

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

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям по дисциплине
ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И АГРЕГАТЫ

Направление подготовки	22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»
Квалификация(степень) выпуска	бакалавр
Форма обучения	очная

Составитель
К.т.н., доцент Шаршин В.Н.

Владимир 2019 г.

Приведены рекомендации по организации занятий, последовательности и методики выполнения практических работ, а также рекомендации по составлению отчётов, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы. Основной целью методических указаний является приобретение практических навыков расчета важнейших теплотехнических процессов, протекающих в печах при производстве отливок из черных и цветных сплавов.

Предназначены для студентов – бакалавров очной и заочной форм обучения по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Служат руководством к проведению практических работ по дисциплине «Тепловые процессы и агрегаты».

Методические указания составлены на основе требований ФГОС ВО и ОПОП направления 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» ВлГУ, рабочей программы дисциплины «Тепловые процессы и агрегаты». Составитель к.т.н., доцент Шаршин В.Н. - Владимир, 2019, 41с .

Табл. 13. Ил. 1.

Рассмотрены и одобрены на
заседании УМК направления
22.03.01 «Материаловедение и
технологии материалов»
Протокол № 9 от 7.06.2019 г.

**Рукописный фонд кафедры
ТФиКМ ВлГУ**

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебная дисциплина «Тепловые процессы и агрегаты» входит в профессиональный цикл образовательной программы подготовки бакалавров по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» и занимает ведущее место в подготовке бакалавров по этому направлению.

Цель освоения дисциплины - изучение основ энерготехнологии в металлургическом производстве, как части технологического процесса изготовления отливок (слитков), охватывающего тепловые процессы, реализуемые в печах.

Задача изучения дисциплины: понимание основ теплотехнических процессов, протекающих в практике металлургического производства в печах, а также приобретение знаний в области эффективного управления этими процессами, исключая причинение экологического вреда, возникновения техногенных аварий и катастроф.

Изучение дисциплины базируется на знаниях ранее изучаемых дисциплин математического и естественнонаучного циклов: математики, химии, физики, физической химии, теплофизики, экологии, гидравлики и материаловедения.

Освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее перед изучением дисциплины «Термическая обработка», а также перед прохождением производственной и преддипломной практик.

В результате изучения дисциплины обучающийся должен приобрести (закрепить приобретённые ранее) следующие **компетенции**:

- Обладать способностью к самоорганизации и самообразованию (ОК-7);
- Обладать способностью использовать в исследованиях и расчетах знания о методах исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств веществ (материалов), физических и химических процессах, протекающих в материалах при их получении, обработке и модификации (ПК-4);
- Обладать способностью применять знания об основных типах современных неорганических и органических материалов, принципах выбора материалов для заданных условий эксплуатации с учётом требований технологичности, экономичности, надёжности и долговечности, экологических последствий их применения при проектировании высокотехнологичных процессов (ПК-11);
- Обладать способностью использовать на производстве знания о традиционных и новых технологических процессах и операциях, нормативных и методических материалах о технологической подготовке производства, качестве, стандартизации и сертификации изделий и процессов с элементами экономического анализа (ПК-16).

Практическая работа № 1

Расчет системы вывода газов из методической топливной печи

Система вывода газов любой топливной печи в общем виде включает в себя систему каналов для отвода газов с рекуператором и шибером, которую называют дымовым трактом, 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, к.п.д. 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 $B_{рек}=1,4$ м;
- высота $H_{рек}=2,5$ м.

Число вертикальных каналов дымохода, $n = 3$ шт. Коэффициент трения газа о

кирпичные стенки канала, $\lambda = 0,05$. Потери энергии в рекуператоре, $h_{ш.п.тр.}^{рек} = 132,725 \text{ Н/м}^2$.

