

Владимирский государственный университет

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
"ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
И АГРЕГАТЫ"**

Владимир 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)
Институт машиностроения и автомобильного транспорта
Кафедра технологии функциональных и конструкционных материалов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
"ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И АГРЕГАТЫ"

Составитель
В.Н.ШАРШИН

Владимир 2021

УДК 621.74.002.3:669.018.28

Рецензент
Кандидат технических наук, доцент Владимирского
государственного университета
А.В.Жданов

Переработанные и дополненные Методические указания к
практическим работам по дисциплине "Тепловые процессы и агрегаты"
/Владим. гос. ун-т; Сост. В.Н.Шаршин. Владимир, 2021. 46 с.

Изложено содержание практических работ по расчётам тепловых процессов и агрегатов: приведены методики расчёта процессов вывода газов из методической топливной печи, а также методики расчётов тепловых режимов нагрева теплотехнически массивных и тонких тел. Даны рекомендации по составлению отчетов и организации работы в лаборатории.

Составлены в соответствии с учебными планами подготовки бакалавров по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Табл. 9. Ил. 2. Библиогр.: 11 назв.

УДК 621.74.002.3:669.018.28

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление.....	4
Общие организационные положения.....	5
Практическая работа № 1. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ВЫВОДА ГАЗОВ ИЗ МЕТОДИЧЕСКОЙ ТОПЛИВНОЙ ПЕЧИ.....	6
<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.....	8
Пример выполнения задания № 1.1.....	9
<i>Задание № 1.2.</i> Определение высоты и основных параметров дымовой трубы.....	13
Пример выполнения задания № 1.2.....	14
<i>Задание № 1.3.</i> Расчет эжектора для удаления продуктов горения из методической нагревательной печи	17
Пример выполнения задания № 1.3.....	18
Практическая работа № 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ИЗДЕЛИЙ В ПЕЧАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ.....	21
Задания № 2.1. Расчет времени нагрева теплотехнически тонких изделий в электрической камерной печи	22
Задания № 2.2. Расчет времени нагрева теплотехнически массивных изделий в электрической камерной печи.....	27
Пример выполнения задания № 2.1.....	29
Пример выполнения задания № 2.2.....	31
ПРИЛОЖЕНИЕ	36
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	39

ОБЩИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Практические занятия по дисциплине «Тепловые процессы и агрегаты» вместе с циклом лекций и лабораторными работами являются непременной составной частью одноименного курса и предназначены для студентов направления 22.03.01.

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».

Цель освоения дисциплины - изучение основ тепловых процессов в производстве металлических и неметаллических материалов, реализуемых в тепловых агрегатах.

Задачи освоения дисциплины:

- знать основные закономерности процессов генерации и переноса теплоты и движения газов применительно к технологическим агрегатам чёрной и цветной металлургии;

- уметь рассчитывать и анализировать процессы горения топлива и тепловыделения, внешнего и внутреннего теплообмена в печах различного технологического назначения, выбирать рациональные температурные и тепловые режимы работы металлургических печей;

- владеть навыками проектирования и расчёта металлургических печей различного технологического назначения.

В ходе выполнения изучения дисциплины у студентов будут закреплены следующие общепрофессиональные компетенции: ПК-3и ПК-5.

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 разряжения, 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 $B_{заг} = 0,35$ м;
- высота $H_{заг} = 0,15$ м.

Размеры камеры рекуператора:

- ширина $\xi_{рек} = 1,4$ м;
- высота $H_{рек} = 2,5$ м.

Число вертикальных каналов дымохода $n = 3$ шт. Коэффициент трения газа о кирпичные стенки канала $X = 0,05$. Потери энергии в рекуператоре $H_{рек} = 132,725$ Н/м².

В расчетах принимаем постоянными следующие величины:

- плотность продуктов горения $\rho_{пр} = 1,28$ кг/м³ ;
- температура окружающего воздуха $T_{в} = 293$ К;
- плотность воздуха при нормальных условиях $T_0 = 273$ К, $P_{в} = 101,3$ кН/м², $\rho_{в} = 1,29$ кг/м³ ;
- скорость движения газов в вертикальных каналах и боровых $\omega_{г} = 2,5$ м/с.

Индивидуальные исходные данные

Параметр дымового тракта	Вариант 7
Количество продуктов горения, продвигающихся по каналам дымового тракта, в единицу времени, V , м ³ /ч	21000
Температура продуктов горения в конце печи, $T_{печи}$, К	1223
Температура продуктов горения в вертикальных каналах, $T_{верт}$, К	1198
Падение температуры дыма в рекуператоре, $\Delta T_{рек}$, К	470
Потери температуры при движении газов в первом борове (участки l_1 и l_2), ΔT_1 , К/м	2

Потери температуры при движении газов во втором борове (участок l_3), ΔT_2 , К/м	1,5
Длины участков боровов, м l_1 l_2 l_3	1 3 5
Схема изгиба трубопровода на участке между каналами l_1 и l_2 (рис. 2)	4
Высота вертикальных каналов, $H_{\text{верт}}$, м	4
Высота заготовок, $H_{\text{заг}}$, м	0,36
Число вертикальных каналов, n , шт.	2
Потери температуры при движении газов в трубе, $T_{\text{тр}}$, К/м	1,25

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;

Коэффициент трения газа о кирпичные стенки канала $\lambda = 0,05$. Потери энергии в рекуператоре $h_{\text{рек}} = 132,725$ Н/м².

В расчетах принимаем постоянными следующие величины:

- плотность продуктов горения $\rho_{\text{пр}} = 1,28$ кг/м³;
- температура окружающего воздуха $T_{\text{в}} = 293$ К;
- плотность воздуха при нормальных условиях $T_0 = 273$ К, $P_{\text{в}} = 101,3$ кН/м²,
 $\rho_{\text{в}} = 1,29$ кг/м³;
- скорость движения газов в вертикальных каналах и боровах $\omega_z = 2,5$ м/с.

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.

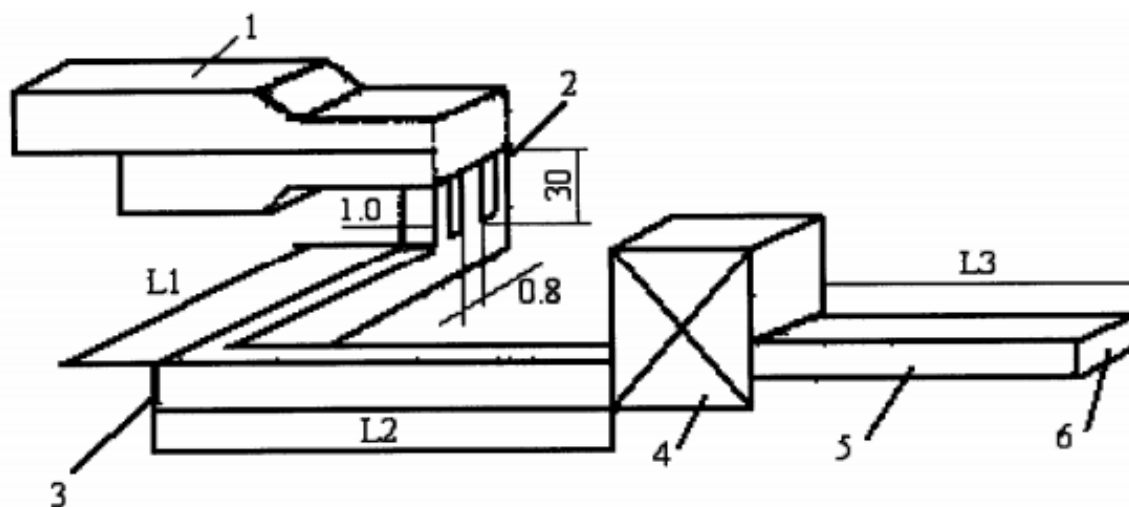


Рисунок 1 – Схема дымового тракта:

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

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 ($h_{тр}$), на местные сопротивления поворота на 90° ($h'_{м.с}$) и сужения потока при входе в вертикальные каналы ($h''_{м.с}$), на преодоление геометрического напора при движении газов вниз по вертикальным каналам ($h_{геом}$):

$$h_{пот}^{верт} = h'_{тр} + h'_{м.с} + h''_{м.с} + h_{геом}, \text{ Н/м}^2 \quad (1.1)$$

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

$$\omega_0 = V/3600 B_n (H_n - H_{заг}), \text{ м/с}$$

где 3600 – переводной коэффициент, $B_n(H_n - H_{заг})$ – площадь проходного сечения на выходе из печи, м^2 ;

$$\omega_0 = 21000/3600 \cdot 3,55(2,15 - 0,15) = 0,82 \text{ м/с}$$

1.2. Определим площадь сечения и размеры вертикальных каналов. Площадь сечения всех каналов:

$$F_{\Sigma} = V/3600 \omega_0, \text{ м}^2$$

$$F_{\Sigma} = 21000/3600 \cdot 2,5 = 2,33 \text{ м}^2$$

$$F_{кан} = F_{\Sigma}/n, \text{ м}^2$$

$$F_{кан} = 2,33/3 = 0,78 \text{ м}^2$$

Находим размеры каналов. Согласно рис. 1 толщина каналов $S = 1 \text{ м}$, тогда ширина канала:

$$B_{кан} = F_{кан}/S_{кан}, \text{ м}$$

$$B_{кан} = 0,78/1 = 0,78 \text{ м}$$

Находим гидравлический диаметр канала:

$$d_{\text{ГВК}} = 4F_{\text{кан}}/\Pi, \text{ м}$$

$$d_{\text{ГВК}} = 4 \cdot 0,78/2 \cdot (1 + 0,78) = 0,88 \text{ м}$$

1.3. Потери энергии на трение в каналах определяем по формуле:

$$h'_{\text{тр}} = \lambda (\rho_{\text{пр}} \omega_{\text{Г}}^2 / 2) (H_{\text{верт}} / d_{\text{ГВК}}) (T_{\text{пр}}^{\text{верт}} / T_0), \text{ Н/м}^2$$

$$h'_{\text{тр}} = 0,05 \cdot (1,28 \cdot 2,5^2 / 2) \cdot (4/0,88) \cdot (1198/273) = 4,01 \text{ Н/м}^2$$

