

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Владимирский государственный университет  
Кафедра литейных процессов и конструкционных материалов

# ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания к практическим занятиям

Составитель  
В.Н. ШАРШИН

Владимир 2005

УДК 621.745.3

ББК 34.61-1

Т34

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент

Владимирского государственного университета

*Ю.Д. Корогодов*

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Владимирского государственного университета

**Теплотехника:** метод. указания к практ. занятиям / В. Н. Шаршин;  
Т34 Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2005. – 40 с.

Составлены в соответствии с учебными планами специальности 110400 – литейное производство черных и цветных металлов. Содержат указания к двум практическим работам. Первая относится к разделу «Механика движения газов в печах», включает в себя три самостоятельных задания, объединенных одной темой, и рассчитана на 6 часов. Вторая посвящена расчету одного из важнейших теплотехнических процессов – процессу нагрева тел, относится к разделу «Теплопередача», включает в себя два задания и рассчитана на 4 часа.

Основная цель методических указаний – приобретение практических навыков расчета важнейших теплотехнических процессов, протекающих в печах при производстве отливок из черных и цветных сплавов.

Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения по специальностям 110400 и 120300 – машины и технология литейного производства.

Ил. 8. Библиогр.: 8 назв.

УДК 621.745.3

ББК 34.61-1

## **Введение**

*Практические занятия по дисциплине «Теплотехника» вместе с циклом лекций и лабораторными работами являются непременной составной частью одноименного курса и предназначены для самостоятельной работы студентов. Предлагаемые методические указания разработаны на основе реальных методик расчета теплотехнических устройств, применяемых в настоящее время в практике печного проектирования при разработке конструкций топливных и электрических печей с незначительными упрощениями. Первая работа посвящена расчету одного из важнейших элементов любой топливной печи – дымового тракта. При выполнении этой работы студенты используют знания, полученные при изучении первого раздела курса – «Механика движения газов в печах». Вторая работа знакомит студентов с особенностями расчета времени нагрева теплотехнически тонких и массивных тел в электрических печах, который также может быть использован при расчете времени нагрева и в топливных печах. Определение времени нагрева тел является главным этапом проектирования, поскольку от времени нагрева зависят показатели эффективности работы печи: мощность, производительность, коэффициент полезного действия, коэффициент теплоиспользования и т.п. При ее выполнении студентам потребуются знания, полученные при изучении второго раздела курса – «Теплопередача».*

*Таким образом, целью методических указаний является не только более глубокое изучение основ курса «Теплотехника», но и приобретение практических навыков и умений выполнения реальных теплотехнических расчетов, самостоятельного решения сложных практических задач, без которых невозможна успешная деятельность инженера-литейщика.*

## Практическая работа № 1

### РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ВЫВОДА ГАЗОВ ИЗ МЕТОДИЧЕСКОЙ ТОПЛИВНОЙ ПЕЧИ

Система вывода газов любой топливной печи, которую называют дымовым трактом, в общем виде включает в себя систему каналов для отвода газов с рекуператором и шибером, а также дымовую трубу, которая дополнительно может быть оснащена эжектором для интенсификации потока. В данной работе студентам предлагается выполнить три задания:

- рассчитать дымовой тракт;
- определить высоту дымовой трубы;
- рассчитать основные размеры эжектора, КПД и скорость движения эжектируемых газов.

Расчет дымового тракта включает в себя определение потерь напора газов на различных участках тракта и расчет основных геометрических размеров этих участков и заканчивается определением суммарных потерь напора. Расчет суммарных потерь напора на пути движения дымовых газов от печи до дымовой трубы является важнейшим расчетом, который выполняется для большинства печей. Величина суммарных потерь используется затем при расчете разрежения, создаваемого дымовой трубой, которое должно быть по абсолютной величине больше суммы всех сопротивлений, возникающих в дымовом тракте печи.

Все три задания объединены для каждого из вариантов в одно целое одним видом печи и одной конструкцией системы вывода газов и, следовательно, едиными исходными данными. Исходные данные для расчета разделены на две группы: общую для всех вариантов (см. далее по тексту) и индивидуальную – по каждому варианту (выдается преподавателем).

#### Исходные данные для расчета (общая часть)

Размеры рабочего пространства в конце печи:

- ширина  $B_n = 3,55$  м;
- высота  $H_n = 2,15$  м.

Размеры заготовок в печи:

- ширина  $B_{\text{заг}} = 0,35$  м;

- высота  $H_{\text{заг}} = 0,15$  м.

Размеры камеры рекуператора:

- ширина  $B_{\text{рек}} = 1,4$  м;

- высота  $H_{\text{рек}} = 2,5$  м.

Число вертикальных каналов дымохода  $n = 3$  шт. Коэффициент трения газа о кирпичные стенки канала  $\lambda = 0,05$ . Потери энергии в рекуператоре  $h_{\text{рек}} = 132,725$  Н/м<sup>2</sup>.

В расчетах принимаем постоянными следующие величины:

- плотность продуктов горения  $\rho_{\text{пр}} = 1,28$  кг/м<sup>3</sup>;

- температура окружающего воздуха  $T_{\text{в}} = 293$  К;

- плотность воздуха при нормальных условиях  $T_0 = 273$  К,  $P_{\text{в}} = 101,3$  кН/м<sup>2</sup>,  $\rho_{\text{в}} = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>;

- скорость движения газов в вертикальных каналах и боровых  $\omega_{\text{г}} = 2,5$  м/с.

#### Индивидуальные исходные данные

Параметр дымового тракта	Вариант 0
Количество продуктов горения, продвигающихся по каналам дымового тракта, в единицу времени, $V$ , м <sup>3</sup> /ч	19165
Температура продуктов горения в конце печи, $T_{\text{печи}}$ , К	1223
Температура продуктов горения в вертикальных каналах, $T_{\text{верт}}$ , К	1198
Падение температуры дыма в рекуператоре, $\Delta T_{\text{рек}}$ , К	450
Потери температуры при движении газов в первом борове (участки $l_1$ и $l_2$ ), $\Delta T_1$ , К/м	2
Потери температуры при движении газов во втором борове (участок $l_3$ ), $\Delta T_2$ , К/м	1,5
Длины участков боровов, м	
$l_1$	5,0
$l_2$	5,0
$l_3$	6,0
Схема изгиба трубопровода на участке между каналами $l_1$ и $l_2$ (рис. 2)	1
Высота вертикальных каналов, $H_{\text{верт}}$ , м	3,0
Высота заготовок, $H_{\text{заг}}$ , м	0,15
Число вертикальных каналов, $n$ , шт.	3

## Задание № 1.1

### Определение суммарных потерь напора на пути движения продуктов горения по дымовому тракту от рабочего пространства методической печи до дымовой трубы

Дымовой тракт данной методической печи состоит из участка вертикальных каналов  $l_{\text{верт}}$  (рис. 1), первого борова (участки  $l_1$  и  $l_2$ ), рекуператора и второго борова (участок  $l_3$ ). Заканчивается дымовой тракт шибером, который установлен непосредственно перед дымовой трубой.

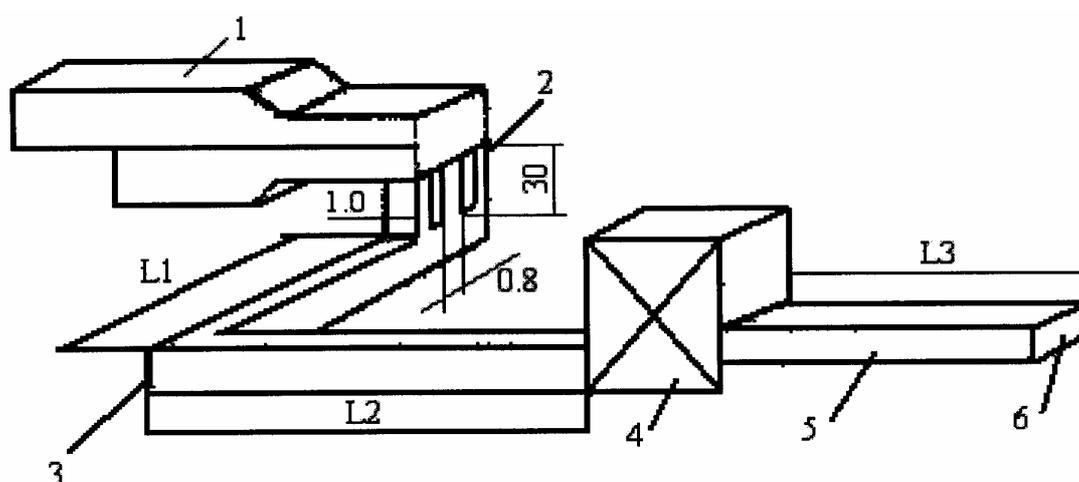


Рис. 1. Схема дымового тракта:

1 – печь; 2 – вертикальные каналы; 3 – первый боров (участки  $l_1$  и  $l_2$ );  
4 – рекуператор; 5 – второй боров (участок  $l_3$ ); 6 – шибер

Первый боров выполнен с поворотом на  $90^\circ$ . Различные схемы поворота представлены на рис. 2.

### Пример выполнения задания № 1.1

Для удобства решения разделим весь дымовой тракт на участки: 1 – вертикальные каналы, 2 – первый боров, 3 – рекуператор, 4 – второй боров.

Найдем потери энергии отдельно на каждом участке и затем просуммируем.

1. Определяем потери энергии на участке вертикальных каналов. Потери энергии в вертикальных каналах складываются из потерь на трение газов о стенки каналов ( $h_{\text{тр}}$ ), на местные сопротивления поворота

на  $90^0$  ( $h'_{м.с}$ ) и сужения потока при входе в вертикальные каналы ( $h''_{м.с}$ ), на преодоление геометрического напора при движении газов вниз по вертикальным каналам ( $h_{геом}$ ), Н/м<sup>2</sup>:

$$h_{ПОТ}^{верт} = h'_{тр} + h'_{м.с} + h''_{м.с} + h_{геом} . \quad (1.1)$$

1.1. Найдем скорости движения продуктов горения (дымовых газов) в конце печи с учетом уменьшения сечения рабочего пространства печи за счет нагреваемых заготовок, м/с,

$$\omega_0 = V / 3600 B_{п}(H_{п} - H_{заг}),$$

где 3600 – переводной коэффициент,  $B_{п} (H_{п} - H_{заг})$  – площадь проходного сечения на выходе из печи, м<sup>2</sup>,

$$\omega_0 = 19165 / 3600 \cdot 3,55(2,15 - 0,15) = 0,74 \text{ м/с}.$$

1.2. Определим площадь сечения и размеры вертикальных каналов. Площадь сечения всех каналов, м<sup>2</sup>,

$$F_{\Sigma} = V / 3600 \omega_{г};$$

$$F_{\Sigma} = 19165 / 3600 \cdot 2,5 = 2,12 \text{ м}^2.$$

Сечение одного канала ( $n = 3$ )

$$F_{кан} = F_{\Sigma} / n = 2,12 / 3 = 0,7 \text{ м}^2.$$

Находим размеры каналов. Согласно рис.1 толщина каналов  $S = 1$  м, тогда ширина канала  $B_{кан} = F_{кан} / S_{кан} = 0,7 / 1 = 0,7$  м. Гидравлический диаметр канала

$$d_{гвк} = 4F_{кан} / \Pi = 4 \cdot 0,7 / 2(1+0,7) = 0,82 \text{ м}.$$

1.3. Потери энергии на трение в каналах определяем по формуле, Н/м<sup>2</sup>

$$h_{тр} = \lambda (\rho_{пр} \omega_{г}^2 / 2) (H_{верт} / d_{гвк}) (T_{пр}^{верт} / T_0);$$

$$h_{тр} = 0,05(1,28 \cdot 2,5^2 / 2) (3,0 / 0,82) (1198 / 273) = 3,32 \text{ Н/м}^2$$