В расчетах принимаем постоянными следующие величины:

- плотность продуктов горения, $\rho_{пр} = 1,28 \text{ кг/м}^3$
- температура окружающего воздуха, $T_{в} = 293 \text{ К}$
- плотность воздуха при нормальных условиях:
($T_0 = 273 \text{ К}$, $P_в = 101,3 \text{ кН/м}^2$), $\rho_в = 1,29 \text{ кг/м}^3$;
- скорость движения газов в вертикальных каналах и боровых $\omega_r = 2,5 \text{ м/с}$

Индивидуальные исходные данные:

Параметры дымового тракта	Вариант 0
	0
Количество продуктов горения, продвигающихся по каналам дымового тракта, в единицу времени, V , $\text{м}^3/\text{час}$	19165
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	450
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	5,0
l_2	5,0
l_3	6,0
Схема изгиба трубопровода на участке между каналами l_1 и l_2 (рис.1 П)	1
Высота вертикальных каналов, $H_{верт}$, м	3,0
Высота заготовок, $H_{заг}$, м	0,15
Число вертикальных каналов, n , шт.	3

Практическое задание №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 $l_{верт}$ (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.

Первый боров выполнен с поворотом на 90^0 . Различные схемы поворота представлены на рис.2.

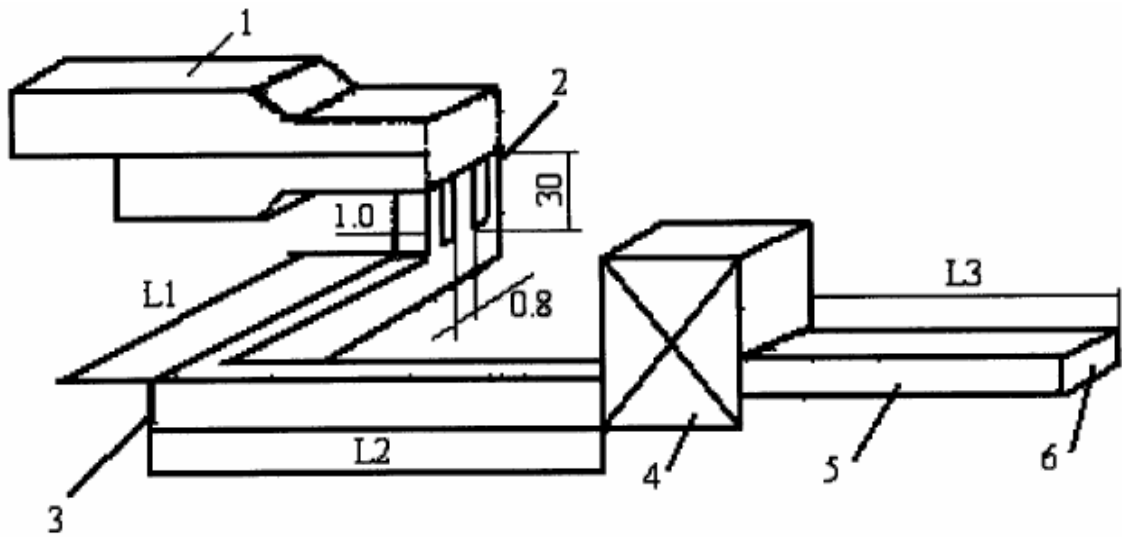


Рис. 1 Схема дымового тракта

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

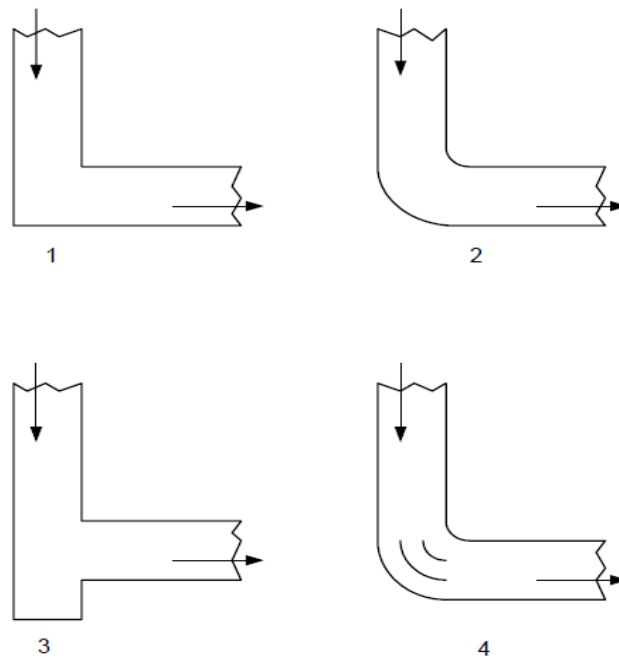


Рис.2 Схемы поворота первого борова между участками l_1 и l_2 ,
1 – резкий поворот на 90° ; 2 – поворот на 90° с закруглениями;
3 – поворот на 90° с нишей; 4 – поворот на 90° с направляющими Прандтля

Пример выполнения практического задания №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 ($h_{тр}$), 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 ($h_{геом.}$), $H/м^2$

$$h^{верт.}_{пот.} = h'_{тр.} + h'_{м.с.} + h''_{м.с.} + h_{геом.} \quad (1)$$

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

$$\omega_0 = V / 3600 \cdot V_n \cdot (H_n - H_{зар}),$$

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

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