Потери энергии на повороте из печи в вертикальный канал (угол поворота – 90°):

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

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

$$h'_{\text{м.с.}} = 2,0(1,28 \cdot 0,82^2 / 2) \cdot 1223/273 = 3,87 \text{ Н/м}^2$$

1.4. Потери энергии на сужение (изменение скорости) при входе в вертикальные каналы:

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

где $\xi_{\text{суж}} = 0,42$ – коэффициент местного сопротивления при внезапном сужении канала;

$$h''_{\text{м.с.}} = 0,42(1,28 \cdot 0,82^2 / 2) \cdot 1223/273 = 0,81 \text{ Н/м}^2$$

1.5. Потери энергии на преодоление геометрического напора:

$$h_{\text{геом}} = H_{\text{верт}} G (\rho_{\text{в}} (T_0 / T_{\text{в}}) - \rho_{\text{пр}} (T_0 - T_{\text{пр}}^{\text{верт}})), \text{ Н/м}^2$$

$$h_{\text{геом}} = 4 \cdot 9,81 \cdot (1,29 \cdot (273/293) - 1,28 \cdot (273/1198)) = 35,72 \text{ Н/м}^2$$

Суммарные потери напора в вертикальных каналах находим по формуле (1.1):

$$h_{\text{пот}}^{\text{верт}} = 4,01 + 3,87 + 0,81 + 35,72 = 44,41 \text{ Н/м}^2$$

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 боров и поворота в первом борове ($h''_{\text{м.с.}}$):

$$h''_{\text{пот}} = h''_{\text{тр}} + h''_{\text{м.с.}}, \text{ Н/м}^2 \quad (1.2)$$

2.1. Находим площадь сечения и размеры первого борона.

Площадь сечения борона определяем из условия пропускания V газов со скоростью $\omega_{\text{г}}$:

$$F_{\text{б}} = V/3600\omega_{\text{г}}, \text{ м}^2$$

$$F_{\text{б}} = 21000/3600 \cdot 2,5 = 2,33 \text{ м}^2$$

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

$$H_{\text{б}} = F_{\text{б}}/B_{\text{б}}, \text{ м}$$

$$H_{\text{б}} = 2,33/1 = 2,33 \text{ м}$$

Гидравлический диаметр борона:

$$d_{\text{г.б.}} = 4F_{\text{б}}/\Pi_{\text{б}}, \text{ м}$$

$$d_{\text{г.б.}} = 4 \cdot 2,33/2(1,0 + 2,33) = 1,40 \text{ м}$$

где $\Pi_{\text{б}}$ – периметр борона.

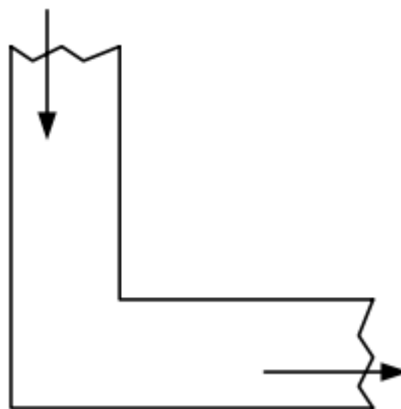


Рисунок 2 – Схема поворота первого борона между участками l_1 и l_2 : резкий поворот на 90°

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

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

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

где $L_{\text{бор}} = l_1 + l_2 = 1 + 3 = 4$ м – длина борова до рекуператора;

$$T_{\text{пр.кон}}^{\text{бор}} = 1198 - 2 \cdot 4 = 1190 \text{ К}$$

Средняя температура газов в борове

$$T_{\text{пр.кон}}^{\text{бор}} = (T_{\text{пр}}^{\text{верт}} + T_{\text{пр.кон}}^{\text{бор}}) / 2, \text{ К}$$

$$T_{\text{пр.кон}}^{\text{бор}} = (1198 + 1190) / 2 = 1194 \text{ К}$$

2.3. Потери энергии на трение газов о стенки в первом борове:

$$h_{\text{тр}}^{\prime\prime} = \lambda (\rho_{\text{пр}} \omega_{\text{г}}^2 / 2) (L_{\text{бор}} / d_{\text{г.б}}) (T_{\text{пр.ср}}^{\text{бор}} / T_0), \text{ Н/м}^2$$

$$h_{\text{тр}}^{\prime\prime} = 0,05 \cdot (1,28 \cdot 2,5^2 / 2) (4 / 1,40) (1194 / 273) = 2,5 \text{ Н/м}^2$$

2.4. Потери энергии при двух поворотах на 90° на пути от вертикальных каналов до рекуператора:

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

где $\xi_{\Sigma} = \xi_1 + \xi_2$ – суммарный коэффициент местного сопротивления; ξ_1 – коэффициент местного сопротивления при повороте из вертикальных каналов в боров; $\xi_1 = 2,0$; ξ_2 – коэффициент местного сопротивления при повороте борова на участке $(l_1 - l_2)$; $\xi_2 = 0,5 + 2 = 2,5$; $\xi_{\Sigma} = 2,0 + 2,5 = 4,5$;

$$h_{\text{м.с}}^{\prime\prime} = 4,5 \cdot (1,28 \cdot 2,5^2 / 2) (1194 / 273) = 78,73 \text{ Н/м}^2$$

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

$$h_{\text{пот}}^{\prime\prime} = 2,5 + 78,73 = 81,22 \text{ Н/м}^2$$

3. Определим потери энергии при движении продуктов горения в рекуператоре. Они складываются из потерь при внезапном расширении канала на входе в рекуператор ($h_{\text{м.с1}}^{\text{рек}}$), потерь при внезапном сужении на выходе из рекуператора ($h_{\text{суж}}^{\text{рек}}$) и потерь энергии в рекуператоре при поперечном омывании дымом шахматного пучка труб ($h^{\text{рек}}$):

$$h_{\text{пот}}^{\text{рек}} = h_{\text{м.с1}}^{\text{рек}} + h^{\text{рек}} + h_{\text{суж}}^{\text{рек}}, \text{ Н/м}^2 \quad (1.3)$$

3.1. Потери энергии при внезапном расширении (изменение скорости) при входе в рекуператор:

$$h_{\text{м.с1}}^{\text{рек}} = \xi_{\text{расш}} (\rho_{\text{пр}} \omega_{\text{г}}^2 / 2) (T_{\text{пр.кон}}^{\text{бор}} / T_0), \text{ Н/м}^2$$

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

$$h_{\text{м.с1}}^{\text{рек}} = 0,16 \cdot (1,28 \cdot 2,5^2 / 2) (1190 / 273) = 2,79 \text{ Н/м}^2$$

3.2. Потери энергии при внезапном сужении (изменении скорости) при выходе из рекуператора $h_{\text{суж}}^{\text{рек}}$:

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

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

$$\omega_{\text{рек}} = V / 3600 B_{\text{рек}} H_{\text{рек}}, \text{ м/с}$$

$$\omega_{\text{рек}} = 21000 / 3600 \cdot 1,4 \cdot 2,5 = 1,67 \text{ м/с}$$

Температура газов на выходе из рекуператора:

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

$$T_{\text{вых}}^{\text{рек}} = 1190 - 470 = 720 \text{ К}$$

$\xi_{\text{расш}} = 0,26$ для случая $F_{\text{бор}} / F_{\text{рек}} = (1 \cdot 2,33) / (1,4 \cdot 2,5) = 0,66$

$$h_{\text{суж}}^{\text{рек}} = 0,26 \cdot (1,28 \cdot 1,67^2 / 2) \cdot 720 / 273 = 1,22 \text{ Н/м}^2$$

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

$$h_{\text{пот}}^{\text{рек}} = 2,79 + 132,725 + 1,22 = 136,734 \text{ Н/м}^2$$

4. Определим потери энергии на участке от рекуператора до шиберов, $h_{\text{пот}}^4$:

$$h_{\text{пот}}^4 = \lambda (\rho_{\text{пр}} \omega_{\text{г}}^2 / 2) (l_3 / d_{\text{г.б}}) (T_{\text{пр.ср}}^{\text{рек-шиб}} / T_0), \text{ Н/м}^2$$

4.1. Найдем среднюю температуру газов на этом участке.

Температура газов на шибере:

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

где $l_3 = 5,0$ м – расстояние от рекуператора до шибера;

$$T_{\text{пр.кон}}^{\text{шиб}} = 720 - 1,5 \cdot 5 = 713 \text{ К}$$

Средняя температура газов на участке рекуператор – шибер:

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

$$T_{\text{пр.ср}}^{\text{рек-шиб}} = (720 + 713) / 2 = 716 \text{ К}$$

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

$$h_{\text{пот}}^4 = 0,05 \cdot (1,28 \cdot 2,5^2 / 2) \cdot (5 / 1,40) \cdot (716 / 273) = 1,87 \text{ Н/м}^2$$

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

$$\sum h_{\text{пот}} = h_{\text{пот}}^{\text{верт}} + h_{\text{пот}}^{\text{//}} + h_{\text{пот}}^{\text{рек}} + h_{\text{пот}}^4, \text{ Н/м}^2$$

$$\sum h_{\text{пот}} = 44,41 + 81,22 + 136,734 + 1,87 = 264,247 \text{ Н/м}^2$$

Ответ: суммарные потери напора на пути движения продуктов горения по дымовому тракту от рабочего пространства методической печи до дымовой трубы составят $264,247 \text{ Н/м}^2$.