Потери энергии на повороте из печи в вертикальный канал (угол поворота –  $90^0$ ), Н/м<sup>2</sup>,

$$h'_{м.с} = \xi_{пов}(\rho_{пр} \omega_{г}^2 / 2) T_{печи} / T_0,$$

где  $\xi_{пов}$  – коэффициент местного сопротивления,  $\xi_{пов} = 2,0$ ;

$$h'_{м.с} = 2,0 (1,28 \cdot 0,74^2 / 2) 1223 / 273 = 3,11 \text{ Н/м}^2.$$

1.4. Потери энергии на сужение (изменение скорости) при входе в вертикальные каналы,  $\text{Н/м}^2$ ,

$$h''_{\text{м.с}} = \xi_{\text{суж}}(\rho_{\text{пр}}\omega_0^2 / 2)T_{\text{печи}} / T_0,$$

где  $\xi_{\text{суж}}$  – коэффициент местного сопротивления при внезапном сужении канала,

$$\xi_{\text{суж}} = 0,42;$$

$$h''_{\text{м.с}} = 0,42(1,28 \cdot 0,74^2 / 2)1223 / 273 = 0,64 \text{ Н/м}^2.$$

1.5. Потери энергии на преодоление геометрического напора,  $\text{Н/м}^2$ ,

$$h_{\text{геом}} = H_{\text{верт}}G(\rho_{\text{в}}(T_0 / T_{\text{в}}) - \rho_{\text{пр}}(T_0 - T_{\text{пр}}^{\text{верт}}));$$

$$h_{\text{геом}} = 3,0 \cdot 9,81(1,29(273 / 293) - 1,28(273 / 1198)) = 26,76 \text{ Н/м}^2.$$

Суммарные потери напора в вертикальных каналах находим по формуле (1.1),  $\text{Н/м}^2$ ,

$$h_{\text{пот}}^{\text{верт}} = 3,32 + 3,11 + 0,64 + 26,76 = 33,83 \text{ Н/м}^2.$$

2. Определяем потери энергии при движении продуктов горения в первом борове (участки  $l_1$  и  $l_2$ ) (см. рис. 2). Они складываются из потерь на трение о стенки канала ( $h''_{\text{тр}}$ ) и потерь на местных сопротивлениях при двух поворотах: на пути из вертикальных каналов в боры и поворота в первом борове ( $h''_{\text{м.с}}$ ),  $\text{Н/м}^2$ ,

$$h''_{\text{пот}} = h''_{\text{тр}} + h''_{\text{м.с}}. \quad (1.2)$$

2.1. Находим площадь сечения и размеры первого борова.

Площадь сечения борова определяем из условия пропускания  $V$  газов со скоростью  $\omega_{\text{г}}$ ,  $\text{м}^2$ ,

$$F_{\text{б}} = V / 3600 \omega_{\text{г}} = 19165 / 3600 \cdot 2,5 = 2,13.$$

Ширину борова принимаем равной толщине вертикальных каналов ( $B_{\text{б}} = 1 \text{ м}$ ). В этом случае высота борова

$$H_{\text{б}} = F_{\text{б}} / B_{\text{б}} = 2,13 / 1,0 = 2,13 \text{ м}.$$

Гидравлический диаметр борова,

$$d_{г.б} = 4F_б / \Pi_б = 4 \cdot 2,13 / 2(1,0 + 2,13) = 1,36 \text{ м,}$$

где  $\Pi_б$  – периметр борова.

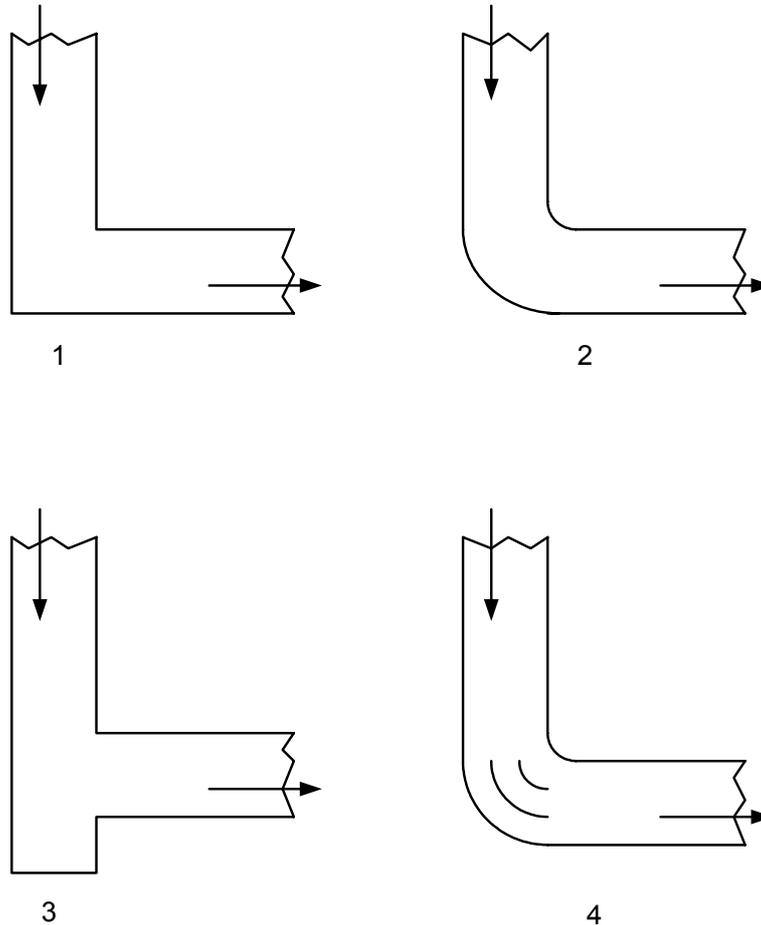


Рис. 2. Схемы поворота первого борова между участками  $l_1$  и  $l_2$ :  
 1 – резкий поворот на  $90^\circ$ ; 2 – поворот на  $90^\circ$  с закруглениями;  
 3 – поворот на  $90^\circ$  с нишей; 4 – поворот на  $90^\circ$  с направляющими  
 Прандтля

2.2. Определим среднюю температуру газов в первом борове  $T_{пр.ср}^{бор}$

Для этого сначала найдем температуру продуктов горения на выходе из борова в рекуператор, К,

$$T_{пр.кон}^{бор} = T_{пр}^{верт} - \Delta T_1 L_{бор},$$

где  $L_{бор}$  – длина борова до рекуператора,  $L_{бор} = l_1 + l_2 = 5 + 6 = 11$  м;

$$T_{пр.кон}^{бор} = 1198 - 2 \cdot 11 = 1176 \text{ К.}$$

Средняя температура газов в борове

$$T_{\text{пр.ср}}^{\text{бор}} = (T_{\text{пр}}^{\text{верт}} + T_{\text{пр.кон}}^{\text{бор}}) / 2 = (1198 + 1176) / 2 = 1187 \text{ К.}$$

2.3. Потери энергии на трение газов о стенки в первом борове,  $\text{Н/м}^2$ ,

$$h''_{\text{тр}} = \lambda(\rho_{\text{пр}} \omega_{\text{г}}^2 / 2)(L_{\text{бор}} / d_{\text{г.б}})(T_{\text{пр.ср}}^{\text{бор}} / T_0);$$

$$h''_{\text{тр}} = 0,05(1,28 \cdot 2,5^2 / 2)(11 / 1,36)(1187 / 273) = 6,86 \text{ Н/м}^2.$$

2.4. Потери энергии при двух поворотах на  $90^0$  на пути от вертикальных каналов до рекуператора,  $\text{Н/м}^2$ ,

$$h''_{\text{м.с}} = \xi_{\Sigma}(\rho_{\text{пр}} \omega_{\text{г}}^2 / 2)(T_{\text{пр.ср}}^{\text{бор}} / T_0),$$

где  $\xi_{\Sigma} = \xi_1 + \xi_2$  – суммарный коэффициент местного сопротивления;  $\xi_1$  – коэффициент местного сопротивления при повороте из вертикальных каналов в бор;  $\xi_1 = 2,0$ ;  $\xi_2$  – коэффициент местного сопротивления при повороте борова на участке  $(l_1 - l_2)$ ;  $\xi_2 = 0,5 + 2 = 2,5$ ;  $\xi_{\Sigma} = 2,0 + 2,5 = 4,5$ ;

$$h''_{\text{м.с}} = 4,5(1,28 \cdot 2,5^2 / 2)(1187 / 273) = 78,3 \text{ Н/м}^2.$$

2.5. Суммарные потери энергии в первом борове находим по формуле (1.2)

$$h''_{\text{пот}} = 6,86 + 43,43 = 85,16 \text{ Н/м}^2.$$

3. Определим потери энергии при движении продуктов горения в рекуператоре. Они складываются из потерь при внезапном расширении канала на входе в рекуператор ( $h'''_{\text{м.с.1}}$ ), потерь при внезапном сужении на выходе из рекуператора ( $h_{\text{м.с.2}}$ ) и потерь энергии в рекуператоре при поперечном омывании дымом шахматного пучка труб ( $h^{\text{рек}}$ ).

$$h^{\text{рек}} = h_{\text{м.с.1}}^{\text{рек}} + h^{\text{рек}} + h_{\text{м.с.2}}^{\text{рек}}. \quad (1.3)$$

3.1. Потери энергии при внезапном расширении (изменение скорости) при входе в рекуператор,  $\text{Н/м}^2$ ,

$$h_{\text{м.с.1}}^{\text{рек}} = \xi_{\text{расш}}(\rho_{\text{пр}} \omega_{\text{г}}^2 / 2)(T_{\text{пр.кон}}^{\text{бор}} / T_0),$$

где  $\xi_{\text{расш}}$  – коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении канала,  $\xi_{\text{расш}} = 0,16$ ;

$$h_{\text{м.с.1}}^{\text{рек}} = 0,16(1,28 \cdot 2,5^2 / 2)(1176 / 273) = 2,75 \text{ Н/м}^2.$$

### 3.2. Потери энергии при внезапном сужении (изменение скорости)

при выходе из рекуператора  $h_{\text{суж}}^{\text{рек}}$ , Н/м<sup>2</sup>,

$$h_{\text{суж}}^{\text{рек}} = \xi_{\text{суж}}(\rho_{\text{пр}} \omega_{\text{рек}}^2 / 2) T_{\text{вых}}^{\text{рек}} / T_0 ,$$

где  $\omega_{\text{рек}}$  – скорости движения газов в рекуператоре;

$$\omega_{\text{рек}} = V / 3600 B_{\text{рек}} H_{\text{рек}} = 19165 / 3600 \cdot 1,4 \cdot 2,5 = 1,52 \text{ м/с.}$$

Температура газов на выходе из рекуператора

$$T_{\text{пр.вых}}^{\text{рек}} = T_{\text{пр.кон}}^{\text{бор}} - \Delta T_{\text{рек}} = 1176 - 450 = 726 \text{ К.}$$

$\xi_{\text{суж}} = 0,26$  для случая  $F_{\text{бор}} / F_{\text{рек}} = (1 \cdot 2,13) / (1,4 \cdot 2,5) = 0,61$ ;

$$h_{\text{суж}}^{\text{рек}} = 0,26 (1,28 \cdot 1,52^2 / 2) 726 / 273 = 1,03 \text{ Н/м}^2.$$

### 3.3. Потери энергии в рекуператоре находим по формуле (1.3):

$$h_{\text{пот}}^{\text{рек}} = 2,75 + 132,725 + 1,03 = 136,505 \text{ Н/м}^2.$$

4. Определим потери энергии на участке от рекуператора до шибера,  $h_{\text{пот}}^4$ , Н/м<sup>2</sup>,

$$h_{\text{пот}}^4 = \lambda(\rho_{\text{пр}} \omega_{\text{г}}^2 / 2) (L_{\text{рек-шиб}} / d_{\text{г.б}}) (T_{\text{пр.ср}}^{\text{рек-шиб}} / T_0).$$

#### 4.1. Найдем среднюю температуру газов на этом участке.

Температура газов на шибере, К,

$$T_{\text{пр.кон}}^{\text{шиб}} = T_{\text{пр.вых}}^{\text{рек}} - \Delta T_2 l_3 ,$$

где  $l_3 = 6,0$  м , расстояние от рекуператора до шибера;

$$T_{\text{пр.кон}}^{\text{шиб}} = 726 - 1,5 \cdot 6 = 717 \text{ К.}$$

Средняя температура газов на участке рекуператор – шибера, К,

$$T_{\text{пр.ср}}^{\text{рек-шиб}} = (T_{\text{пр.вых}}^{\text{рек}} + T_{\text{пр.кон}}^{\text{шиб}}) / 2 = (726 + 717) / 2 = 721,55 \text{ К.}$$

4.2. Потери энергии в борове на участке от рекуператора до шибера

$$h_{\text{пот}}^4 = 0,05 (1,28 \cdot 2,5^2 / 2) (6 / 1,36) (721,5 / 273) = 2,34 \text{ Н/м}^2.$$

5. Общие потери энергии при движении продуктов горения от рабочего пространства печи до шибера.

$$\begin{aligned} \Sigma h_{\text{пот}} &= h_{\text{пот}}^{\text{верт.к}} + h_{\text{пот}}^{\text{б1}} + h_{\text{пот}}^{\text{рек}} + h_{\text{пот}}^{\text{б2}} = \\ &= 33,83 + 85,16 + 136,505 + 2,34 = 257,835 \text{ Н/м}^2 \end{aligned}$$

*Ответ.* Суммарные потери напора на пути движения продуктов горения по дымовому тракту от рабочего пространства методической печи до дымовой трубы составят 257,835 Н/м<sup>2</sup>.