1.2. Определим площадь сечения и размеры вертикальных каналов. Площадь сечения всех каналов, $м^2$

$$F_\Sigma = V / 3600 \cdot \omega_0$$

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

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, $H/м^2$

$$h_{тр} = \lambda \cdot (\rho_{пр} \cdot \omega_0^2 / 2) \cdot (H_{верт} / d_{гвк}) \cdot (T_{верт}_{пр} / T_0).$$

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

Потери энергии на повороте из печи в вертикальный канал (угол поворота – 90°), $H/м^2$.

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

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

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

1.4. Потери энергии на сужение (изменение скорости) при входе в вертикальные каналы, $H/м^2$

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

где $\xi_{суж.}$ – коэффициент местного сопротивления при внезапного сужении канала,

$\xi_{\text{суж.}}$ находим по приложению (табл. П1), исходя из соотношения площадей каналов $F_{\Sigma} / F_{\text{печи}}$.

$$F_{\Sigma} / F_{\text{печи}} = F_{\Sigma} / B_{\text{п}} \cdot (H_{\text{п}} - H_{\text{заг}}) = 2,12 / 3,55 \cdot (2,15 - 0,15) = 0,3.$$

Следовательно, $\xi_{\text{суж.}} = 0,42$

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

1.5. Потери энергии на преодоление геометрического напора, Н/м^2

$$h_{\text{геом.}} = H_{\text{верт}} \cdot g \cdot (\rho_{\text{в}} (T_0 / T_{\text{в}}) - \rho_{\text{пр}} (T_0 - T_{\text{верт пр.}})).$$

$$h_{\text{геом.}} = 3,09,81(1,29(273 / 293) - 1,28(273 / 1198)) = 26,76 \text{ Н/м}^2.$$

1.6. Суммарные потери напора в вертикальных каналах, находим по формуле (1), Н/м^2

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

2. Определяем потери энергии при движении продуктов горения в первом борове (участки l_1 и l_2). 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 бор и поворота в первом борове ($h''_{\text{м.с.}}$), Н/м^2

$$h''_{\text{пот}} = h''_{\text{тр}} + h''_{\text{м.с.}} \quad (2)$$

2.1. Находим площадь сечения и размеры первого борва.