Задание № 1.2

Определение высоты и основных параметров дымовой трубы

Исходные данные для расчета

- суммарные потери при движении газов $h_{\text{пот}} = 264,247 \text{ Н/м}^2$;
- температура дымовых газов на входе в трубу $T_{\text{пр.тр}} = T_{\text{пр.кон}}^{\text{шиб}} = 713 \text{ К}$;
- 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:

$$V = 21000 \text{ м}^3 / \text{ч} = 5,83 \text{ м}^3 / \text{с}$$

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

Площадь сечения трубы:

$$F_y = V/\omega_y, \text{ м}^2$$

$$F_y = 5,83/3 = 1,94 \text{ м}^2$$

Диаметр устья трубы:

$$d_y = 4F_y/\pi, \text{ м}$$

$$d_y = 4 \cdot 1,94/3,14 = 2,48 \text{ м}$$

2. Скорость движения газов в основании трубы:

$$\omega_{\text{осн}} = 4V/\pi d_{\text{осн}}, \text{ м/с}$$

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

$$d_{\text{осн}} = 1,2d_y, \text{ м}$$

$$d_{\text{осн}} = 1,2 \cdot 2,48 = 2,97 \text{ м}$$

$$\omega_{\text{осн}} = 4 \cdot 5,83/3,14 \cdot 2,97 = 2,50 \text{ м/с}$$

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

$$h_{\text{действ}} = 1,3 \sum h_{\text{пот}}, \text{ Н/м}^2$$

$$h_{\text{действ}} = 1,3 \cdot 264,247 = 343,5205 \text{ Н/м}^2$$

4. По графику (рис. 3) ориентировочно находим высоту трубы. При температуре дымовых газов $T_{\text{пр.гр}} = 713 \text{ К} = 440 \text{ }^\circ\text{С}$ и величине действительного разряжения $h_{\text{действ}} = 343,5205 \text{ Н/м}^2$ ориентировочная высота трубы 42 м.

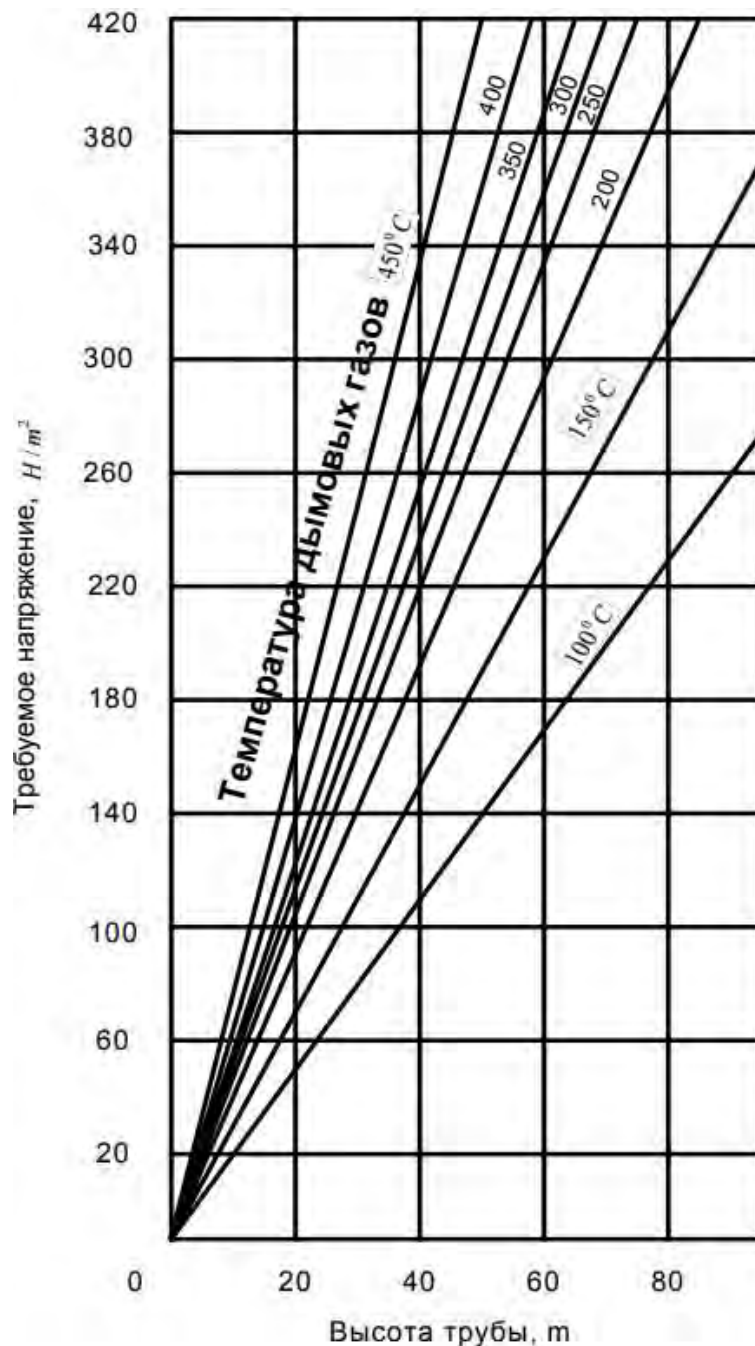


Рисунок 3 – График для ориентировочного выбора высоты трубы в зависимости от требуемого разрежения при температуре окружающей среды

5. Определяем среднюю температуру газов в трубе:

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

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

$$T_{\text{пр.устье}} = T_{\text{пр.тр}} - \Delta T_{\text{тр}} N_{\text{тр}}, \text{ К}$$

$$T_{\text{пр.устье}} = 713 - 1,25 \cdot 42 = 660,5 \text{ К}$$

$$T_{\text{пр.ср}} = (713 + 660,5) / 2 = 686 \text{ К}$$

6. Находим средний диаметр (м) и площадь сечения трубы:

$$d_{\text{ср.тр}} = (d_{\text{осн}} + d_y)/2, \text{ м}$$

$$d_{\text{ср.тр}} = (2,97 + 2,48)/2 = 2,72 \text{ м}$$

$$F_{\text{тр.ср}} = (\pi d_{\text{ср.тр}}^2)/4, \text{ м}^2$$

$$F_{\text{тр.ср}} = (3,14 \cdot 2,72^2)/4 = 5,83 \text{ м}^2$$

7. Средняя скорость движения дымовых газов в трубе:

$$\omega_{\text{тр.ср}} = V/F_{\text{тр.ср}}, \text{ м/с}$$

$$\omega_{\text{тр.ср}} = 5,83/5,83 = 1 \text{ м/с}$$

8. Высоту дымовой трубы находим по формуле:

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

$$H = \frac{343,5205 - 1,28 \cdot \frac{2,5^2}{2} \cdot \frac{713}{273} + 1,28 \cdot 3^2 \cdot \frac{660,5}{273}}{9,81 \cdot \left(1,29 \cdot \frac{273}{293} - 1,28 \cdot \frac{273}{686} \right) - \frac{0,05}{2,72} \cdot 1,28 \cdot \frac{1^2}{2} \cdot \frac{686}{273}} = 53,34 \text{ м}$$

Ответ: диаметр основания трубы $d_{\text{осн}} = 2,97$ м; диаметр устья трубы $d_y = 2,48$ м; высота трубы $H = 53,34$ м.

Задание № 1.3

Расчет эжектора для удаления продуктов горения из методической нагревательной печи

Исходные данные для работы (общая часть):

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

$$G_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}} V, \text{ кг/с}$$

$$G_{\text{пр}} = 1,28 \cdot 5,83 = 7,47 \text{ кг/с}$$

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

$$n = G_{\text{пр}}/G_{\text{возд}}$$

В этом случае расход массы воздуха в эжекторе:

$$G_{\text{возд}} = G_{\text{пр}}/n, \text{ кг/с}$$

$$G_{\text{возд}} = 7,47/1,6 = 4,67 \text{ кг/с}$$

3. По номограмме (см. рис. 5) определяем значения β и η_{max} :

Для $n = 1,6$ и $T_{\text{пр.тр}} = 713 \text{ К}$ по номограмме находим $\beta = 0,115$ и $\eta_{\text{max}} = 40 \%$.

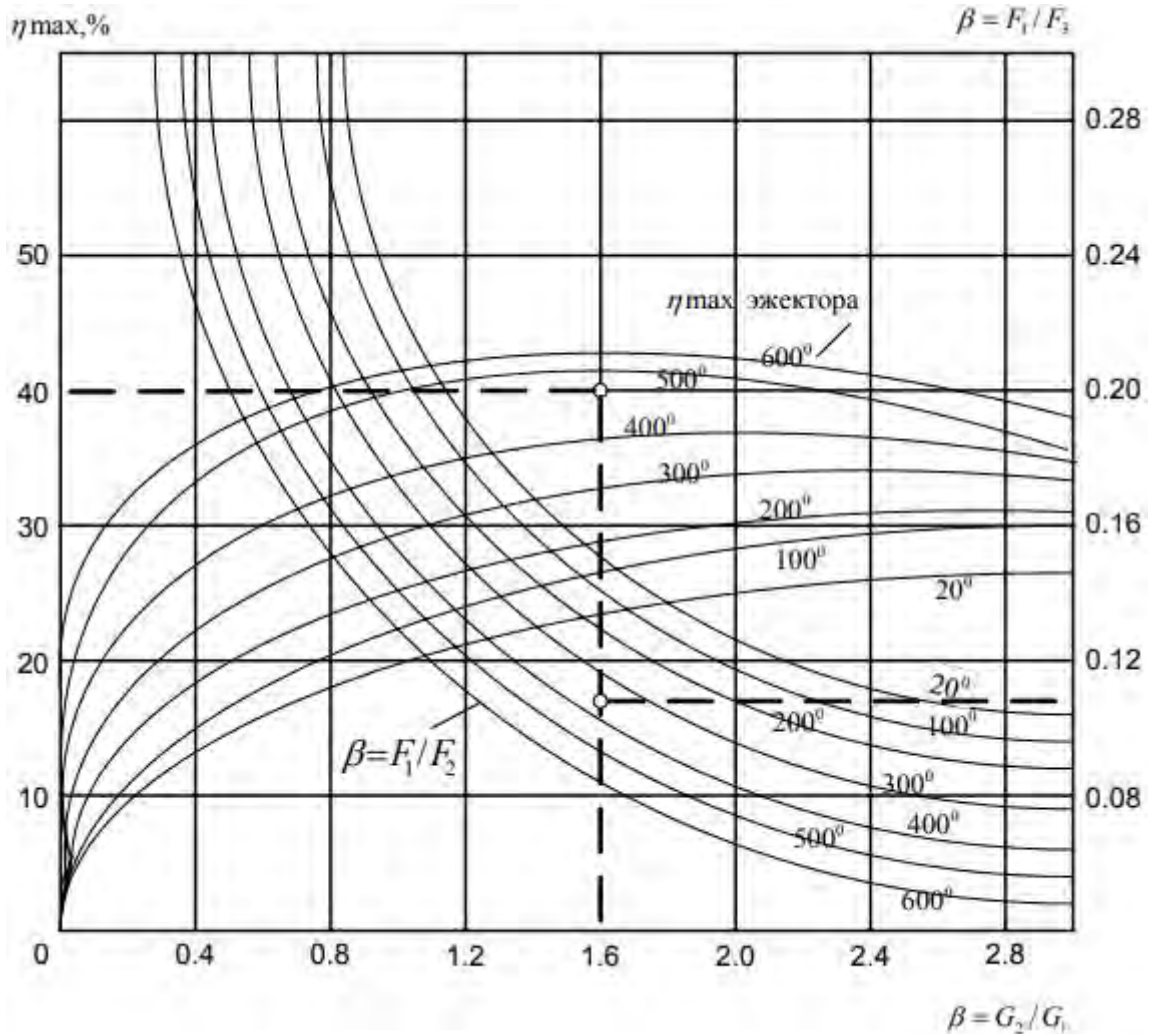


Рисунок 5 – Зависимость КПД эжектора от температуры дыма и параметров β и η_{max}