### **Задание № 1.2**

#### **Определение высоты и основных параметров дымовой трубы**

Дымовая труба служит для удаления продуктов сгорания из печи. Работа дымовой трубы осуществляется так, чтобы на уровне пода печи поддерживалось нулевое давление, ниже – разряжение. Разряжение необходимо для того, чтобы дымовые газы отсасывались из печи через дымовой тракт. Необходимое для этого разряжение в трубе создается благодаря стремлению горячих газов подняться вверх, обусловленному разностью плотностей холодного наружного воздуха и горячих газов. Скорость газов в устье трубы принимают равной 3 – 10 м/с, поскольку при скорости, меньшей 3 м/с при ветре может происходить их задувание в трубу. Кирпичные и железобетонные дымовые трубы для большей устойчивости делают более широкими в основании. При расчетах внутренний диаметр в основании трубы  $d_0$  принимают в 1,5 раза больше внутреннего устья трубы  $d_y$ , т.е.  $d_0 = 1,5 d_y$ .

По условиям выполнения кладки  $d_y$  для кирпичных труб не должен быть меньше 0,8 мм.

Падение температуры газов на 1 м высоты трубы принимается для кирпичных и железобетонных 1,0 – 1,5 град, а для металлических 3 – 4 град.

## Пример выполнения задания № 1.2

Исходные данные для расчета (общая часть):

- суммарные потери при движении газов  $h_{\text{пот}} = 257,835 \text{ Н/м}^2$ ;
- температура дымовых газов на входе в трубу  $T_{\text{пр.тр}} = T_{\text{пр.кон}}^{\text{шиб}} = 717 \text{ К}$ ;
- падение температуры по высоте трубы  $T_{\text{тр}} = 1,25 \text{ К/м}$ .

1. Площадь сечения и диаметр устья трубы:

Количество продуктов горения, проходящих через трубу:

$$V = 19165 \text{ м}^3/\text{ч} = 5,35 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Принимаем скорость дыма в устье  $w_y = 3,0 \text{ м/с}$ .

Площадь сечения трубы

$$F = V / w_y = 5,35 / 3,0 = 1,77 \text{ м}^2.$$

Диаметр устья трубы

$$d_y = 4F_y / \Pi = 4 \cdot 1,77 / 3,14 = 1,5 \text{ м}.$$

2. Скорость движения газов в основании трубы, м/с,

$$w_{\text{осн}} = 4V / \Pi d_{\text{осн}}, \text{ м/с},$$

где  $d_{\text{осн}}$  – диаметр основания трубы, м,

$$d_{\text{осн}} = 1,2d_y = 1,2 \cdot 1,5 = 2,25 \text{ м};$$

$$w_{\text{осн}} = 4 \cdot 5,35 / 3,14 \cdot 2,25^2 = 1,35 \text{ м/с}.$$

3. Принимаем величину действительного разряжения, создаваемого трубой. Оно должно быть на 20 – 40 % больше потерь напора в дымовом тракте

$$h_{\text{действ}} = 1,3 \Sigma h_{\text{пот}} = 1,3 \cdot 257,835 = 335,5186 \text{ Н/м}^2.$$

4. По графику (рис. 3) ориентировочно находим высоту трубы. При температуре дымовых газов  $T_{\text{пр.тр}} = 717 \text{ К} = 444 \text{ }^\circ\text{С}$  и величине действительного разряжения  $h_{\text{действ}} = 335,5186 \text{ Н/м}^2$  ориентировочная высота трубы  $H_{\text{тр}} = 50 \text{ м}$ .

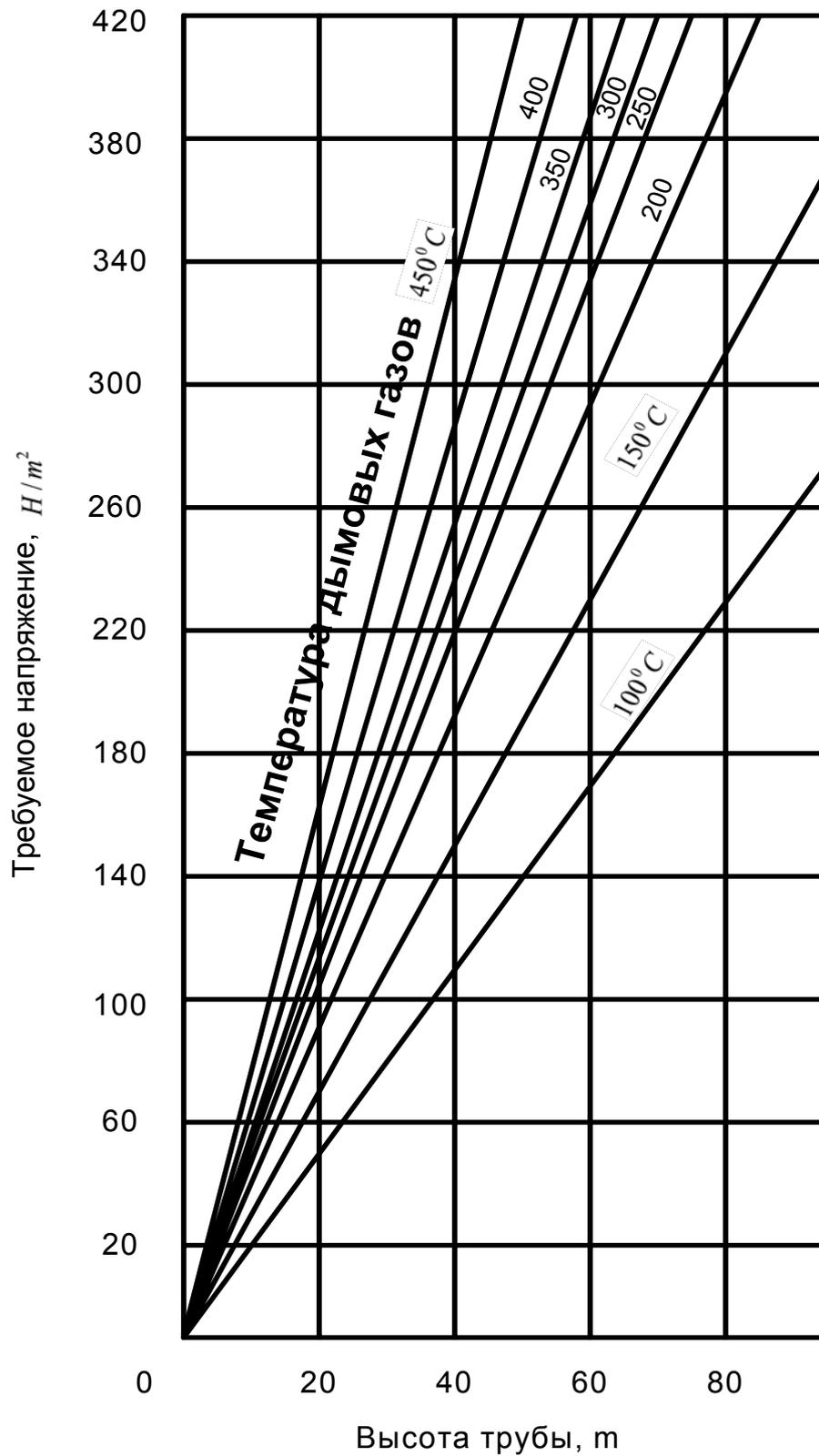


Рис. 3. График для ориентировочного выбора высоты трубы в зависимости от требуемого разрежения при температуре окружающей среды

5. Определяем среднюю температуру газов в трубе, К,

$$T_{\text{пр.ср}} = T_{\text{пр.тр}} + T_{\text{пр.устье}} / 2,$$

где  $T_{\text{пр.устье}}$  – температура продуктов горения в устье трубы, К;

$$T_{\text{пр.устья}} = T_{\text{пр.тр}} - \Delta T_{\text{тр}} H_{\text{тр}} = 717 - 1,25 \cdot 50 = 717 - 62,5 = 654,5 \text{ К.}$$

$$T_{\text{пр.ср}} = (717 + 654,5) / 2 = 686 \text{ К.}$$

6. Находим средний диаметр и площадь сечения трубы

$$d_{\text{ср.тр}} = (d_{\text{осн}} + d_{\text{у}}) / 2 = (2,25 + 1,5) / 2 = 2,75 \text{ м;}$$

$$F_{\text{тр.ср}} = (\Pi d_{\text{ср.тр}}^2) / 4 = (3,14 \cdot 1,875^2) / 4 = 2,75 \text{ м}^2.$$

7. Средняя скорость движения дымовых газов в трубе

$$w_{\text{тр.ср}} = V / F_{\text{тр.ср}} = 5,35 / 2,75 = 1,95 \text{ м/с.}$$

8. Высоту дымовой трубы находим по формуле, м,

$$H = \frac{h_{\text{действ}} - \rho_{\text{пр}} \cdot \frac{(\omega_{\text{осн}})^2}{2} \cdot \frac{(T_{\text{пр,кон}})^{\text{шиб}}}{T_0} + \rho_{\text{пр}} \cdot (\omega_{\text{у}})^2 \cdot \frac{T_{\text{пр,устья}}}{T_0}}{g \cdot \left( \rho_{\text{в}} \cdot \frac{T_0}{T_{\text{в}}} - \rho_{\text{пр}} \cdot \frac{T_0}{T_{\text{пр,ср}}} \right) - \frac{\lambda}{d_{\text{ср,тр}}} \cdot \rho_{\text{пр}} \cdot \frac{(\omega_{\text{тр,кр}})^2}{2} \cdot \frac{T_{\text{пр,ср}}}{T_0}}$$

$$H = \frac{335,186 - 1,28 \cdot \frac{1,35^2}{2} \cdot \frac{717}{273} + 1,28 \cdot 3,0^2 \cdot \frac{654}{273}}{9,81 \cdot \left( 1,29 \cdot \frac{273}{293} - 1,28 \cdot \frac{273}{686} \right) - \frac{0,05}{1,875} \cdot 1,28 \cdot \frac{1,95^2}{2} \cdot \frac{686}{273}} = 54,28$$

*Ответ.* Диаметр основания трубы  $d_{\text{осн}} = 2,25$  м; диаметр устья трубы  $d_{\text{у}} = 1,5$  м; высота трубы  $H = 54,28$  м.