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

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

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

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

Гидравлический диаметр борва,

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

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

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

$$T^{\text{бор}}_{\text{пр.кон.}} = T^{\text{верт}}_{\text{пр.}} - \Delta T_1 \cdot L_{\text{бор.}}$$

где $L_{\text{бор}}$ – длина борва до рекуператора, $L_{\text{бор}} = l_1 + l_2 = 5 + 6 = 11 \text{ м}$

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

Средняя температура газов в борове:

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

2.3. Потери энергии на трение газов о стенки в первом борове, Н/м^2

$$h''_{\text{тр}} = \lambda \cdot (\rho_{\text{пр}} \cdot \omega_{\text{г}}^2 / 2) \cdot (L_{\text{бор}} / d_{\text{г.б.}}) \cdot (T^{\text{бор}}_{\text{пр.ср.}} / T_0).$$

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

2.4. Потери энергии при двух поворотах на 90° на пути от вертикальных каналов до рекуператора, Н/м^2

$$h''_{\text{м.с.}} = \xi_{\Sigma} \cdot (\rho_{\text{пр}} \cdot \omega_{\text{г}}^2 / 2) \cdot (T^{\text{бор}}_{\text{пр.ср.}} / T_0),$$

где $\xi_{\Sigma} = \xi_1 + \xi_2$ – суммарный коэффициент местного сопротивления; ξ_1 –

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

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

2.5. Суммарные потери энергии в первом борове находим по формуле (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 ($h^{\text{рек}}_{\text{ш.п.тр}}$).

$$h^{\text{рек}} = h^{\text{рек}}_{\text{м.с.1}} + h^{\text{рек}}_{\text{ш.п.тр}} + h^{\text{рек}}_{\text{м.с.2}} \quad (3)$$

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

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

$\xi_{\text{расш}}$ – коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении канала, определяется в зависимости от отношения площадей $F_{\text{бор}} / F_{\text{рек}} = (1 \cdot 2,13) / (1,4 \cdot 2,5) = 0,61$. Находим по приложению (Таблица П1) $\xi_{\text{расш}} = 0,16$

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

3.2. Потери энергии при внезапном сужении (изменение скорости) при выходе из рекуператора $h^{\text{рек}}_{\text{суж}}$, Н/м^2

$$h^{\text{рек}}_{\text{суж}} = \xi_{\text{суж}} \cdot (\rho_{\text{пр}} \cdot \omega_{\text{рек}}^2 / 2) \cdot T^{\text{рек}}_{\text{вых}} / T_0,$$

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

$$\omega_{\text{рек}} = V / 3600 \cdot V_{\text{рек}} \cdot N_{\text{рек}} = 19165 / 3600 \cdot 1,4 \cdot 2,5 = 1,52 \text{ М/с}$$

Температура газов на выходе из рекуператора

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

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

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

3.3. Потери энергии в рекуператоре находим по формуле (3):

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

4. Определим потери энергии на участке от рекуператора до шибера, $h^4_{\text{пот}}$, Н/м^2

$$h^4_{\text{пот}} = \lambda (\rho_{\text{пр}} \cdot \omega_{\text{г}}^2 / 2) \cdot (L_{\text{рек-шив}} / d_{\text{г.б}}) \cdot (T^{\text{рек-шив}}_{\text{пр.ср}} / T_0)$$

4.1. Найдем среднюю температуру газов на этом участке.

Температура газов на шивере, К

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

Где $l_3 = 6,0 \text{ м}$, расстояние от рекуператора до шибера

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

Средняя температура газов на участке рекуператор – шибер, К

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \Sigma h_{\text{пот}} &= h_{\text{пот}}^{\text{верт.к}} + h_{\text{пот}}^{61} + h_{\text{пот}}^{\text{рек}} + h_{\text{пот}}^{62} = \\ &= 33,83 + 85,16 + 136,505 + 2,34 = 257,835 \text{ Н/м}^2 \end{aligned}$$

Ответ: Суммарные потери напора на пути движения продуктов горения по дымовому тракту от рабочего пространства методической печи до дымовой трубы составит 257,835 Н/м².