4. Действительный объем эжектируемых дымовых газов:

$$V_{\text{пр}} = V(T_{\text{пр.тр}}/T_0), \text{ м}^3/\text{с}$$

$$V_{\text{пр}} = 5,83 \cdot (713/273) = 15,22 \text{ м}^3/\text{с}$$

5. Действительный объем эжектирующего воздуха:

$$V_{\text{возд}} = (G_{\text{возд}}/\rho_{\text{в}})(T_{\text{в}}/T_0), \text{ м}^3/\text{с}$$

$$V_{\text{возд}} = (4,67/1,29) \cdot (293/273) = 3,88 \text{ м}^3/\text{с}$$

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

$$m = V_{\text{пр}}/V_{\text{возд}}$$

$$m = 15,22/3,88 = 3,92$$

Плотность смеси дыма и воздуха:

$$\rho_{\text{см}} = (G_{\text{возд}} + G_{\text{пр}})/(V_{\text{возд}} + V_{\text{пр}}), \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{см}} = (4,67 + 7,47)/(3,88 + 15,22) = 0,64 \text{ кг/м}^3$$

7. Определяем скорость движения смеси в эжекторе:

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

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

Принимаем $\eta_{\text{диф}} = 0,8$.

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot 264,247}{0,64 \cdot \left[\frac{2 + 0,8 \cdot 0,115 \cdot 3,92 \cdot 1,6}{0,115 \cdot (1 + 3,92) \cdot (1 + 1,6)} - (2 - 0,8) \right]}} = 38,16 \text{ м/с}$$

8. Площадь поперечного сечения смесителя:

$$F_{\text{см}} = (V_{\text{возд}} + V_{\text{пр}})/\omega, \text{ м}^2$$

$$F_{\text{см}} = (3,88 + 15,22)/38,16 = 0,501 \text{ м}^2$$

Отсюда:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{см}}}{\pi}}, \text{ м}$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,501}{3,14}} = 0,80 \text{ м}$$

9. Остальные размеры эжектора находим по формулам:

$$l = 17d_3, \text{ м}$$

$$l = 17 \cdot 0,80 = 13,58 \text{ м}$$

$$l_1 = 10d_3, \text{ м}$$

$$l_1 = 10 \cdot 0,80 = 8,0 \text{ м}$$

$$l_2 = 2d_3, \text{ м}$$

$$l_2 = 2 \cdot 0,80 = 1,6 \text{ м}$$

$$l_3 = 3d_3, \text{ м}$$

$$l_3 = 3 \cdot 0,80 = 2,4 \text{ м}$$

$$l_4 = 2d_3, \text{ м}$$

$$l_4 = 2 \cdot 0,80 = 1,6 \text{ м}$$

$$l_5 = 2d_3, \text{ м}$$

$$l_5 = 2 \cdot 0,80 = 1,6 \text{ м}$$

$$d_1 = d_3 \sqrt{\beta}, \text{ м}$$

$$d_1 = 0,80 \sqrt{0,115} = 0,271 \text{ м}$$

$$d_2 = 2d_3, \text{ м}$$

$$d_2 = 2 \cdot 0,80 = 1,6 \text{ м}$$

$$d_3 = 2d_3, \text{ м}$$

$$d_3 = 2 \cdot 0,80 = 1,6 \text{ м}$$

$$d_4 = 2d_3, \text{ м}$$

$$d_4 = 2 \cdot 0,80 = 1,6 \text{ м}$$

10. Скорость эжектирующего воздуха в сопле:

$$\omega_{\text{возд.сопл}} = 4V_{\text{возд}}/\pi d_1^2, \text{ м/с}$$

$$\omega_{\text{возд.сопл}} = 4 \cdot 3,88/3,14 \cdot 0,27^2 = 67,43 \text{ м/с.}$$

Ответ: КПД эжектора 40%; скорость эжектирующего воздуха в сопле 67,43 м/с; диаметр смесителя эжектора $d_3 = 0,8 \text{ м}$.

Практическая работа №2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ИЗДЕЛИЙ В ПЕЧАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Общая часть

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,

$$Bi = (\alpha/\lambda)S = (S/\lambda) / (1/\alpha),$$

где α – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности тела, Вт/м²·°С ; λ - коэффициент теплопроводности материала тела, Вт/м²·°С ; S – половина толщины тела, м.

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 изделиями, 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.

Задание 2.1.

Расчёт времени нагрева теплотехнически тонких изделий

На рис.1 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.

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 с временем нагрева по постоянной температуре печи (рис. 2).

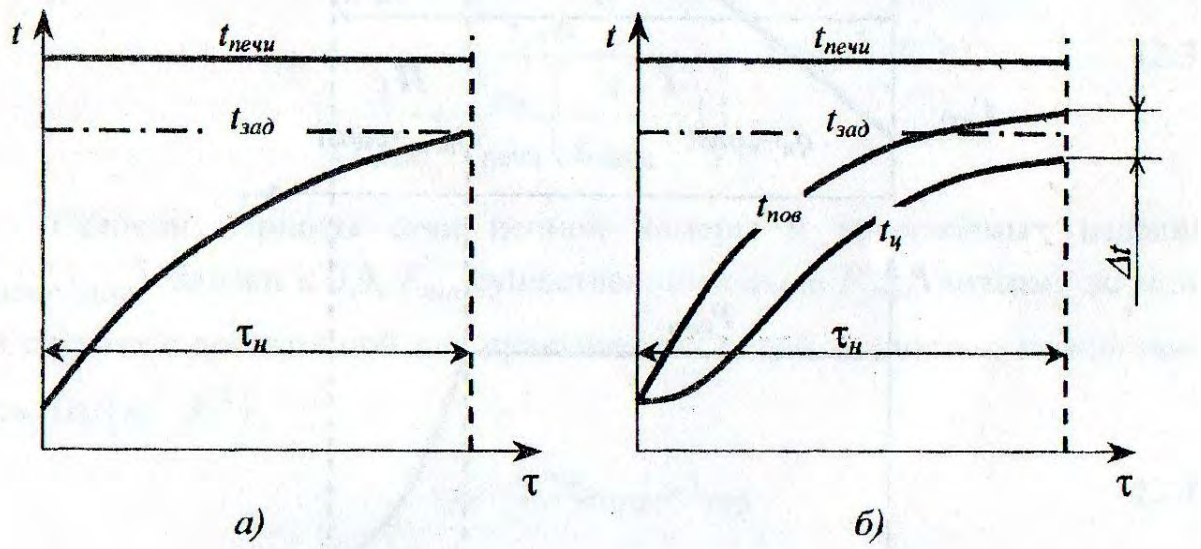


Рис. 1. График нагрева изделий в печи периодического действия при постоянной температуре печи. а—тонкие изделия» б—массивные изделия.

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.

Значение этого теплового потока легко определяется из формулы

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

где q_n - постоянный тепловой поток, воспринимаемый единицей поверхности нагреваемых изделий: Вт/м²

$P_{\text{печи}}$ - мощность печи, Вт

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

$F_{\text{изд}}$ - тепловоспринимающая поверхность изделий, м²

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

$$q_n = c_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right] \quad (2)$$

здесь $T_{\text{печи}}$ и $T_{\text{изд}}$ - текущие значения температур печи и изделия: К

$c_{\text{пр}}$ - приведенный коэффициент лучеиспускания, Вт/м² К⁴

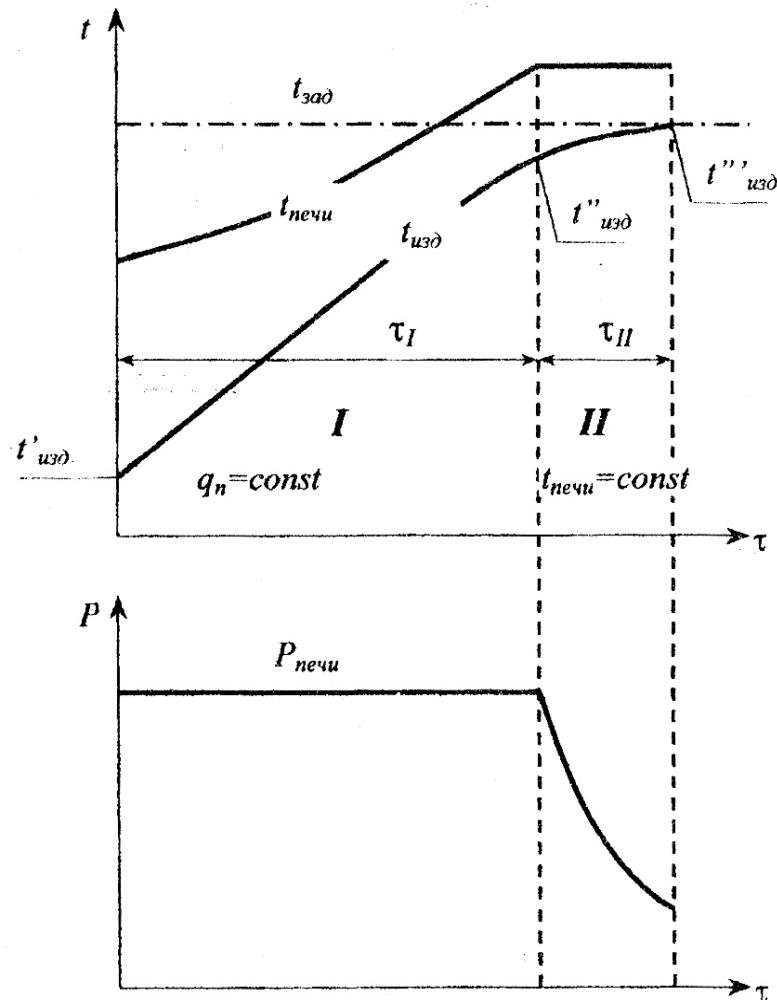


Рис. 2. График нагрева тонкого изделия в электрической печи периодического действия.