**Задание № 1.3**  
**Расчет эжектора для удаления продуктов горения**  
**из методической нагревательной печи**

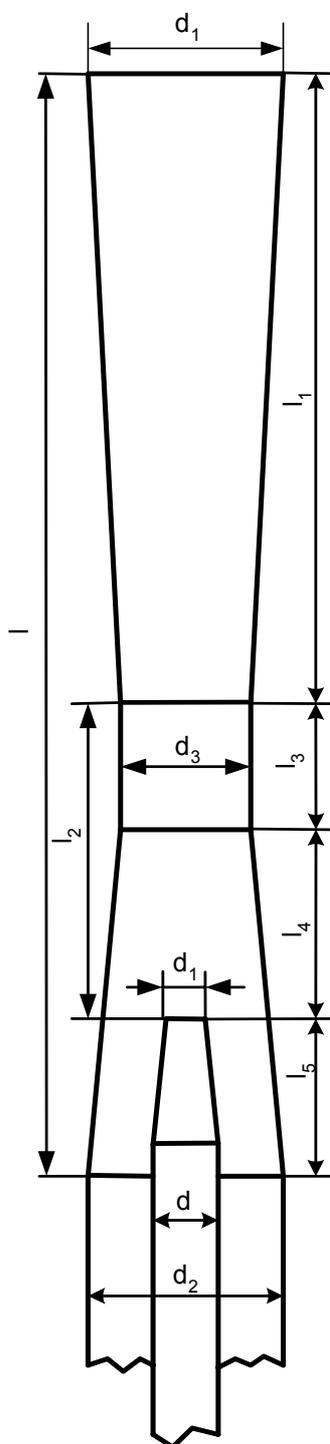


Рис. 4. Схема эжектора

В работе необходимо определить основные размеры и параметры эжектора, а также скорость эжектируемого газа на выходе из сопла. Эжекция производится воздухом при  $T_{\text{в}} = 293 \text{ К}$ , нагнетаемым вентилятором высокого давления. Конструктивное оформление эжектора представлено на рис. 4.

Эжекторы (дымососы) используют для удаления продуктов горения из печи, инжекторы (инжекционные горелки) – для подачи газов в печь. Основные показатели эжектора:  $\eta$  – КПД эжектора;  $\omega_{\text{возд.сопл}}$  – скорость течения эжектирующего газа;  $d$  – диаметр смесителя;  $m$  – кратность эжекции (отношение эжектирующего газа и эжектируемого);  $\beta$  – отношение площади сечения эжектирующего сопла и площади сечения смесителя.

Цель расчета эжектора – определение коэффициента полезного действия  $\eta$  и необходимой скорости истечения эжектирующего газа (воздуха)  $\omega_{\text{возд.сопл}}$  на выходе из сопла. Основная величина, определяющая размеры эжектора, – диаметр смесителя  $d_3$  (см. рис. 4), который можно определить, зная скорость потока в смесителе  $\omega_{\text{см.эж}}$ . Для расчетов эжектора применяют номограмму (рис. 5), устанавливающую зависимости максимального значения КПД эжектора  $\eta_{\text{max}}$  и оптимального значения  $\beta$  от температуры дымовых газов и значения кратности эжекции  $n$ . Максимальный КПД эжектора обеспечивается оптимальным соотношением размеров отдельных его частей (см. рис. 4).

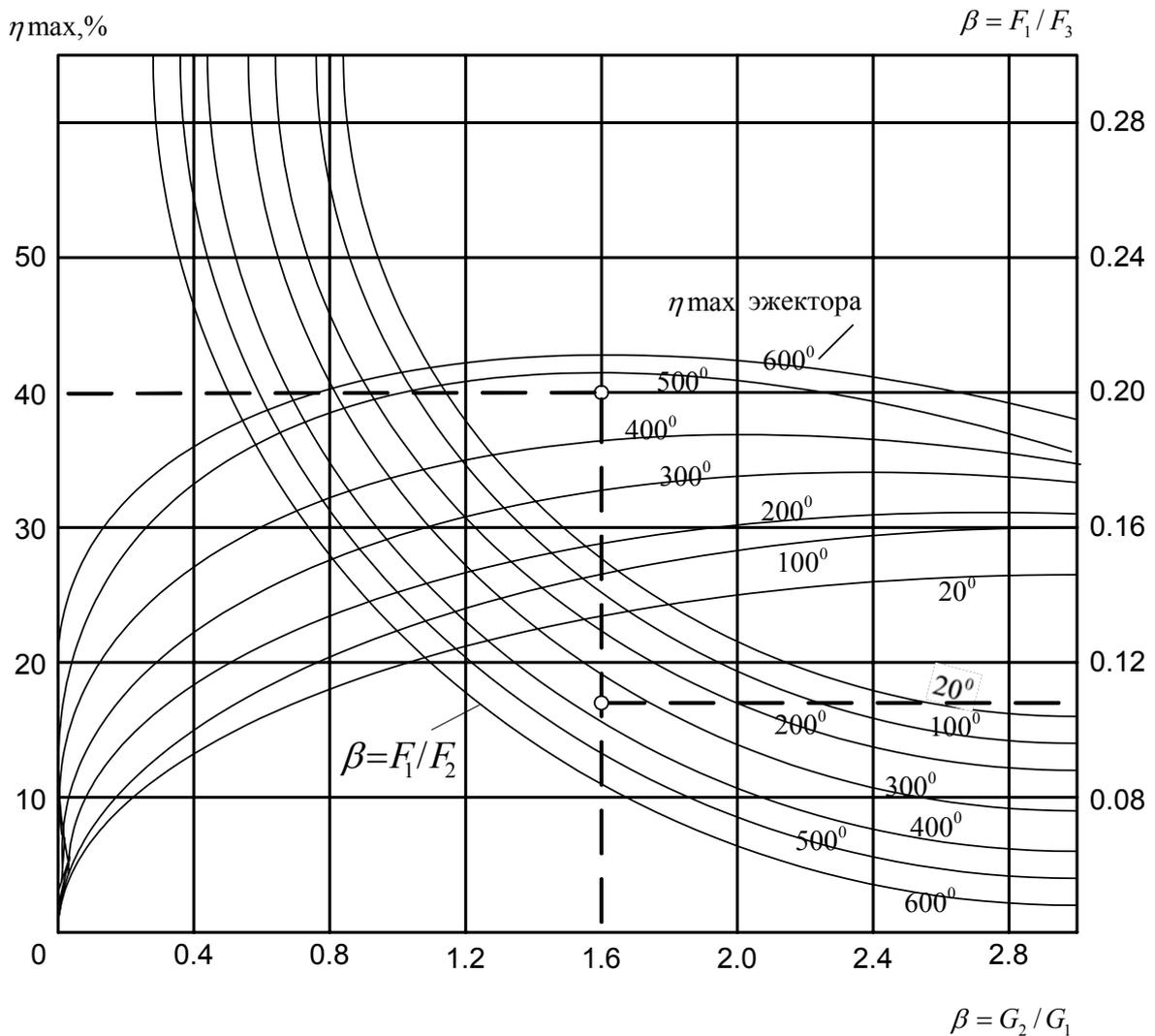


Рис. 5. Зависимость кпд эжектора от температуры дыма и параметров  $\beta$  и  $\eta$

### Пример выполнения задания № 1.3

Исходные данные для работы (общая часть):

1. Определяем расход массы эжектируемых дымовых газов (продуктов горения)

$$G_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}} V = 1,28 \cdot 5,35 = 6,85 \text{ кг/с.}$$

2. Принимаем кратность эжекции, т.е. отношение масс эжектируемого  $G_G$  и эжектирующего  $G_{\text{возд}}$  газов

$$n = G_G / G_{\text{возд}} = 1,6.$$

В этом случае расход массы воздуха в эжекторе

$$G_{\text{возд}} = G_G / n = 6,85 / 1,6 = 4,28 \text{ кг/с.}$$

3. По номограмме (см. рис. 5) определяем значения  $\beta$  и  $\eta_{\text{max}}$ .

Для  $n = 1,6$  и  $T_{\text{пр.тр}} = 717 \text{ К}$  по номограмме находим  $\beta = 0,115$  и  $\eta_{\text{max}} = 40 \%$ .

4. Действительный объем эжектируемых дымовых газов

$$V_G = V (T_{\text{пр.тр}} / T_0) = 5,35 (717 / 273) = 14,1 \text{ м}^3/\text{с.}$$

5. Действительный объем эжектирующего воздуха

$$V_{\text{возд}} = (G_{\text{возд}} / \rho_v) (T_v / T_0) = (4,28 / 1,29)(293/273) = 3,56 \text{ м}^3/\text{с.}$$

6. Объемная кратность эжекции, т.е. отношение объемов эжектируемого и эжектирующего газов,

$$m = V_G / V_{\text{возд}} = 14,1 / 3,56 = 3,96.$$

Плотность смеси дыма и воздуха

$$\rho_{\text{см}} = (G_{\text{возд}} + G_G) / (V_{\text{возд}} + V_G) = (4,28 + 6,85) / (3,56 + 14,1) = 0,64 \text{ кг/м}^3.$$

7. Определяем скорость движения смеси в эжекторе

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \Sigma h_{\text{пот}}}{\rho_{\text{см}} \cdot \left[ \frac{2 + 0,8\beta \cdot m \cdot n}{\beta \cdot (1 + m) \cdot (1 + n)} - (2 - \eta_{\text{диф}}) \right]}}$$

где  $\eta_{\text{диф}}$  – КПД диффузора при угле раскрытия  $7 - 8^\circ$ ,  $\eta_{\text{диф}} = 0,8 - 0,85$ , принимаем  $\eta_{\text{диф}} = 0,8$ .

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot 257,835}{0,64 \cdot \left[ \frac{2 + 0,8 \cdot 0,115 \cdot 3,96 \cdot 1,6}{0,115 \cdot (1 + 3,96) \cdot (1 + 1,6)} - (2 - 0,8) \right]}} = 38,44$$

$$\omega = 38,44 \text{ м/с.}$$

8. Площадь поперечного сечения смесителя

$$F_{\text{см}} = (V_{\text{возд}} + V_g) / \omega = (3,56 + 14,1) / 38,44 = 0,459 \text{ м}^2.$$

Отсюда

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,459}{3,14}} = 0,76$$

$$d_3 = 0,76 \text{ м.}$$

9. Остальные размеры эжектора находим по формулам:

$$l = 17 d_3 = 17 \cdot 0,76 = 12,92 \text{ м};$$

$$l_1 = 10 d_3 = 10 \cdot 0,76 = 7,6 \text{ м};$$

$$l_2 = 2 d_3 = 2 \cdot 0,76 = 1,52 \text{ м};$$

$$l_3 = 3 d_3 = 3 \cdot 0,76 = 2,28 \text{ м};$$

$$l_4 = 2 d_3 = 2 \cdot 0,76 = 1,52 \text{ м};$$

$$l_5 = 2 d_3 = 2 \cdot 0,76 = 1,52 \text{ м};$$

$$d_1 = d_3 \sqrt{\beta} = 0,76 \sqrt{0,115} = 0,258;$$

$$d_2 = 2 d_3 = 2 \cdot 0,76 = 1,52 \text{ м};$$

$$d_4 = 2 d_3 = 2 \cdot 0,76 = 1,52 \text{ м}.$$

10. Скорость эжектирующего воздуха в сопле

$$\omega_{\text{возд.сопл}} = 4V_{\text{возд}}/\pi d_1^2 = (4 \cdot 3,56)/(0,258^2 \cdot 3,14) = 68,13 \text{ м/с}.$$

*Ответ.* КПД эжектора 40 %; скорость эжектирующего воздуха в сопле 68,13 м/с; диаметр смесителя эжектора  $d_3 = 0,76 \text{ м}$ .

## Практическая работа № 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ИЗДЕЛИЙ В ПЕЧАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Время, проводимое изделием в печи, в общем случае состоит из времени его нагрева до заданной температуры и времени выдержки при этой температуре. Во многих случаях изделие остывает вне печи, и это время, следовательно, не входит в цикл ее работы, время выдержки также иногда отсутствует или сводится к минимуму – к времени, необходимому для выравнивания температур в изделиях.

Температурный режим и, следовательно, время нагрева и выдержки изделий определяется технологическим процессом и, таким образом, должно быть задано конструктору печи технологами на основе имеющегося опыта нагрева аналогичных деталей в уже эксплуатирующихся печах. Часто, однако, эти данные являются весьма ориентировочными и требуют проверки; кроме того, иногда технологи ограничиваются тем, что задают лишь время выдержки и максимальные допустимые скорости нагрева и остывания изделий.