Практическое задание №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 практического задания №2

Исходные данные для работы

Общие для работы в целом, результаты расчета практического задания № 1:

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

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

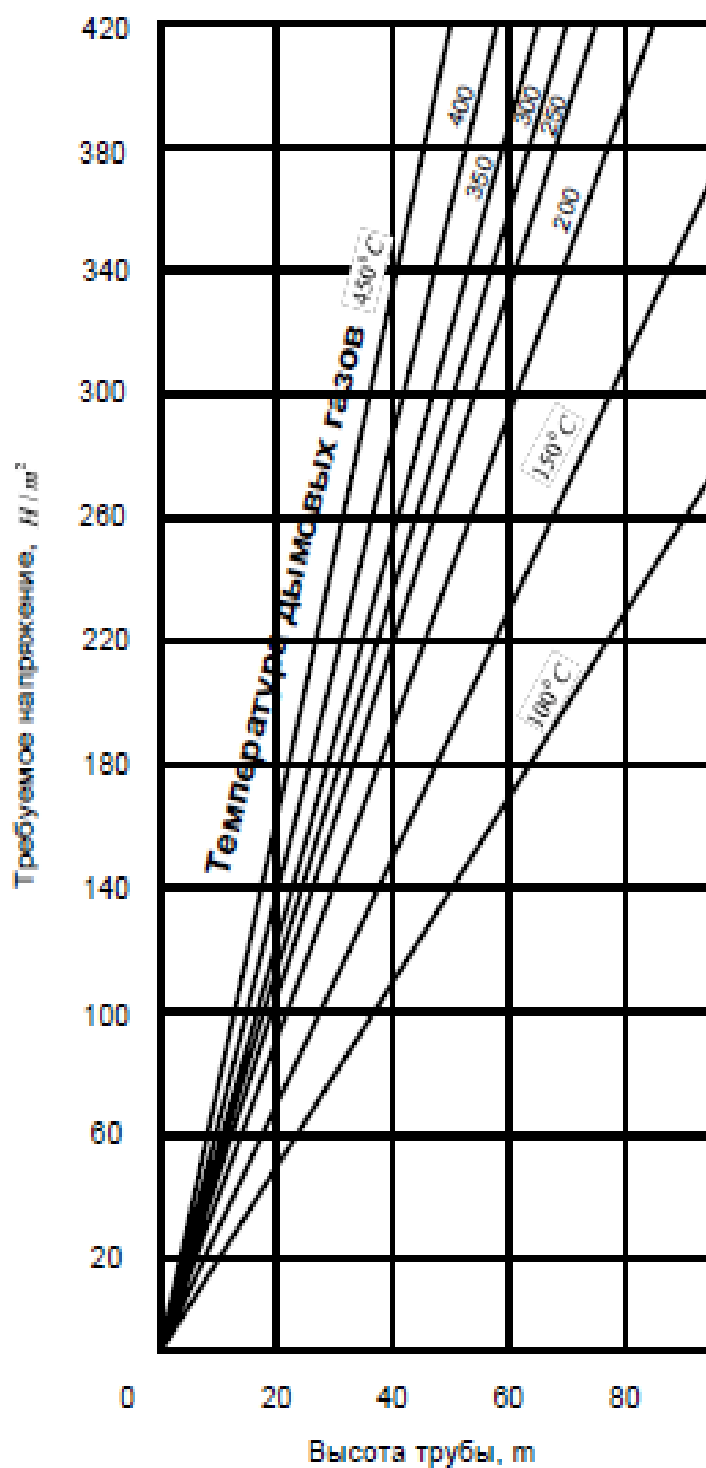


Рис.3. График для ориентировочного выбора высоты трубы в зависимости от требуемого разряжения при температуре дымовых газов

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

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

4. По графику (рис. 3) ориентировочно находим высоту трубы.

При температуре дымовых газов $T_{\text{пр.гр.}}=717\text{ К}=444$ и величине действительного разряжения $h_{\text{действ.}}=335,5186 \text{ Н/м}^2$ ориентировочная высота трубы будет равна: $H_{\text{тр.}}=50\text{ м}$.