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

$$c_{\text{пр}} = \frac{5,76}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{изд}}} + \frac{F_{\text{изд}}}{F_{\text{печи}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{печи}}} - 1 \right)}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4) \quad (3)$$

Степень 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; $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$

$$c_{\text{пр}} = 5,76\varepsilon_{\text{изд}} = c_{\text{изд}} \quad (4)$$

В тех же случаях, когда значения $F_{\text{изд}}$ и $F_{\text{печи}}$ близки друг к другу, приведенный коэффициент лучеиспускания равен; $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$

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

Конец первого и начало второго этапа характеризуются достижением заданного значения температуры рабочего пространства. При этом для тонких изделий их температура в соответствии с (2) может быть определена; $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{изд}} = 100 \sqrt[4]{\left(\frac{T_{\text{печи}}''}{100} \right)^4 - \frac{q_n}{c_{\text{пр}}} - 273} \quad (6)$$

Количество тепла, воспринятое изделием за период первого этапа, будет равно: $q_n \cdot F_{\text{изд}} \cdot \tau$, где τ — длительность первого этапа. Это тепло пойдет на нагрев изделий от начальной температуры $t_{\text{изд}}$ до $t_{\text{изд}}''$, поэтому можно написать:

$$q_n F_{\text{изд}} \tau_1 = v c (t_{\text{изд}}'' - t_{\text{изд}})$$

и, следовательно,

$$\tau_1 = \frac{v c (t_{\text{изд}}'' - t_{\text{изд}})}{q_n F_{\text{изд}}}, \quad (7)$$

здесь G — масса изделий; кг

c - средняя удельная теплоемкость, Дж/(кг · C)

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

$$q_{II} = (\alpha_{\text{изл}} + \alpha_{\text{конв}})(t_{\text{печи}} - t_{\text{изд}}) \quad (8)$$

здесь q_n - может быть определен из (1);

$\square_{\text{изл}}$ - коэффициент теплоотдачи излучением, может быть определен из

$$\alpha_{\text{изл}} = c_{\text{пр}} \frac{\left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{печи}} - t_{\text{изд}}} \quad (9)$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией $\square_{\text{конв}}$ 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 печи будем иметь:

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

Выражение (10) действительно, если поверхности изделий, воспринимающие тепло излучением и конвекцией, равны, что обычно имеет место для тонких изделий.

Из (10) может быть определена температура изделия в момент окончания регулярного режима $T''_{\text{изд}}$

Длительность первого этапа τ_1 может быть определена, как и раньше, из (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, нагрев изделий осуществляется при постоянной температуре печи (рис. 2).

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

$$\tau_2 = \frac{\nu c}{F_{\text{изд}} c_{\text{пр}}} \frac{100}{\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^2} \left[\Psi \left(\frac{T''_{\text{изд}}}{T_{\text{печи}}} \right) - \Psi \left(\frac{T_{\text{изд}}}{T_{\text{печи}}} \right) \right], \quad (11)$$

здесь $T''_{\text{изд}}$ —абсолютная температура изделий в начале второго периода нагрева, K , а $T'''_{\text{изд}}$ — 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 $\square(T_{\text{изд}}/T_{\text{печи}})$ даны в приложении (табл. П1). По (11), задавшись значением $T'''_{\text{изд}}$ — окончательной температурой нагрева, можно получить необходимое для этого время τ_2 , или, наоборот, задавшись временем τ_2 , определить $\Psi(T'''_{\text{изд}}/T_{\text{печи}})$ и из табл. П1 — соответствующее этой функции значение $T'''_{\text{изд}}$.

Для низкотемпературных печей и для печей с принудительной циркуляцией воздуха τ_2 может быть рассчитана по другой формуле Б.В.Старка

$$\tau_2 = \frac{\nu \cdot c}{\alpha F_{\text{изд}}} \ln \left(\frac{t_{\text{печи}} - t''_{\text{изд}}}{t_{\text{печи}} - t'''_{\text{изд}}} \right) \quad (12)$$

В (12) $t''_{\text{изд}}$ 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 τ_2 значение коэффициента теплоотдачи $\square = \square_{\text{изл}} + \square_{\text{конв}}$. Последнее следует определять как среднее арифметическое из значений \square для начала и конца периода, когда $t_{\text{изд}} = t''_{\text{изд}}$ и $t_{\text{изд}} = t'''_{\text{изд}}$ соответственно. Значения $\square_{\text{изл}}$ для этих моментов времени могут быть вычислены из (9), а $\square_{\text{конв}}$ приняты в первом приближении равными $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{С})$

Задание 2.2.

Расчёт времени нагрева теплотехнически 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 (рис. 3) .

На первом этапе изделия будут нагреваться тепловым потоком q_n который определяется по (1). В течение времени $\tau = 0,3S^2/a$ для бесконечной пластины толщиной $2S$ и $\tau^1 = 0,25 R^2/a$ 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 $\Delta t_1 = q_n S/2 \lambda$ для пластины и $\Delta t_1 = q_n S/2 \lambda$ для цилиндра (рис. 3). К концу начального и к началу регулярного периода нагрева температура поверхности пластины достигнет $t_{\text{пов}} = 1,27\Delta t = 1,27q_n S/2 \lambda$ а температура центра $t_{\text{центр}} = 0,27\Delta t = 0,27q_n S/2 \lambda$, аналогично для цилиндра $t_{\text{пов}} = 1,5\Delta t = 1,5q_n R/2 \lambda$ и $t_{\text{центр}} = 0,5\Delta t = 0,5q_n R/2 \lambda$. В дальнейшем во время нагрева в регулярном режиме температуры поверхности и центра изделия будут увеличиваться пропорционально времени с постоянной скоростью $\square^\circ\text{C}/\text{ч}$,

$$\theta = t_{\text{пов}_{\tau+1}} - t_{\text{пов}_{\tau}} = \frac{q_n}{c\rho S} \quad \text{и}$$

(13)

$$\tau^{//} = \frac{t_{\text{пов}}^{//} - t_{\text{пов}}}{\theta} = \frac{t_{\text{пов}}^{//} - t_{\text{пов}}}{q_n} \cdot c\rho S \quad \text{для пластины.}$$

Аналогично этому

$$\tau^{//} = \frac{t_{\text{пов}}^{//} - t_{\text{пов}}}{\theta} = \frac{t_{\text{пов}}^{//} - t_{\text{пов}}}{2q_n} \cdot c\rho S \quad \text{для цилиндра.}$$

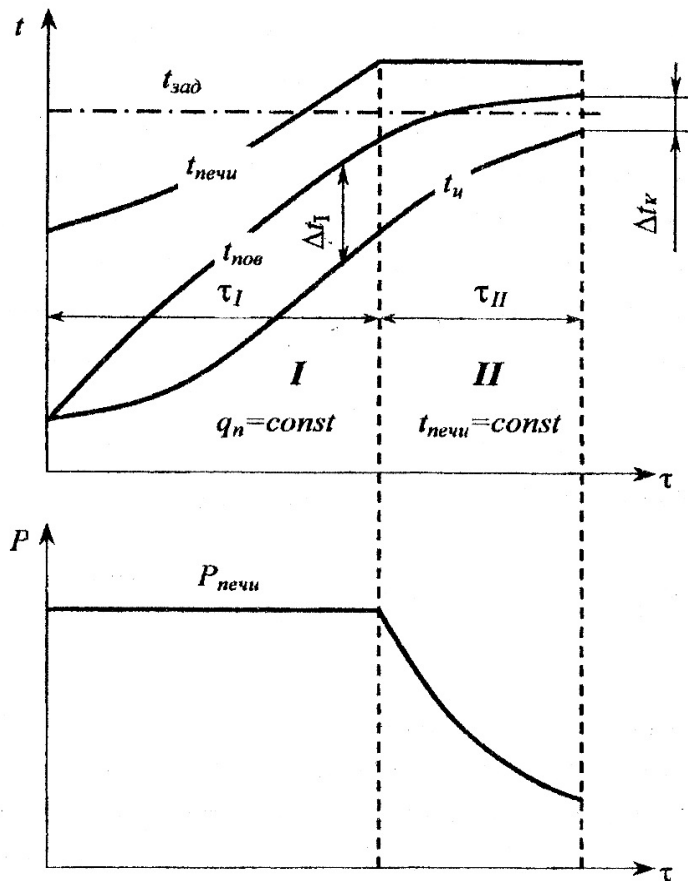


Рис. 3. График нагрева массивного изделия в электрической печи периодического действия.