В электрических печах сопротивления косвенного действия, так же как и в пламенных, нагрев изделий происходит от поверхности внутрь. Если этот процесс идет слишком быстро, то перепад между температурами на поверхности изделия и внутри устанавливается чересчур большой, что вызывает значительные термические напряжения в материале и может привести к его растрескиванию. Задача заключается в том, чтобы выбрать оптимальные скорости нагрева, которые обеспечивали бы заданную производительность печи и в то же время обуславливали приемлемые мощности и размеры печей. Поэтому при проектировании электрических печей часто приходится уделять внимание и вопросу определения времени нагрева изделий.

Время нагрева изделий определяют по разному для тонких и массивных тел. Теплотехнически тонким называют изделие, у которого внутренний перепад температур всегда близок к нулю; изделия, при расчете которых нельзя пренебречь внутренним перепадом температур, называют теплотехнически массивными.

Степень массивности тела зависит не только от его толщины, но и от его теплопроводности, а также от коэффициента теплоотдачи на его поверхности (от значения которого зависит наружный перепад температур), а следовательно, и от температуры печи, определяющей собой коэффициент теплоотдачи. С учетом этого степень массивности тела может быть охарактеризована числом Био, выражающим собой отношение внутреннего термического сопротивления к внешнему.

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} S = \frac{S/\lambda}{1/\alpha},$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности тела, Вт/м<sup>2</sup> °С,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала тела, Вт/м<sup>20</sup>С;  $S$  – половина толщины тела.

При малых значениях числа Био наружный перепад температур намного больше внутреннего, изделие ведет себя как тонкое, при больших, наоборот, превалирует внутренний перепад, и изделие ведет себя как массивное. При значении числа Био  $Bi = 2$  наступает равенство обоих перепадов, наружного и внутреннего, однако и при существенно меньших значениях  $Bi$  пренебречь внутренним сопротивлением тела при расчете времени нагрева нельзя. При  $Bi < 0,25$  мы имеем дело с практически тонкими изде-

лиями, при  $Bi > 0,5$  – область массивных изделий, наконец, интервал  $0,25 < Bi < 0,5$  – переходная область, которую следовало бы отнести к области массивных изделий, но для которой можно пользоваться и выражениями для времени нагрева тонких изделий, так как ошибка получается очень небольшая.

### Нагрев тонких изделий

На рис. 6 показаны графики нагрева изделий при постоянной температуре печи. Термин «температура печи» является условным, так как в действительности в камере печи температуры в отдельных точках различны. Так, можно говорить о температуре нагревателей, поверхности огнеупорной кладки, поверхности жароупорных деталей и т. д. Под температурой печи следует понимать некую среднюю температуру, которая с точки зрения нагрева изделий обусловит тот же эффект, что и вышеперечисленные нагретые части камеры печи. Эта температура и является расчетной, задаваемой при нагреве.

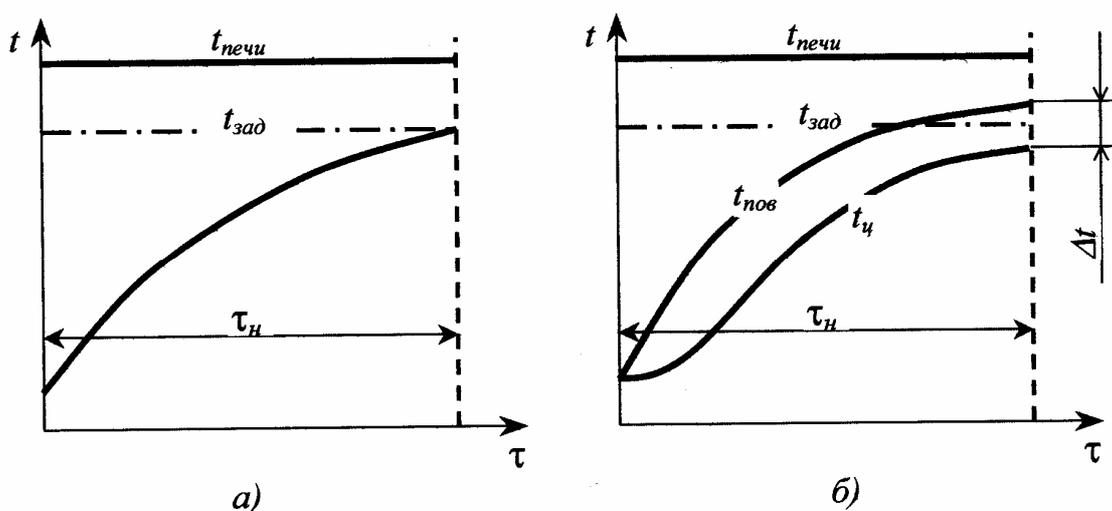


Рис. 6. График нагрева изделий в печи периодического действия при постоянной температуре печи: а – тонкие изделия; б – массивные изделия

В действительности нагрев изделий в печах происходит с самого начала при постоянной температуре лишь в редких случаях, когда тепловоспринимающая способность изделий низка. Если же печь периодического действия загружается нормально и притом в один прием, то при этом происходит резкое снижение температуры в камере, что обуславливает довольно существенное увеличение времени нагрева изделий по сравнению со временем нагрева при постоянной температуре печи (рис. 7).

Поэтому в печах периодического действия приходится разбивать нагрев 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 (мощность печи минус тепловые потери). В этот период температура печи меняется, она медленно поднимается к заданному значению, терморегулятор не работает, а так как при этом мощность печи остается постоянной (тепловые потери ее в первом предположении также можно считать постоянными), то, следовательно, мы будем иметь дело с режимом нагрева при постоянном тепловом потоке.

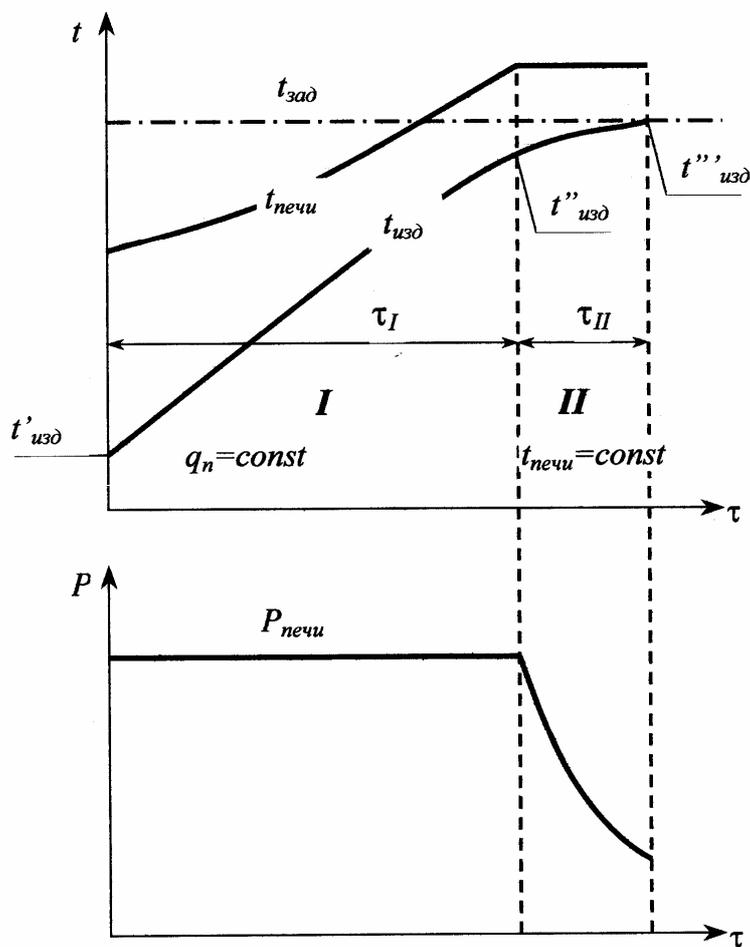


Рис. 7. График нагрева тонкого изделия в электрической печи периодического действия

Значение этого теплового потока легко определяется из формулы

$$q_{II} = (P_{\text{печи}} - P_{\text{пот}}) \frac{1}{F_{\text{изд}}}, \quad (2.1)$$

где  $q_{\text{п}}$  – постоянный тепловой поток, воспринимаемый единицей поверхности нагреваемых изделия, Вт/м<sup>2</sup>;

$P_{\text{печи}}$  – мощность печи, Вт;

$P_{\text{пот}}$  – мощность тепловых потерь печи, Вт;

$F_{\text{изд}}$  – тепловоспринимающая поверхность изделий, м<sup>2</sup>.

Если речь идет о высокотемпературной печи, то влиянием естественной конвекции в ней можно пренебречь, и уравнение теплопередачи будет иметь вид

$$q_{\text{п}} = c_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.2)$$

здесь  $T_{\text{печи}}$  и  $T_{\text{изд}}$  – текущие значения температур печи и изделия, К;  $c_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент лучеиспускания, Вт/м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>.

Так как изделие находится в камере печи и его поверхность обычно намного меньше поверхности стен последней, то

$$c_{\text{пр}} = \frac{5,76}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{изд}}} + \frac{F_{\text{изд}}}{F_{\text{печи}}} \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{печи}}} - 1 \right)}, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4). \quad (2.3)$$

Степени черноты стен печной камеры и нагреваемых изделий ( $\varepsilon_{\text{печи}}$ ,  $\varepsilon_{\text{изд}}$ ) близки к 0,9,  $F_{\text{изд}}$  существенно меньше  $F_{\text{печи}}$ , поэтому во многих случаях с достаточной для практических целей точностью можно принять, Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>),

$$c_{\text{пр}} = 5,76\varepsilon_{\text{изд}} = c_{\text{изд}}. \quad (2.4)$$

В тех же случаях, когда значения  $F_{\text{изд}}$  и  $F_{\text{печи}}$  близки друг к другу, приведенный коэффициент лучеиспускания, Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>),

$$c_{\text{пр}} = \frac{5,76}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{изд}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{печи}}} - 1}. \quad (2.5)$$

Конец первого и начало второго этапа характеризуются достижением заданного значения температуры рабочего пространства. При этом для

тонких изделий их температура в соответствии с (2.2) может быть определена, °С,

$$t_{\text{изд}} = 100 \sqrt[4]{\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100}\right)^4 - \frac{q_{\text{п}}}{c_{\text{пр}}} - 273}. \quad (2.6)$$

Количество тепла, воспринятое изделием за период первого этапа, будет равно:  $q_{\text{п}} F_{\text{изд}} \tau_1$ , где  $\tau_1$  – длительность первого этапа. Это тепло пойдет на нагрев изделий от начальной температуры  $t'_{\text{изд}}$  до  $t''_{\text{изд}}$ , поэтому можно написать

$$q_{\text{п}} F_{\text{изд}} \tau_1 = G c (t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}})$$

и, следовательно,

$$\tau_1 = \frac{G c (t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}})}{q_{\text{п}} F_{\text{изд}}}, \quad (2.7)$$

здесь  $G$  – масса изделий, кг;  $c$  – средняя удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С).

Для низкотемпературных печей и для печей с принудительной циркуляцией необходимо учитывать конвекцию, поэтому уравнение теплопередачи удобнее переписать в иной форме

$$q_{\text{п}} = (\alpha_{\text{изл}} + \alpha_{\text{конв}}) (t_{\text{печи}} - t_{\text{изд}}). \quad (2.8)$$

Здесь  $q_{\text{п}}$  – может быть определен из (2.1);  $\alpha_{\text{изл}}$  – коэффициент теплоотдачи излучением, может быть определен из формулы

$$\alpha_{\text{изл}} = c_{\text{пр}} \frac{\left[ \left(\frac{T_{\text{печи}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}}{100}\right)^4 \right]}{t_{\text{печи}} - t_{\text{изд}}}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}. \quad (2.9)$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_{\text{конв}}$  может быть рассчитан в зависимости от характера конвекции. В печах с естественной конвекцией он меняется сравнительно мало и может быть в среднем принят равным  $10 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ . Учитывая это для момента времени, соответствующего достижению температурой печи заданного значения  $T''_{\text{печи}}$ , будем иметь

$$q_{\text{п}} = c_{\text{пр}} \left[ \left(\frac{T''_{\text{печи}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}}{100}\right)^4 \right] + 10 (t''_{\text{печи}} - t''_{\text{изд}}). \quad (2.10)$$

Выражение (2.10) действительно, если поверхности изделий, воспринимающие тепло излучением и конвекцией, равны, что обычно имеет место для тонких изделий.