5. Определяем среднюю температуру газов в трубе, К

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

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

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

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

6. Находим средний диаметр и площадь сечения трубы:

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

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

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:

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

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

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

Практическое задание № 3

Расчет эжектора для удаления продуктов горения из методической нагревательной печи

В работе необходимо определить основные размеры и параметры эжектора, а также скорость эжектируемого газа на выходе из сопла. Эжекция производится воздухом при $T_v = 293\text{К}$, 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: η – к.п.д. эжектора, $\omega_{\text{возд.сопл}}$ – скорость течения эжектирующего газа, диаметр смесителя, кратность эжекции (отношение эжектирующего газа и эжектируемого), β – отношение площади сечения эжектирующего сопла и площади сечения смесителя.

Целью расчета эжектора является определение коэффициента полезного действия η и необходимой скорости истечения эжектирующего газа (воздуха) $\omega_{\text{возд.сопл}}$ на выходе из сопла. Основной величиной, определяющей размеры эжектора является диаметр смесителя d_3 (см. рис.), который можно определить, зная скорость потока в смесителе $\omega_{\text{см.эж}}$. Для расчетов эжектора применяют номограмму (рис.5) устанавливающую зависимость максимального значения к.п.д. эжектора η_{max} и оптимального значения β от температуры дымовых газов и значения кратности эжекции n . Максимальный к.п.д. эжектора обеспечивается оптимальным соотношением размеров отдельных его частей (рис.4).