Отсюда длительность первого этапа нагрева для бесконечной пластины выразится выражением

$$\tau_1 = \tau + \tau'' = 0.3 \frac{S^2}{a} + \frac{c\rho S}{q_n} (t''_{\text{пов}} - t_{\text{пов}}) \quad (14)$$

и для бесконечного цилиндра

$$\tau_1 = \tau + \tau'' = 0.3 \frac{R^2}{a} + \frac{c\rho R}{q_n} (t''_{\text{пов}} - t_{\text{пов}}) \quad (15)$$

Здесь температура поверхности изделия к концу первого этапа в соответствии с (6) может быть определена из формулы, $^{\circ}\text{C}$

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

(16)

По достижении температурой поверхности изделия значения $t''_{нов}$ закончится первый этап, так как при этом температура печи достигнет заданного значения $T_{печи}$ и в дальнейшем благодаря работе терморегулятора остается неизменной, начнется второй этап нагрева при постоянной температуре печи. К этому моменту температура центра изделия станет равной $t''_{центр} = t''_{нов} - \square t$ 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 $t''_{ср}$. Она может быть принята равной $t''_{ср} = t''_{нов} - 0,7 \square t$ для бесконечной плиты и $t''_{ср} = t''_{нов} - 0,6 \square t$ для бесконечного цилиндра. В этом случае расчет времени нагрева на втором этапе до заданной температуры t''' может быть осуществлен, для массивных изделий, с использованием графиков Бунина (приложение) с тем лишь, однако, изменением, что относительные температуры будут равны:

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

Значения коэффициента теплоотдачи \square , подставляемые в число Био при расчете времени нагрева массивных изделий во втором этапе следует брать равными средним значениям из соответствующих коэффициентов для температур $t''_{нов}$ и $t'''_{нов}$. Если нагрев при постоянной температуре печи осуществляется от нуля (или близкой к нулю температуры), то значения \square следует брать по рис. П2 (приложения)

Примеры расчета

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 $^{\circ}\text{C}$;
- материал изделия;
- характеристика нагрева: односторонний, двухсторонний и проч.
-

Пример выполнения задания № 2.1

В электрической камерной печи мощностью 25 кВт производится нагрев шести стальных слитков размером $700 \times 100 \times 100$ мм до 860°C . Слитки укладывают в печь в один ряд вплотную, нагрев – двусторонний, температура печи 900°C , коэффициент теплопроводности стали $\lambda_{\text{ст}} = 34,9$ Вт/(м $\cdot^{\circ}\text{C}$), плотность $\rho = 7,8$ т/м $^3 = 7800$ кг/м 3 , удельная теплоемкость $c_{\text{ст}} = 0,67 \cdot 10^3$ Дж/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$), мощность холостого хода печи 5 кВт. Определить время нагрева загрузки.

Имеем:

- при двухстороннем нагреве слитков глубина прогрева:

$$S = 0,05 \text{ м};$$

- суммарная тепловоспринимающая поверхность слитков:

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

- суммарная масса слитков:

$$G = 7800 \cdot 0,7 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot 6 = 328 \text{ кг}.$$

Первый этап нагрева. Величину теплового потока для этого этапа нагрева определяем по формуле (2.1):

$$q_{\text{п}} = \frac{P_{\text{печи}} - P_{\text{пот}}}{F_{\text{изд}}} \cdot 10^3, \text{ Вт/м}^2$$

$$q_{\text{п}} = \frac{25 - 5}{0,84} \cdot 10^3 = 23810 \text{ Вт/м}^2;$$

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

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

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

Находим $c_{\text{пр}}$ по упрощенной формуле (2.4):

$$c_{\text{пр}} = 5,76\varepsilon_{\text{изд}}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$$

$$c_{\text{пр}} = 5,76 \cdot 0,8 = 4,61 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4, \text{ разница } 2,88 \%;$$

Температуру конца первого этапа и начала второго определяем по (2.6):

$$t_{\text{изд}}^{\prime\prime} = 100 \sqrt[4]{\left(\frac{T_{\text{печи}}^{\prime\prime}}{100} \right)^4 - \frac{q_{\text{п}}}{c_{\text{пр}}}} - 273, \text{ }^{\circ}\text{С}$$

$$t_{\text{изд}}^{\prime\prime} = 100 \sqrt[4]{\left(\frac{900 + 273}{100} \right)^4 - \frac{23810}{4,48}} - 273 = 807 \text{ }^{\circ}\text{С};$$

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

Определяем коэффициент теплоотдачи α для интервала температур нагрева изделий 0 и 807 °С.

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

$$t_{\text{печи}}^{\prime} = 100 \sqrt[4]{\left(\frac{273}{100} \right)^4 + \frac{23810}{4,48}} - 273 = 583 \text{ }^{\circ}\text{С};$$

по (2.9)

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

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

$$\alpha_{900-807} = 4,48 \frac{\left[\left(\frac{900 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{807 + 273}{100} \right)^4 \right]}{900 - 807} = 256 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}).$$

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_{583-0} + \alpha_{900-807}}{2}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$$

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{40,8 + 256}{2} = 148,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}).$$

Отсюда число Био:

$$Bi = \frac{\alpha_{\text{ср}} S}{\lambda}$$

$$Bi = \frac{148,6}{34,9} 0,05 = 0,213 < 0,25 ; \text{ следовательно, имеет место нагрев}$$

тонких изделий.

Время нагрева изделий до 807 °С при постоянном удельном тепловом потоке в 23810 Вт/м² по (2.7):

$$\tau_1 = \frac{G \cdot c (t_{\text{изд}}'' - t_{\text{изд}}')}{q_{\text{п}} F_{\text{изд}}}, \text{ ч}$$

$$\tau_1 = \frac{328 \cdot 0,67 \cdot 10^3 (807 - 0)}{23810 \cdot 0,84 \cdot 3600} = 2,461 \text{ ч.}$$

Второй этап нагрева – от 807 до 860 °С,

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

Коэффициенты теплоотдачи при 807 и 860 °С:

$$\alpha_{900-807} = 256 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С});$$

$$\alpha_{900-860} = \frac{\left(\frac{900 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{860 + 273}{100} \right)^4}{900 - 860} = 274 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С});$$

$$\alpha_{\text{ср}} = 265 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}).$$

Отсюда $Bi = \frac{265}{34,9} 0,05 = 0,38$. Это переходная область, в которой

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

$$\tau_2 = \frac{G \cdot c}{F_{\text{изд}} c_{\text{пр}}} \cdot \frac{100}{\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100}\right)^3} \left[\Psi \left(\frac{T_{\text{изд}}}{T_{\text{печи}}} \right) - \Psi \left(\frac{T_{\text{изд}}}{T_{\text{печи}}} \right) \right], \text{ ч}$$

$$\begin{aligned} \tau_2 &= \frac{328 \cdot 0,67 \cdot 10^3}{0,84 \cdot 4,48} \cdot \frac{100}{\left(\frac{900 + 273}{100}\right)^3} \left[\left(\frac{860 + 273}{900 + 273}\right) - \left(\frac{807 + 273}{900 + 273}\right) \right] = \\ &= 3618(1,3563 - 1,2046) = 549 \text{ с} = 0,153 \text{ ч}. \end{aligned}$$

Значения функции Ψ определены по табличным данным из приложения (см. прилож., табл. 1).

Общее время нагрева:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_1 + \tau_2, \text{ ч} \\ \tau &= 2,461 + 0,153 = 2,614 \text{ ч}. \end{aligned}$$

Следует иметь в виду, что в первый этап нагрева температура камеры печи в действительности не упадет до 585 °С благодаря накопленному в кладке теплу, которое в начале нагрева частично перейдет в изделия и тем самым обеспечит больший, чем 23,8 кВт/м², удельный тепловой поток. Однако при загрузке и выгрузке изделий печь обычно дополнительно охлаждается, снижая свою температуру, поэтому фактическое время нагрева слитков до 860 °С будет весьма близким к расчетному – 2,614 ч.

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 ± 10) °С. В период нагрева температурный перепад в слитках не должен превышать $\Delta t_{\text{max}} = 50$ °С. Теплопроводность материала

$\lambda = 41,9$ Вт/(м·°С), удельная теплоемкость $c_{\text{ст}} = 0,63 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°С).

Производительность нагрева – три слитка в сутки.

Имеем:

- масса слитка:

$$G_{\text{изд}} = 1960 \text{ кг};$$

- тепловоспринимающая поверхность изделия:

$$F_{\text{изд}} = \frac{3,14 \times 0,4^2}{4} \cdot 4 = 0,5 \text{ м}^2.$$

Принимаем, что в первом приближении, предпочитаемые для данного типа печи соотношения тепловоспринимающих поверхностей изделия и печи равна $0,5 \text{ м}^2$.

Отсюда рекомендуемое значение $F_{\text{печи}}$:

$$F_{\text{печи}} = 0,5 \cdot 2 = 1 \text{ м}^2.$$

Принимаем температуру изделий в конце первого периода равной $0,85$ от конечной температуры:

$$t_{\text{пов}}^{\prime\prime} = 0,85 \cdot t_{\text{кон}}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{пов}}^{\prime\prime} = 0,85 \cdot 950 \approx 810 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

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 – $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$.

По формуле (2.2) с учетом (2.3) получим:

$$q_{\text{п}} = \frac{5,76}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{изд}}} + \frac{F_{\text{изд}}}{F_{\text{печи}}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{печи}}} - 1 \right)} \left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}^{\prime\prime}}{100} \right)^4 \right]$$
$$q_{\text{п}} = \frac{5,76}{\frac{1}{0,8} + \frac{0,5}{1} \left(\frac{1}{0,9} - 1 \right)} \left[\left(\frac{1000 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{810 + 273}{100} \right)^4 \right] = 55169 \text{ Вт/м}^2.$$

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

$$q_{\text{п}} = \frac{\Delta t_{\text{max}} \cdot 2\lambda}{R}, \text{ Вт/м}^2$$

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

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

$$t''_{\text{пов}} = 100 \sqrt[4]{\left(\frac{900 + 273}{100}\right)^4 - \frac{20950}{4,41}} - 273 = 938 \text{ }^\circ\text{C}$$

Здесь по (2.3):

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

$$c_{\text{пр}} = \frac{5,76}{\frac{1}{0,8} + \frac{0,5}{1} \left(\frac{1}{0,9} - 1\right)} = 4,41 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$$

Время нагрева слитка до $t''_{\text{пов}} = 938 \text{ }^\circ\text{C}$ рассчитываем по (2.16):

$$\tau_1 = 0,25 \frac{R^2}{a} + \frac{c \cdot \rho \cdot R (t''_{\text{пов}} - t'_{\text{пов}})}{q_{\text{п}}}, \text{ ч}$$