Из (2.10) может быть определена температура изделия в момент окончания регулярного режима  $T''_{\text{изд}}$ .

Длительность первого этапа  $\tau_1$  может быть определена, как и раньше, из (2.7).

По достижении печью заданного значения температуры начинает работать терморегулятор, поддерживая ее неизменной, мощность печи при этом начинает снижаться. В течение второго этапа работы, следовательно, изделия нагреваются при постоянной температуре печи (см. рис. 7).

Длительность второго этапа может быть определена по формуле Б.В. Старка

$$\tau_2 = \frac{Gc}{F_{\text{изд}}c_{\text{пр}}} \frac{100}{\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100}\right)^2} \left[ \Psi\left(\frac{T''_{\text{изд}}}{T_{\text{печи}}}\right) - \Psi\left(\frac{T''_{\text{изд}}}{T_{\text{печи}}}\right) \right]. \quad (2.11)$$

Здесь  $T''_{\text{изд}}$  – абсолютная температура изделий в начале второго периода нагрева,  $K$ ;  $T'''_{\text{изд}}$  – в его конце. Если весь нагрев протекает при постоянной температуре печи,  $T''_{\text{изд}}$  будет представлять собой абсолютную температуру изделий в начале нагрева, а  $T'''_{\text{изд}}$  – в его конце.

Значения функции  $\Psi(T_{\text{изд}}/T_{\text{печи}})$  определяют из формулы

$$\Psi(Y) = \frac{1}{4} \ln \frac{1+Y}{1-Y} + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} Y, \quad (2.12)$$

где  $Y$  – аргумент функции,  $Y = \frac{T_1}{T_2}$  или по таблице в приложении.

По (2.11), задавшись значением  $T''_{\text{изд}}$  – окончательной температурой нагрева, можно получить необходимое для этого время  $\tau_2$ , или, наоборот, задавшись временем  $\tau_2$ , определить  $\Psi\left(T''_{\text{изд}}/T_{\text{печи}}\right)$  и по формуле (2.12), соответствующее этой функции значение  $T''_{\text{изд}}$ .

Для низкотемпературных печей и для печей с принудительной циркуляцией воздуха  $\tau_2$  может быть рассчитана по другой формуле Б.В. Старка

$$\tau_2 = \frac{Gc}{\alpha F_{\text{изд}}} \ln \left( \frac{t_{\text{печи}} - t''_{\text{изд}}}{t_{\text{печи}} - t'''_{\text{изд}}} \right). \quad (2.13)$$

В (2.13)  $t'_{\text{изд}}$  и  $t''_{\text{изд}}$  – температуры изделий в начале и конце рассматриваемого периода известны так же, как и температура печи –  $t_{\text{печи}}$ , неизвестным остается для определения  $\tau_2$  значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha = \alpha_{\text{изл}} + \alpha_{\text{конв}}$ . Последнее следует определять как среднее арифметическое из значений, а для начала и конца периода, когда  $t_{\text{изд}} = t''_{\text{изд}}$  и  $t_{\text{изд}} = t'_{\text{изд}}$  соответственно. Значения  $\alpha_{\text{изл}}$  для этих моментов времени могут быть вычислены из (2.9), а  $\alpha_{\text{конв}}$  приняты в первом приближении, равными  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

### Нагрев массивных изделий

При нагреве массивных изделий в печах периодического действия время нагрева изделий, как и в предыдущем случае, может быть разбито на два этапа: первый этап – нагрев при постоянном тепловом потоке – и второй этап – нагрев при постоянной температуре печи.

На первом этапе изделия будут нагреваться тепловым потоком  $q_{\text{п}}$ , который определяется по (2.1) В течение времени  $\tau' = 0,3S^2/a$  для бесконечной пластины толщиной  $2S$  и  $\tau^1 = 0,25R^2/a$  для бесконечного цилиндра радиуса  $R$  будет длиться начальный период нагрева, к концу этого периода в изделии установится регулярный режим, характеризующийся постоянным внутренним температурным перепадом, равным  $\Delta t_1 = q_{\text{п}}R/2\lambda$  для пластины и  $\Delta t_1 = q_{\text{п}}R/2\lambda$  для цилиндра (рис. 8). К концу начального и к началу регулярного периода нагрева температура поверхности пластины достигнет  $t'_{\text{пов}} = 1,27\Delta t = 1,27q_{\text{п}}S/2\lambda$ , а температура центра  $t'_{\text{центр}} = 0,27\Delta t = 0,27q_{\text{п}}S/2\lambda$ , аналогично для цилиндра  $t'_{\text{пов}} = 1,5\Delta t = 1,5q_{\text{п}}R/2\lambda$  и  $t'_{\text{центр}} = 0,5\Delta t = 0,5q_{\text{п}}R/2\lambda$ .

В дальнейшем во время нагрева в регулярном режиме температуры поверхности и центра изделия будут увеличиваться пропорционально времени с постоянной скоростью,  $\theta \text{ } ^\circ\text{C}/\text{ч}$ ,

$$\Theta = t_{\text{пов}_{\tau+1}} - t_{\text{пов}_{\tau}} = \frac{q_{\text{п}}}{c\rho S} \quad (2.14)$$

$$\text{и } \tau'' = \frac{t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}}{\Theta} = \frac{t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}}{q_n} c\rho S \quad \text{для пластины.}$$

Аналогично этому

$$\tau'' = \frac{t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}}{\Theta} = \frac{t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}}{2q_{\text{п}}} c_{\text{p}} R \quad \text{для цилиндра.}$$

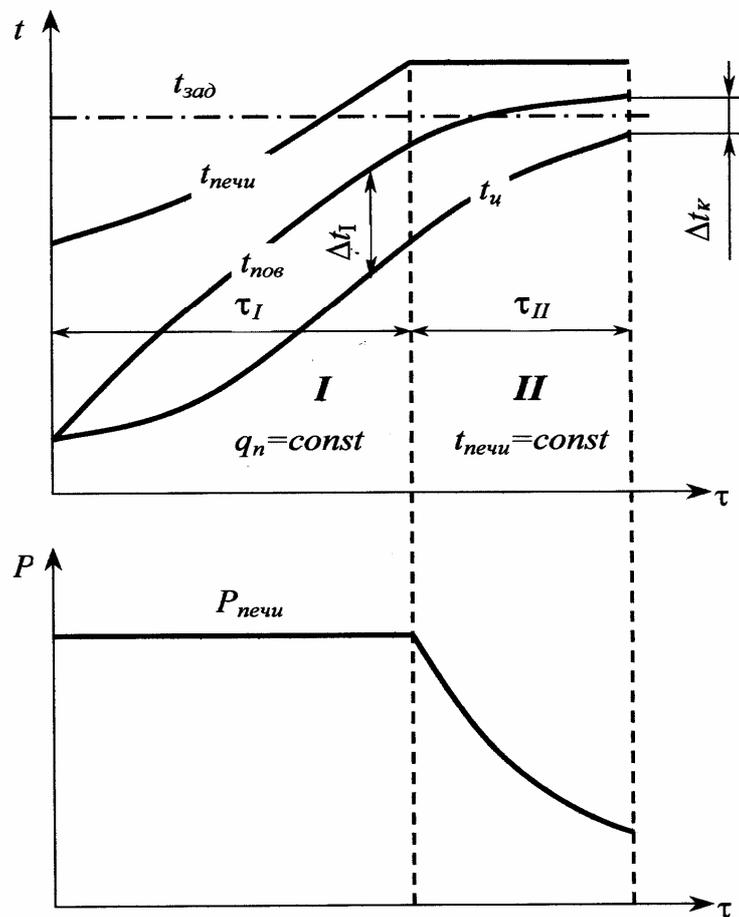


Рис. 8. График нагрева массивного изделия в электрической печи периодического действия

Отсюда длительность первого этапа нагрева для бесконечной пластины выразится выражением, с,

$$\tau_1 = \tau' + \tau'' = 0,3 \frac{S^2}{a} + \frac{c_{\text{p}} S}{q_{\text{п}}} (t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}) \quad (2.15)$$

и для бесконечного цилиндра

$$\tau_1 = \tau' + \tau'' = 0,25 \frac{R^2}{a} + \frac{c_{\text{p}} R}{q_{\text{п}}} (t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}}). \quad (2.16)$$

Здесь температура поверхности изделия к концу первого этапа в соответствии с (2.6) может быть определена из формулы, °С,

$$t''_{\text{пов}} = 100 \sqrt[4]{\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100}\right)^4 - \frac{q_{\text{п}}}{c_{\text{пр}}} - 273}. \quad (2.17)$$

По достижении температурой поверхности изделия значения  $t''_{\text{пов}}$  закончится первый этап, так как при этом температура печи достигнет заданного значения  $T_{\text{печи}}$  и в дальнейшем благодаря работе терморегулятора останется неизменной, начнется второй этап нагрева при постоянной температуре печи. К этому моменту температура центра изделия станет равной  $t''_{\text{центр}} = t''_{\text{пов}} - \Delta t$ , а по сечению его установится параболическое (для плиты) распределение температуры. Расчет нагрева на втором этапе должен, очевидно, вестись с учетом этого распределения температуры в начальный период этапа. Это легко выполнить, если принять для этого момента в сечении изделия наличие некоторой средней температуры  $T''_{\text{ср}}$ . Она может быть принята равной  $t''_{\text{ср}} = t''_{\text{пов}} - 0,7\Delta t$  для бесконечной плиты и  $t''_{\text{ср}} = t''_{\text{пов}} - 0,6\Delta t$  для бесконечного цилиндра. В этом случае время нагрева на втором этапе до заданной температуры  $T'''$  может быть рассчитано для массивных изделий с использованием графиков Бунина (прил., рис. I – IV) с тем лишь, однако, изменением, что относительные температуры будут

$$\Theta_{\text{пов}} = \frac{t_{\text{печи}} - t'''_{\text{пов}}}{t_{\text{печи}} - t'''_{\text{ср}}} \quad \text{и} \quad \Theta_{\text{центр}} = \frac{t_{\text{печи}} - t'''_{\text{центр}}}{t_{\text{печи}} - t'''_{\text{ср}}}.$$

Значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , подставляемые в число Био, при расчете времени нагрева массивных изделий во втором этапе следует брать равными средним значениям из соответствующих коэффициентов для температур  $t''_{\text{пов}}$  и  $t'''_{\text{пов}}$ . Если нагрев при постоянной температуре печи осуществляется от нуля (или близкой к нулю температуры), то значения  $\alpha$  следует брать по рис. V (прил.).

### Задание № 2.1

Расчет времени нагрева теплотехнически тонких изделий в электрической камерной печи.

Исходные данные для расчета (общая часть):

- мощность печи  $P_{\text{печи}}$ , кВт;
- мощность холостого хода печи  $P_{\text{печи}}$ , кВт;
- габаритные размеры изделий, мм;
- количество изделий, шт.;
- конечная температура нагрева изделий  $t_{\text{изд}}$ , °С;
- материал изделия;
- характеристика материала: односторонний, двухсторонний и проч.

### Пример выполнения задания № 2.1

В электрической камерной печи мощностью 25 кВт производится нагрев шести стальных слитков размером 700x100x100 мм до 860 °С. Слитки укладывают в печь в один ряд вплотную, нагрев – двусторонний, температура печи 900 °С, коэффициент теплопроводности стали  $\lambda_{ст} = 34,9$  Вт/(м °С), удельная теплоемкость  $c_{ст} = 0,67 \cdot 10^3$  Дж/(кг·°С), мощность холостого хода печи 5 кВт. Определить время нагрева загрузки.

