты термических печей: учебное пособие, 2-е. изд./Ю.Д. Корягин. — Челябинск: ЮУрГУ, 2005. 179 с.
19. Мастрюков, Б.С. Теплотехнические расчёты промышленных печей./ Б.С. Мастрюков. — М.: Металлургия, 1972. — 368 с.
20. Гусовский, В.Л., Газогорелочные устройства и системы отопления нагревательных и термических печей./В.Л. Гусовский, А.Е. Лифшиц, В.М. Тымчак. — М.: Металлургия, 1967. — 264 с.
21. Ильин, С.И., Автоматическое регулирование термических печей: учебное пособие./ С.И. Ильин, С.Е. Карзунов, М.А. Смирнов. — Челябинск: ЧГТУ, 1990. — 53 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	4
1. РАСЧЕТЫ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ .....	6
1.1. Теоретические основы нагрева металла в печах.....	6
1.1.1. Особенности расчета суммарного коэффициента теплоотдачи в электрических и топливных печах .....	9
1.1.2. Особенности определения коэффициента теплопроводности немонолитных загрузок .....	16
1.2. Расчет нагрева изделий в печах с постоянной температурой	
1.2.1. Расчет времени нагрева теплотехнически «тонких» изделий .....	20
1.2.2. Расчет времени нагрева и охлаждения теплотехнически «массивных» изделий в среде с постоянной температурой .....	24
1.2.3. Расчет времени выдержки для выравнивания температуры .....	29
1.3. Определение времени нагрева изделий в печах периодического действия	
1.3.1 Нагрев теплотехнически «тонких» изделий.....	31
1.3.2. Нагрев теплотехнически «массивных» изделий .....	34
1.3.3. Особенности расчета многозонных методических печей.....	36
1.4. Особенности нагрева изделий в конвекционных печах	
1.4.1. Нагрев длинномерных изделий в электрических конвекционных печах периодического действия .....	42
1.4.2. Нагрев изделий в методических печах с конвективным теплообменом .....	47
1.5 . Расчет нагрева изделий в печах с жидким теплоносителем	
1.5.1. Особенности теплообмена в печах-ваннах.....	50
1.5.2. Расчеты времени нагрева и охлаждения изделий в печах с жидким теплоносителем .....	53
1.5.3. Методы расчета времени нагрева стальных изделий и инструмента в печах-ваннах .....	56

1.6. Определение времени охлаждения загрузки при постоянной температуре охлаждающей среды .....	61
2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ .....	65
2.1. Основные статьи теплового баланса термических печей .....	65
2.2. Расход топлива и мощность печи .....	73
3. РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА	
3.1. Основы расчёта горения топлива .....	75
3.1.1. Определение расхода воздуха и обогащённого кислородом дутья .....	75
3.1.2. Определение количества и состава продуктов сгорания .....	77
3.1.3. Определение температуры горения .....	79
3.2. Расход топлива в пламенных печах и виды топливосжигающих устройств .....	80
4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЛАМЕННЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ .	85
4.1 Особенности термических печей как объектов автоматического регулирования .	85
4.2 Система автоматического регулирования (САР) температуры в рабочем пространстве печи .	86
4.3 Регулирование соотношения газ-воздух .....	87
4.4 Система автоматического регулирования (САР) давления в рабочем пространстве печи .....	89
4.5 Система автоматического регулирования (САР) давления газа и воздуха в трубопроводах .....	91
4.6 Система аварийной сигнализации падения давления газа и воздуха .....	92
4.7. Система контроля параметров печи .....	93
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	95
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	108