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

где коэффициент температуропроводности изделия:

$$a = \frac{\lambda}{c_{\text{ст}} \cdot \rho}, \text{ м}^2/\text{с}$$

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

Считая, что начальная температура изделия составляла $t_{\text{нач}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, в соответствии с рекомендациями на стр. 26, получаем, что температура поверхности изделий к моменту начала регулярного режима достигнет значения:

$$t'_{\text{пов}} = 1,27 \cdot \Delta t_{\text{max}} + t_{\text{нач}}, \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t'_{\text{пов}} = 1,27 \cdot 50 + 10 = 73,5 \text{ }^\circ\text{C};$$

температура на его оси:

$$t'_{\text{центр}} = 0,27 \cdot \Delta t_{\text{max}} + t_{\text{нач}}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t'_{\text{центр}} = 0,27 \cdot 50 + 10 = 23,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

температура на его оси к моменту окончания регулярного режима:

$$t''_{\text{центр}} = t''_{\text{пов}} - \Delta t_{\text{max}}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t''_{\text{центр}} = 938 - 50 = 888 \text{ } ^\circ\text{C};$$

а средняя температура по сечению слитка к этому моменту:

$$t''_{\text{ср}} = t''_{\text{пов}} - 0,6 \cdot \Delta t_{\text{max}}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t''_{\text{ср}} = 938 - 0,6 \cdot 50 = 908 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Через 5,96 ч в печи будет достигнута температура 1000 °С, работает 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, считая его бесконечным цилиндром:

$$t_{\text{пов.макс}} = F_{\text{кон}} + t_{\text{нач}}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

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

Найдем коэффициенты теплоотдачи по (2.9):

При начале нагрева $t_{\text{печи}} = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t''_{\text{пов}} = 938 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$\alpha_{1000-938} = 4,48 \frac{\left(\frac{1000 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{938 + 273}{100}\right)^4}{1000 - 938} = 338 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

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

$$\alpha_{1000-960} = 4,48 \frac{\left(\frac{1000 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{960 + 273}{100}\right)^4}{1000 - 960} = 347 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

Найдем среднее значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_{1000-938} + \alpha_{1000-960}}{2}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{338 + 347}{2} = 343 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

Найдем относительную температуру поверхности изделия:

$$\theta_{\text{пов}} = \frac{t_{\text{печи}} - t_{\text{пов.макс}}}{t_{\text{печи}} - t_{\text{ср}}^{\prime\prime}}$$

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

Найдем критерий Био:

$$Bi = \frac{\alpha_{\text{ср}}}{\lambda} S$$

$$Bi = \frac{343}{41,9} \cdot 0,2 = 1,64$$

С учетом этих данных по графикам нагрева поверхности цилиндра (см. прилож., рис. III) определим критерий Фурье:

$$F_0 = 0,225$$

Откуда определим время нагрева изделий на втором этапе по:

$$\tau_2 = \frac{F_0 \cdot R^2}{a}, \text{ ч}$$

$$\tau_2 = \frac{0,225 \cdot 0,2^2}{8,53 \cdot 10^{-6} \cdot 3600} = 5,022 \text{ ч.}$$

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

$$t_{\text{центр}} = t_{\text{печи}} - (t_{\text{печи}} - t_{\text{ср}}^{\prime\prime})\theta_{\text{центр}}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

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

Как видно, перепад чересчур велик ($960 - 929 = 31 \text{ } ^\circ\text{C}$), поэтому необходимо снизить температуру печи (задаваемую по терморегулятору), например, с $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $980 \text{ } ^\circ\text{C}$, чтобы замедлить процесс нагрева поверхности изделия и дать время для выравнивания температуры в его толще.

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

$$t_{\text{пов}}^{\prime\prime} = 100 \sqrt[4]{\left(\frac{980 + 273}{100}\right)^4 - \frac{20950}{4,41}} - 273 = 915 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

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

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

Средняя температура вала к моменту окончания первого периода нагрева:

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

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

$$\alpha_{915} = 4,48 \frac{\left(\frac{980 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{915 + 273}{100}\right)^4}{980 - 915} = 321 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}).$$

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{338 + 321}{2} = 330 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}).$$

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

$$Bi = \frac{330}{41,9} \cdot 0,2 = 1,57$$

Отсюда вторично получаем:

$$F_0 = 0,55$$

$$\tau_2 = \frac{0,55 \cdot 0,2^2}{8,53 \cdot 10^{-6} \cdot 3600} = 0,72 \text{ ч.}$$

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 6 °С, т. е. будет в пределах допустимого ($\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$).

$\tau = \tau_1 + \tau_2 = 5,81 + 0,72 = 6,53 \text{ ч.}$ – это полное время нагрева изделия.