Итак, имеем:

$$S = 0,5 \text{ м};$$

$$F_{изд} = 2 \cdot 0,7 \cdot 6 \cdot 0,1 = 0,84 \text{ м}^2;$$

$$G_{изд} = 7 \div 0,7 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot 6 = 0,328 \text{ т} = 328 \text{ кг}.$$

$$\text{Первый этап нагрева согласно (2.1) } q_{п} = \frac{25 - 5}{0,84} \cdot 10^3 = 23\,800 \text{ Вт/м}^2.$$

Принимая  $\varepsilon$  стали равным 0,8,  $\varepsilon$  нагревателя и футеровки – 0,9, отношение поверхности изделия  $F_{изд}$  к внутренней поверхности камеры печи, участвующей в теплообмене, – 1 : 3, определяем по (2.3)

$$c_{пр} = \frac{5,76}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{3} \left( \frac{1}{0,9} - 1 \right)} = 4,48 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4;$$

по (2.4)

$$c_{пр} = 5,76 \cdot 0,8 = 4,61, \text{ разница } 3\% ;$$

по (2.6)

$$t_{изд}'' = 100 \sqrt[4]{\left( \frac{900 + 273}{100} \right)^4 - \frac{23800}{4,48}} - 273 = 807 \text{ °С}.$$

Следовательно, первый этап – нагрев изделий при постоянном удельном тепловом потоке – длится до 807 °С.

Определяем коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  для температур изделий 0 и 807 °С.

В начальный момент нагрева температура печи упадет по (2.2) до

$$t_{печи}' = 100 \sqrt[4]{\frac{273}{100} + \frac{23800}{4,48}} - 273 = 583 \text{ °С};$$

по (2.9)

$$\alpha_{583-0} = 4,48 \frac{\left( \frac{583 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{273}{100} \right)^4}{583 - 0} = 40,8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)};$$

$$\alpha_{900-807} = 4,48 \frac{\left(\frac{900+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{807+273}{100}\right)^4}{900-807} = 257 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}).$$

Отсюда число Био  $Bi = \frac{149}{34,9} \cdot 0,05 = 0,212 < 0,25$ ; следовательно, име-

ет место нагрев тонких изделий.

Время нагрева изделий до  $807^\circ\text{С}$  при постоянном удельном тепловом потоке в  $23800 \text{ Вт}/\text{м}^2$  по (2.7).

$$\tau_1 = \frac{328 \cdot 0,67 \cdot 10^3 \cdot (807 - 0)}{23800 \cdot 0,84 \cdot 3600} = 2,464$$

Второй этап нагрева – от  $807$  до  $860^\circ\text{С}$ ,

$$t_{\text{печи}} = \text{const} = 900^\circ\text{С}.$$

Коэффициенты теплоотдачи при  $807$  и  $860^\circ\text{С}$ :

$$\alpha_{900-807} = 257 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С};$$

$$\alpha_{900-860} = 275 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С};$$

$$\alpha_{\text{ср}} = 266 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}.$$

Отсюда  $Bi = \frac{266 \cdot 0,5}{34,9} = 0,38$ . Это переходная область, в которой изделия

можно считать практически тонкими. Расчет времени нагрева ведем по (2.11):

$$\begin{aligned} \tau_2 &= \frac{328 \cdot 0,67 \cdot 10^3}{4,48 \cdot 0,84} \cdot \frac{100}{\left(\frac{1173}{100}\right)^3} \left[ \Psi\left(\frac{860+273}{900+273}\right) - \Psi\left(\frac{807+273}{900+273}\right) \right] = \\ &= 3618 \left[ \Psi(0,966) - \Psi(0,921) \right] = 3618(1,39 - 1,17) = 3618 \cdot 0,22 = 796_{\text{с}} = \\ &= 0,221 \text{ ч}. \end{aligned}$$

Здесь значения функции  $\psi$  определены по формуле (2.12).

Общее время нагрева  $\tau = \tau_1 + \tau_2 = 2,46 + 0,221 = 2,68 \text{ ч}$ .

Следует иметь в виду, что в первый этап нагрева температура камеры печи в действительности не упадет до  $585^\circ\text{С}$  благодаря накопленному в кладке теплу, которое в начале нагрева частично перейдет в изделия и тем самым обеспечит больший, чем  $23,8 \text{ кВт}/\text{м}^2$ , удельный тепловой поток. Однако при загрузке и выгрузке изделий печь обычно дополнительно охлаждается, снижая свою температуру, поэтому фактическое время нагрева слитков до  $860^\circ\text{С}$  будет весьма близким к расчетному –  $2,7 \text{ ч}$ .

### Задание № 2.2

Расчет времени нагрева теплотехнически массивных изделий в электрической печи.

Исходные данные для расчета (общая часть):

- масса слитка, кг;
- количество слитков, загружаемых в печь, шт.;
- конечная температура нагрева изделия изделия, °С;
- габаритные размеры слитков, мм;
- допустимый температурный переход в слитках,  $\Delta t_{\max}$  ;
- производительность нагрева, шт./час; шт./сутки.

### Пример выполнения задания № 2.2

Рассчитать время нагрева под термическую обработку слитков из специальной стали диаметром 400 мм, длиной 2000 мм. Температурный режим состоит из нагрева до  $(950 \pm 10)$  °С. В период нагрева температурный перепад в слитках не должен превышать  $\Delta t_{\max} = 50$  °С. Теплопроводность материала  $\lambda = 41,9$  Вт/(м·°С), удельная теплоемкость  $c = 0,63 \cdot 10^3$  Дж/(кг·°С). Производительность нагрева – три слитка в сутки. Масса слитка 1960 кг.

Исходя из анализа геометрических размеров слитков, принимаем вертикальное расположение в печи. Так как по заданию производительность установки невелика, то наиболее подходящим типом печи является шахтная цилиндрическая электрическая печь, рассчитанная на одновременный нагрев одного слитка.

Определяем время нагрева слитка.

Температуру печи принимаем 1 000 °С.

По формуле (2.2) с учетом (2.3) получим

$$q_{\text{п}} = \frac{5,76}{\frac{1}{0,8} + 0,5 \left( \frac{1}{0,9} - 1 \right)} \left[ \left( \frac{1273}{100} \right)^4 - \left( \frac{1083}{100} \right)^4 \right] = 55100 \text{ Вт/м}^2.$$

Здесь приняли в первом приближении, что  $F_{\text{изд}} / F_{\text{печи}} \approx 0,5$ , а температура изделий в конце первого периода равна 0,85 конечной температуры:

$$T''_{\text{пов}} = 0,8 \cdot 950 \approx 810 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ или } 1083 \text{ K.}$$

Определяем максимальный допустимый удельный тепловой поток  $q_{\text{п}}$  из условий  $\Delta T_{\text{макс}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$q_{\text{п}} = \frac{\Delta t \cdot 2\lambda}{R} = \frac{50 \cdot 2 \cdot 41,9}{0,2} = 20950 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура поверхности изделия к концу этапа нагрева при  $q_{\text{п}} = \text{const}$  по (2.6)

$$t''_{\text{пов}} = 100^4 \sqrt[4]{\left(\frac{1273}{100}\right)^4 - \frac{20950}{4,41}} - 273 = 938 \text{ }^\circ\text{C};$$

здесь

$$c_{\text{пр}} = \frac{5,76}{\frac{1}{0,8} + 0,5 \left( \frac{1}{0,9} - 1 \right)} = 4,41.$$

Время нагрева слитка до  $t_{\text{пов}} = 938 \text{ }^\circ\text{C}$  согласно (2.16)

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 0,25 \frac{(0,2)^2}{8,53 \cdot 10^{-6} \cdot 3600} + \frac{0,63 \cdot 10^3 \cdot 7800 \cdot 0,2(938 - 73 \cdot 5)}{2 \cdot 20950 \cdot 3600} = \\ &= 0,33 + 5,63 = 5,96, \end{aligned}$$

где коэффициент температуропроводности изделия

$$a = \frac{41,9}{0,63 \cdot 10^3 \cdot 7800} = 8,53 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с.}$$

Считая, что начальная температура изделия составляла  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , получаем, что температура поверхности изделий к моменту начала регулярного режима достигнет значения

$$1,27 \cdot 50 + 10 = 73,5 \text{ }^\circ\text{C};$$

температура на его оси

$$0,27 \cdot 50 + 10 = 23,5 \text{ }^\circ\text{C};$$

температура на его оси к моменту окончания регулярного режима

$$938 - 50 = 886 \text{ }^\circ\text{C};$$

а средняя температура по сечению слитка к этому моменту

$$938 - 0,6 \cdot 50 = 908 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Через 5,96 ч в печи будет достигнута температура 1000 °С, сработает терморегулятор и начнется второй этап нагрева при  $t_{\text{печи}} = \text{const}$ .

Определяем время нагрева слитка при  $t_{\text{печи}} = \text{const}$  до достижения его поверхностью максимальной допустимой температуры

$$t_{\text{пов.макс}} = 950 + 10 = 960 \text{ } ^\circ\text{C},$$

считая его бесконечным цилиндром.

При начале нагрева  $t_{\text{печи}} = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{пов}} = 938 \text{ } ^\circ\text{C}$  по (2.9)

$$\alpha_{938} = 338 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

В конце нагрева  $t_{\text{печи}} = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{пов}} = 960 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

$$\alpha_{960} = 347 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Среднее значение коэффициента теплоотдачи

$$a_{\text{ср}} = 343 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\Theta_{\text{пов}} = \frac{1000 - 960}{1000 - 908} = 0,43;$$

$$Bi = \frac{343}{41,9} \cdot 0,2 = 1,66.$$

С учетом этих данных по графикам нагрева поверхности цилиндра (прил., рис. III) определяем критерий Фурье:

$$F_0 = 0,225, \text{ откуда}$$

$$\tau_2 = \frac{0,225 \cdot 0,2^2}{8,53 \cdot 10^{-6} \cdot 3600} = 0,293 \text{ ч.}$$

Для  $F_0 = 0,225$  по графику нагрева центра цилиндра (прил., рис. IV) находим  $\Theta_{\text{центр}} = 0,77$ , откуда

$$t_{\text{центр}} = 1000 - (1000 - 908)0,77 = 929 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Как видим, перепад чересчур велик ( $960 - 929 = 31 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), поэтому необходимо снизить температуру печи (задаваемую терморегулятору), например до 980 °С, чтобы замедлить процесс нагрева поверхности изделия и дать время для выравнивания температуры в его толще.

При этом будем иметь при  $q_{II}=20950 \text{ Вт/м}^2$

$$t_{\text{пов}}^{\prime\prime} = 100^4 \sqrt[4]{\left(\frac{1253}{100}\right)^4 - \frac{20950}{4,41}} - 273 = 915 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Время нагрева вала до температуры  $915 \text{ }^\circ\text{C}$  в этом случае

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 0,25 \frac{0,2}{8,53 \cdot 10^{-6} \cdot 3600} + \frac{0,63 \cdot 10^3 \cdot 7800 \cdot 0,2(915 - 73,5)}{2 \cdot 20950 \cdot 3600} = \\ &= 0,33 + 5,48 = 5,81 \text{ ч.} \end{aligned}$$

Средняя температура вала к моменту окончания первого периода нагрева

$$t_{\text{ср}} = 915 - 0,6 \cdot 50 = 885 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При  $t_{\text{печи}} = 980 \text{ }^\circ\text{C} = \text{const}$

$$\alpha_{900} = 339 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\alpha_{\text{ср}} = 330 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Theta_{\text{пов}} = \frac{980 - 960}{980 - 885} = 0,21;$$

$$Bi = \frac{330 \cdot 0,2}{41,9} = 1,58.$$

Отсюда вторично получаем

$$F_0 = 0,55; \quad \tau_2 = \frac{0,55 \cdot 0,2^2}{8,53 \cdot 10^{-6} \cdot 3600} = 0,724.$$

При  $F_0 = 0,55$  определяем  $\theta_{\text{центр}} = 0,38$  и  $T_{\text{центр}} = 980 - (980 - 885) 0,38 = 944 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Итак, через  $0,72$  ч температурный перепад по сечению изделия достигнет  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ , т. е. будет в пределах допустимого ( $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

$\tau_1 + \tau_2 = 5,81 + 0,72 = 6,5 \text{ ч}$  – это полное время нагрева изделия.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

*Рис. I. График для расчета нагрева или охлаждения поверхности пластины*

*Рис. II. График для расчета нагрева или охлаждения средней плоскости пластины*

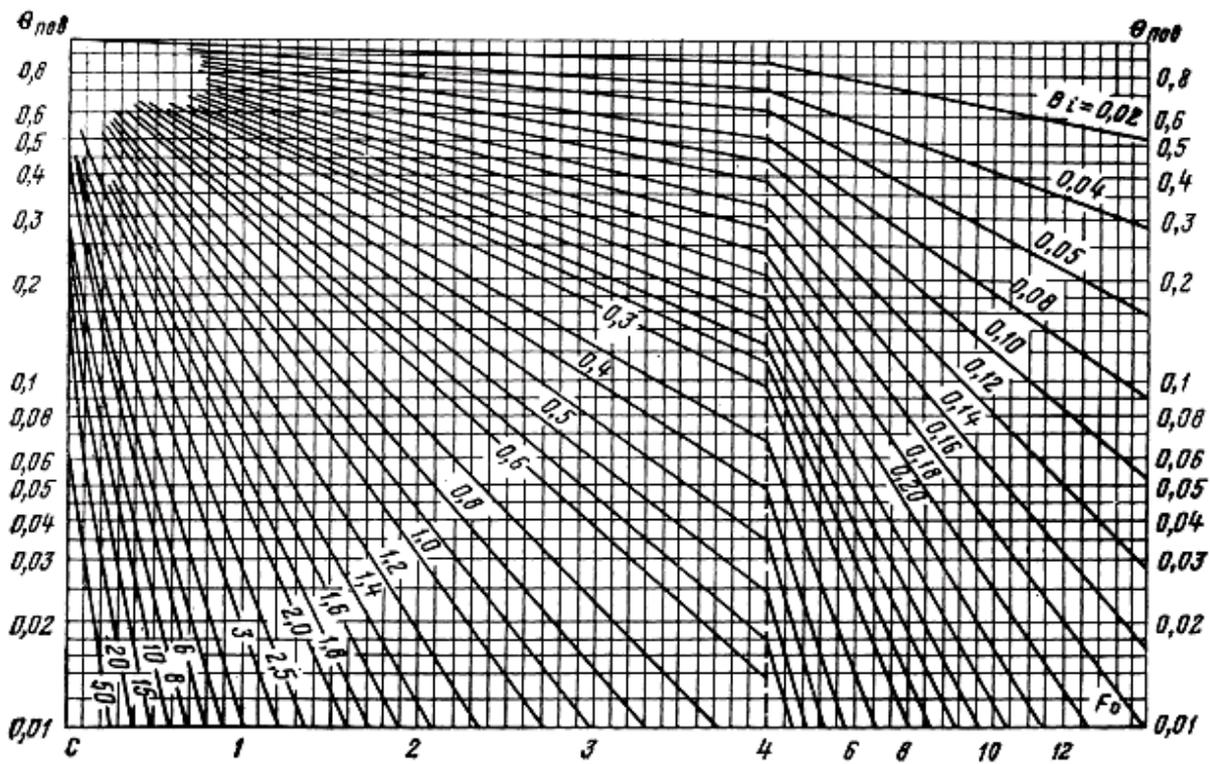


Рис. III. График для расчета нагрева или охлаждения поверхности цилиндра

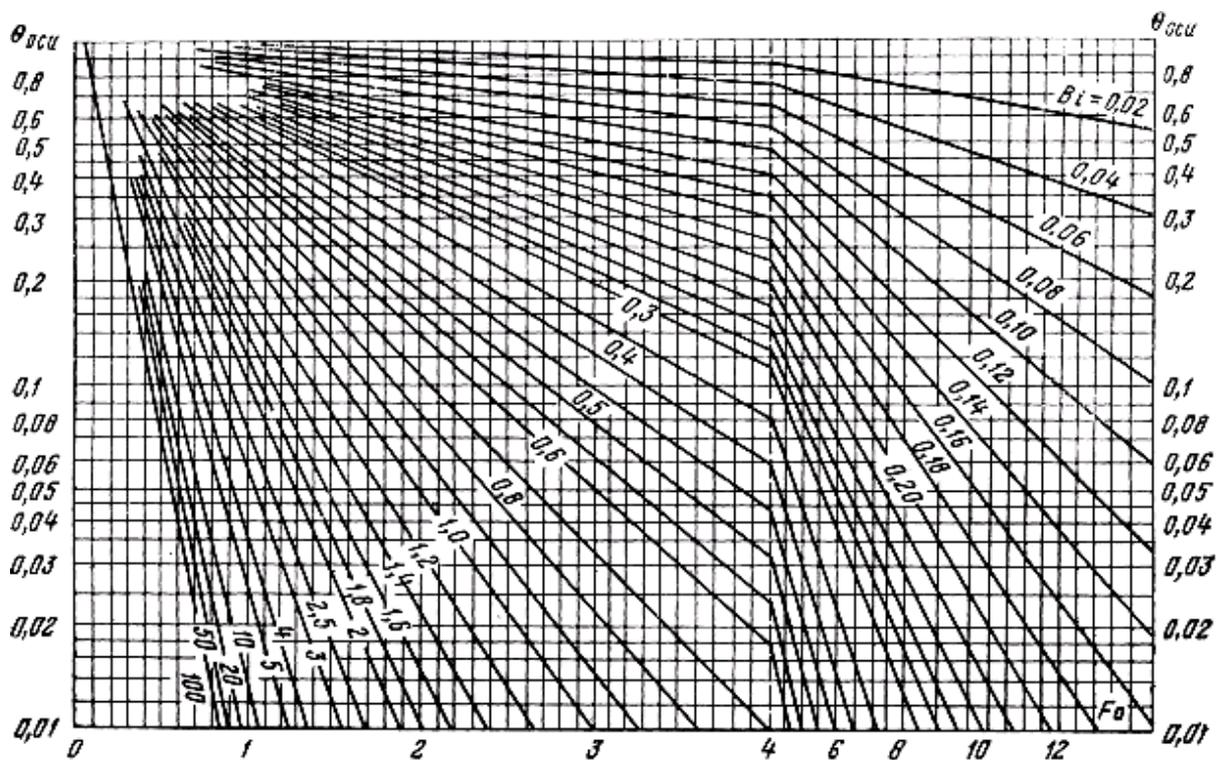


Рис. IV. График для расчета нагрева или охлаждения оси цилиндра

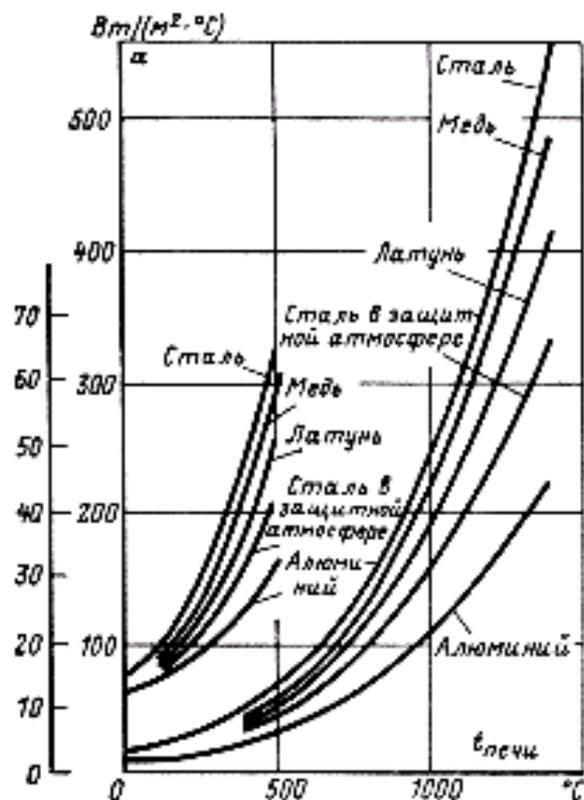


Рис. V. Зависимость среднего коэффициента теплопередачи в печи от ее температуры при нагреве от 0 °С

Таблица

Значения функции  $\Psi(Y)$

Y	$\Psi(Y)$	Y	$\Psi(Y)$	Y	$\Psi(Y)$	Y	$\Psi(Y)$
0,20	0,2000	0,50	0,5066	0,80	0,8864	0,990	1,713
0,22	0,2200	0,52	0,5277	0,82	0,9224	0,992	1,770
0,24	0,2402	0,54	0,5497	0,84	0,9599	0,994	1,842
0,26	0,2602	0,56	0,5718	0,86	1,0020	0,996	1,944
0,28	0,2803	0,58	0,5938	0,88	1,0389	0,998	2,117
0,30	0,3005	0,60	0,6166	0,90	1,1332	0,999	2,293
0,32	0,3207	0,62	0,6400	0,91	1,1659	0,9995	2,465
0,34	0,3409	0,64	0,6639	0,92	1,2046	—	—
0,36	0,3612	0,66	0,6882	0,93	1,2461	—	—
0,38	0,3816	0,68	0,7132	0,94	1,2463	—	—
0,40	0,4022	0,70	0,7389	0,95	1,2959	—	—
0,42	0,4226	0,72	0,7655	0,96	1,3563	—	—
0,44	0,4434	0,74	0,7936	0,97	1,431	—	—
0,46	0,4642	0,76	0,8229	0,98	1,537	—	—
0,48	0,4854	0,78	0,8558	0,985	1,612	—	—

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Metallurgical heat engineering: in 2 vols. / ed. V. A. Krivandin. – M.: Metallurgy, 1986. – T.1. – 271 p.; T.2. – 258 p.
2. Metallurgical heat engineering: in 2 vols. / ed. M. A. Glinkova. – M.: Metallurgy, 1974. – T.1. – 671 p.; T.2. – 650 p.
3. Krivandin, V. A. Metallurgical furnaces / V. A. Krivandin, B. A. Markov. – M.: Metallurgy, 1977. – 463 p.
4. Minaev, A. N. Casting furnaces and dryers / A. N. Minaev, B. I. Shipilin. – M.: Mashgiz, 1959.
5. Methodical instructions for practical classes in the discipline «Casting furnaces and dryers» / V. N. Sharshin. – Vladimir: VVGU, 2000. – 36 p.
6. Methodical instructions for laboratory work in the discipline «Casting furnaces» / V. N. Sharshin. – Vladimir: VVGU, 2001. – 28 p.
7. Methodical instructions for course work in the discipline «Casting furnaces» / V. N. Sharshin. – Vladimir: VVGU, 2002. – 20 p.
8. Sventchanskiy, A. D. Electric industrial furnaces / A. D. Sventchanskiy. – 2nd ed., revised. – M.: Energiya, 1975. – 384 p.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
Практическая работа № 1. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ВЫВОДА ГАЗОВ ИЗ МЕТОДИЧЕСКОЙ ТОПЛИВНОЙ ПЕЧИ .....	4
<i>Задание № 1.1.</i> Определение суммарных потерь напора на пути движения продуктов горения по дымовому тракту от рабочего пространства методической печи до дымовой трубы .....	6
Пример выполнения задания № 1.1 .....	6
<i>Задание № 1.2.</i> Определение высоты и основных параметров дымовой трубы .....	12
Пример выполнения задания № 2 .....	13
<i>Задание № 1.3.</i> Расчет эжектора для удаления продуктов горения из методической нагревательной печи .....	16
Пример выполнения задания № 1.3 .....	17
Практическая работа № 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ИЗДЕЛИЙ В ПЕЧАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ .....	19
Нагрев тонких изделий .....	21
Нагрев массивных изделий .....	26
<i>Задания № 2.1.</i> Расчет времени нагрева теплотехнически тонких изделий в электрической камерной печи .....	28
Пример выполнения задания № 2.1 .....	29
<i>Задания № 2.2.</i> Расчет времени нагрева теплотехнически массивных изделий в электрической печи .....	31
Пример выполнения задания № 2.2 .....	31
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	35
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	38

## ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания к практическим занятиям

Составитель

ШАРШИН Владимир Николаевич

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор В.А. Кечин

Редактор Е.В. Невская

Корректор В.В. Гурова

Компьютерная верстка Е.Г. Радченко

ЛР № 020275. Подписано в печать 21.06.05.

Формат 60×84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.

Печать на ризографе. Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 2,41. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.