Приложение

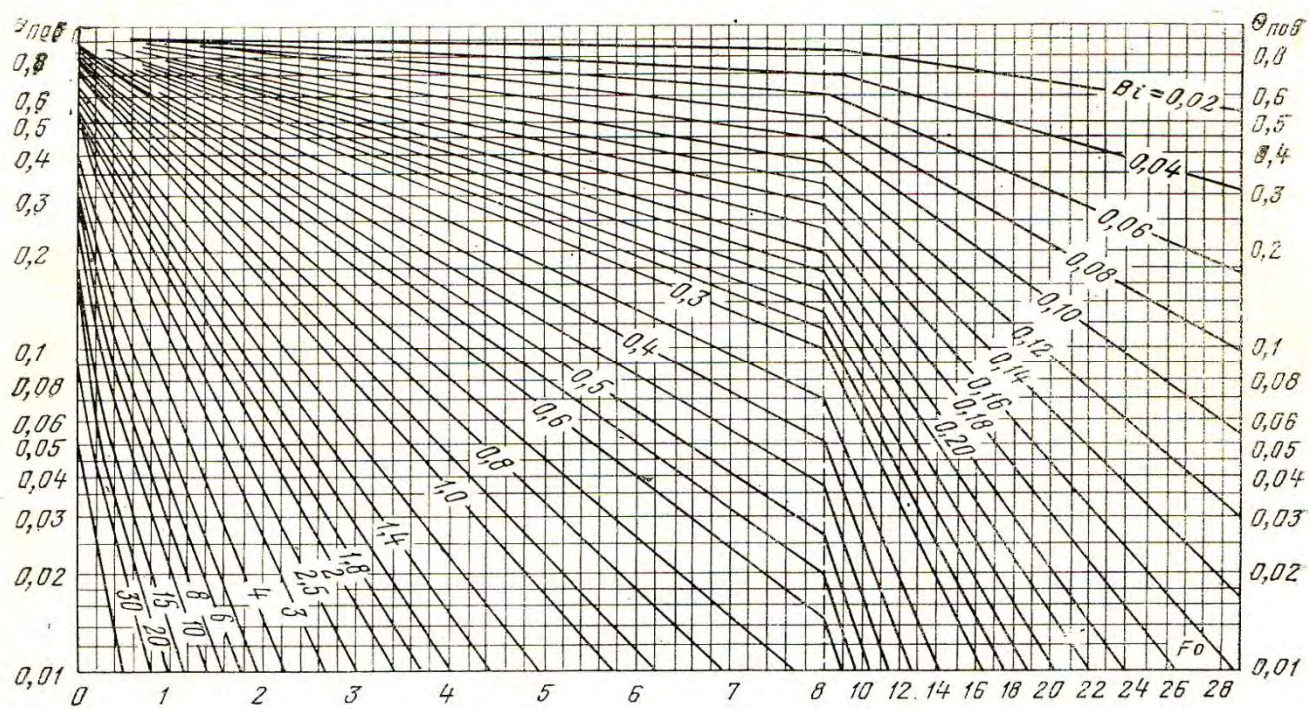


Рис. 1. График для расчета нагрева или охлаждения средней поверхности пластины

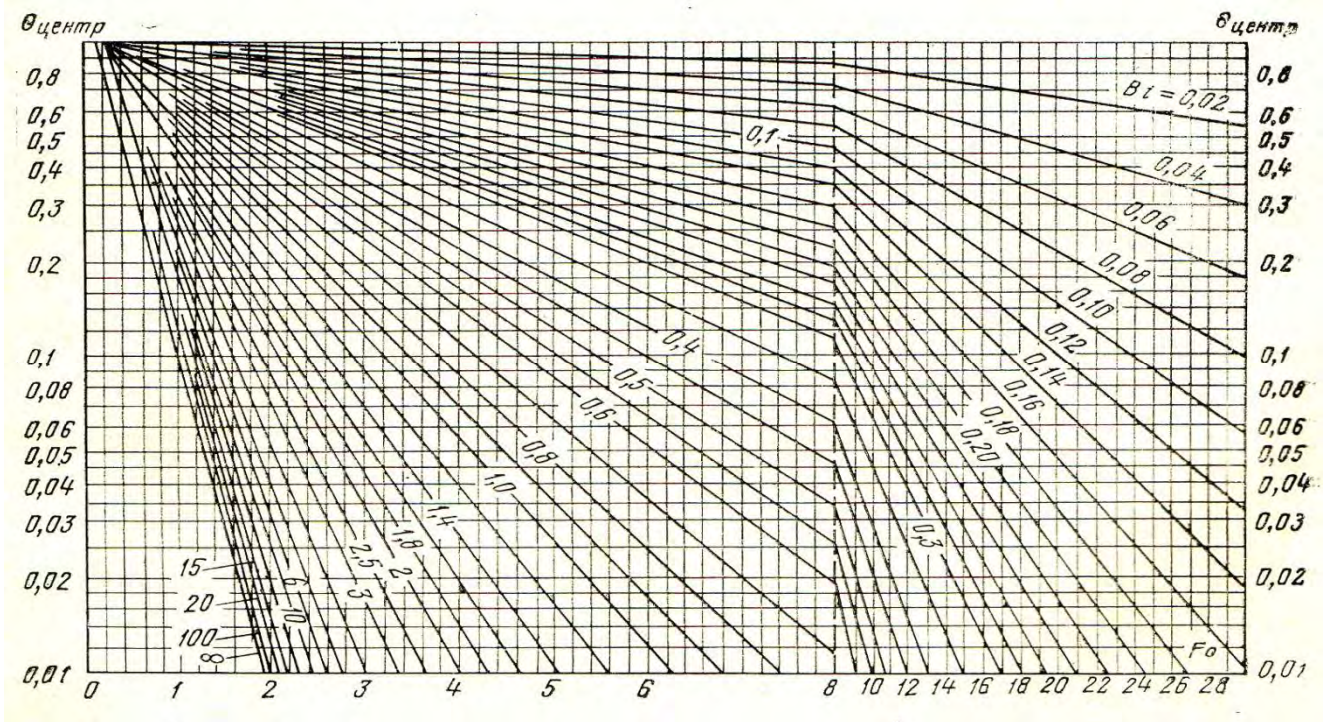


Рис.2. График для расчета нагрева или охлаждения средней плоскости пластины

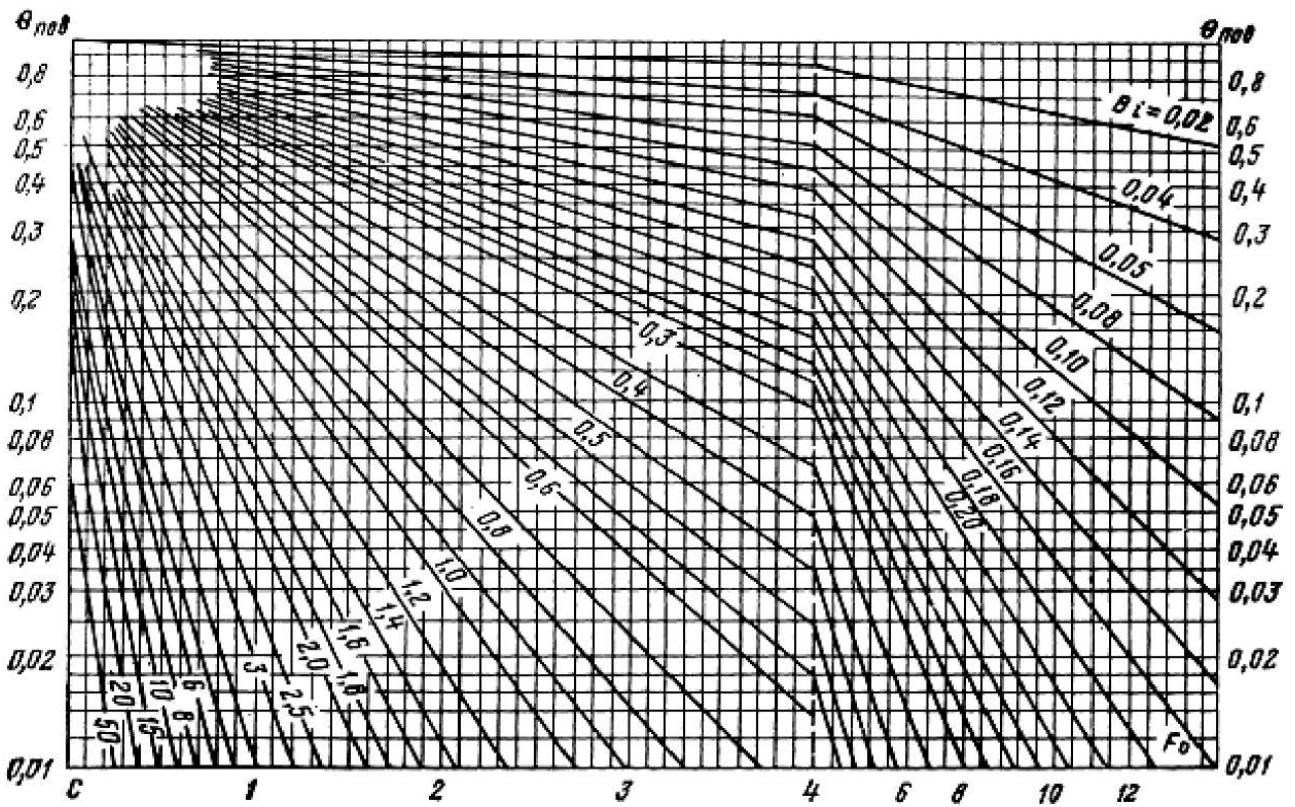


Рис.3. График для расчета нагрева или охлаждения поверхности цилиндра

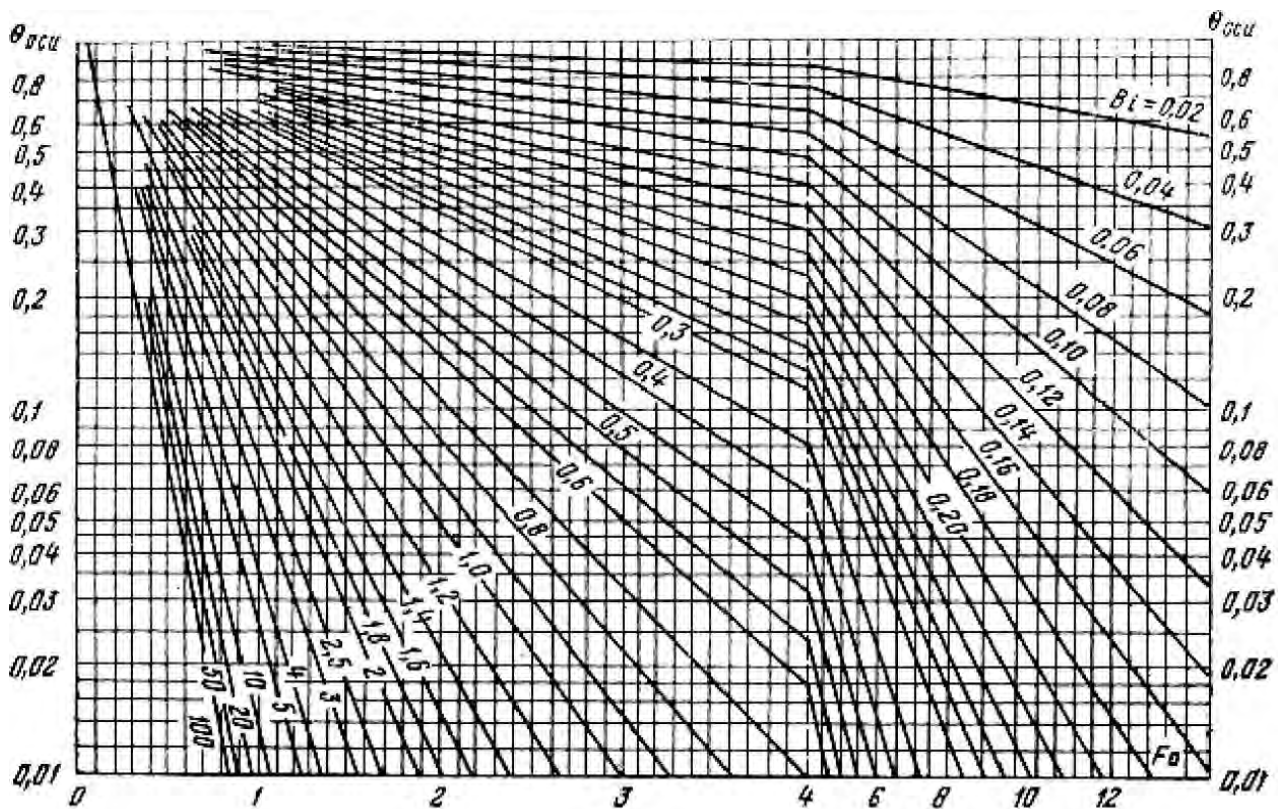


Рис.4. График для расчета нагрева или охлаждения оси цилиндра

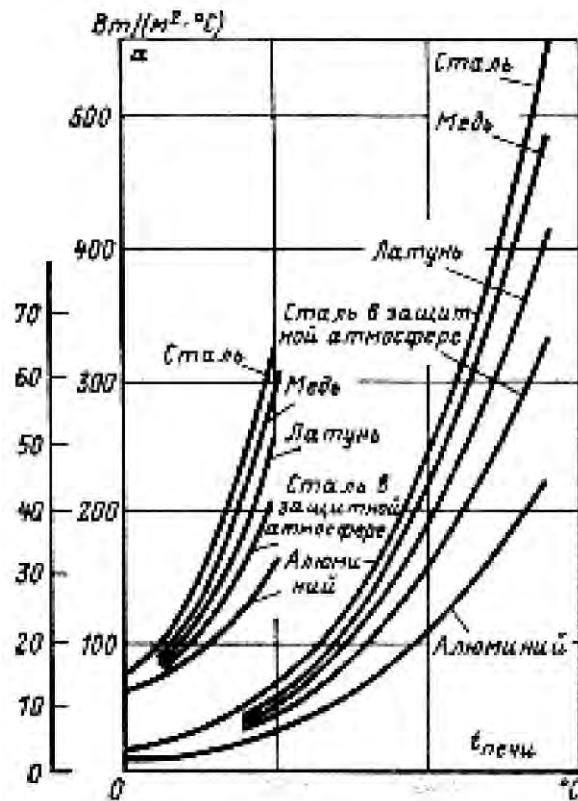


Рис.5. Зависимость среднего коэффициента теплопередачи в печи от ее температуры при нагреве от 0 °С

Таблица1 Значения функции Y(Y)

Y	Y(Y)	Y	Y(Y)	Y	Y(Y)	Y	Y(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. Krivandina. - 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 «Furnaces and dryers of casting shops» / V. N. Sharshin. - Vladimir: VVGU, 2000. - 36 p.
6. Methodical instructions for laboratory work in the discipline «Furnaces of casting shops» / V. N. Sharshin. - Vladimir: VVGU, 2001. - 28 p.
7. Methodical instructions for course work in the discipline «Furnaces of casting shops» / 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.

ПЕРЕРАБОТАННЫЕ И ДОПОЛНЕННЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
"ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И АГРЕГАТЫ"

Составитель
ШАРШИН Владимир Николаевич

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании кафедры ТФиКМ
(протокол № 1 от 30.08.2021 г.)

Методические указания рекомендованы УМК по направлению 22.03.01 для использования в
учебном процессе (протокол № 1 от 30.08.2021 г.)