Пример выполнения практического задания №3

Исходные данные для работы: общие для раздела в целом

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

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

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

$$n = G_g / G_{\text{возд.}} = 1,6.$$

В этом случае расход массы воздуха в эжекторе

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

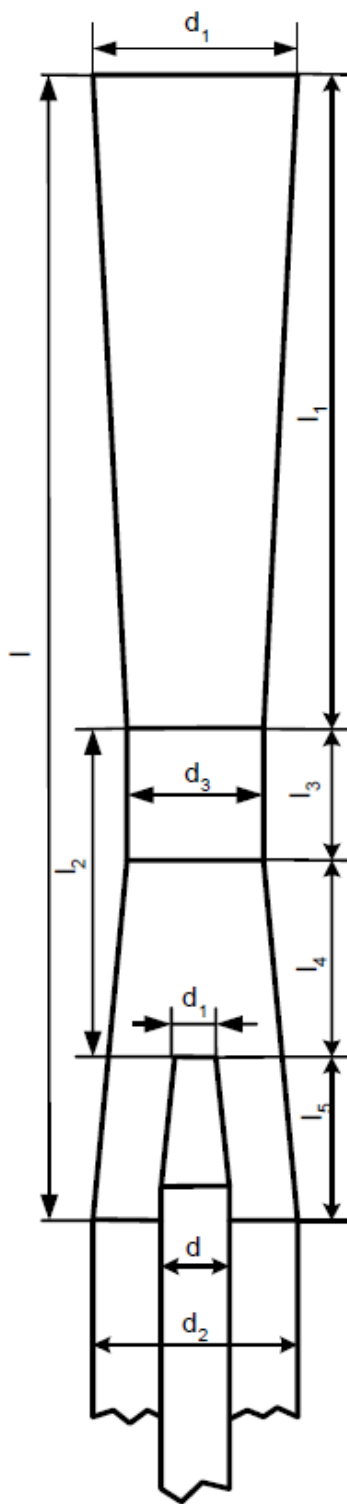


Рис.4. Схема эжектора

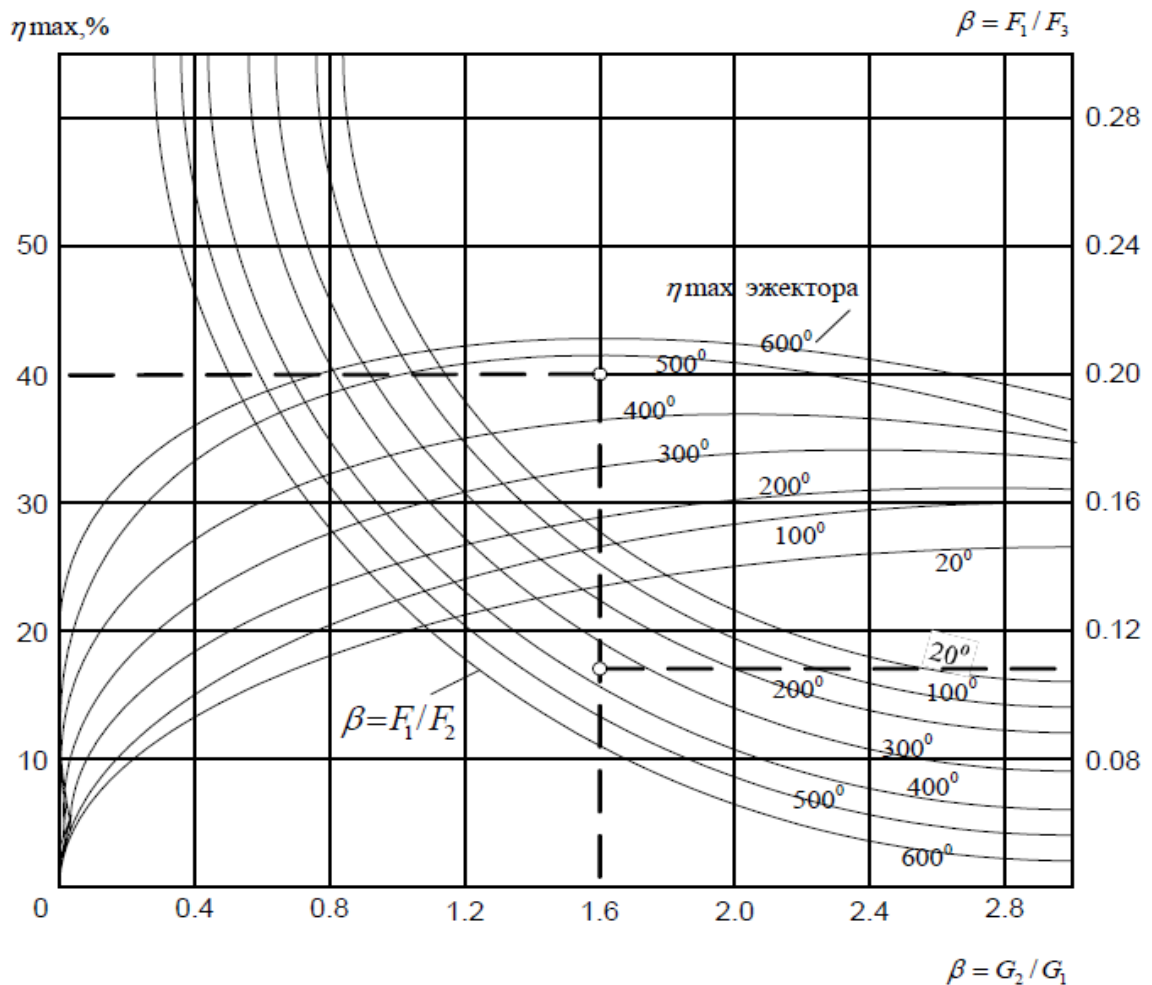


Рис.5. Зависимость КПД эжектора и параметра β от температуры дыма ($^{\circ}\text{C}$) и величины кратности эжекции n

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

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

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

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

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 $\eta_{\text{диф}}$ – к.п.д. 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$d_1 = d_3 \cdot \sqrt{\beta} = 0.76 \cdot \sqrt{0.115} = 0.258$$

10. Скорость эжектирующего воздуха в сопле

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

Ответ: К.п.д. эжектора 40%;
скорость эжектирующего воздуха в сопле 68,13 м/с;
диаметр смесителя эжектора $d_3 = 0,76$ 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.

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot S = \frac{\frac{S}{\lambda}}{\frac{1}{\alpha}}$$

где α – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности тела, $Вт / м^2 \cdot ^\circ C$; λ – коэффициент теплопроводности материала тела, $Вт / м \cdot ^\circ C$; 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.

Нагрев тонких изделий

На рис.6 показаны графики нагрева изделий при постоянной температуре печи.

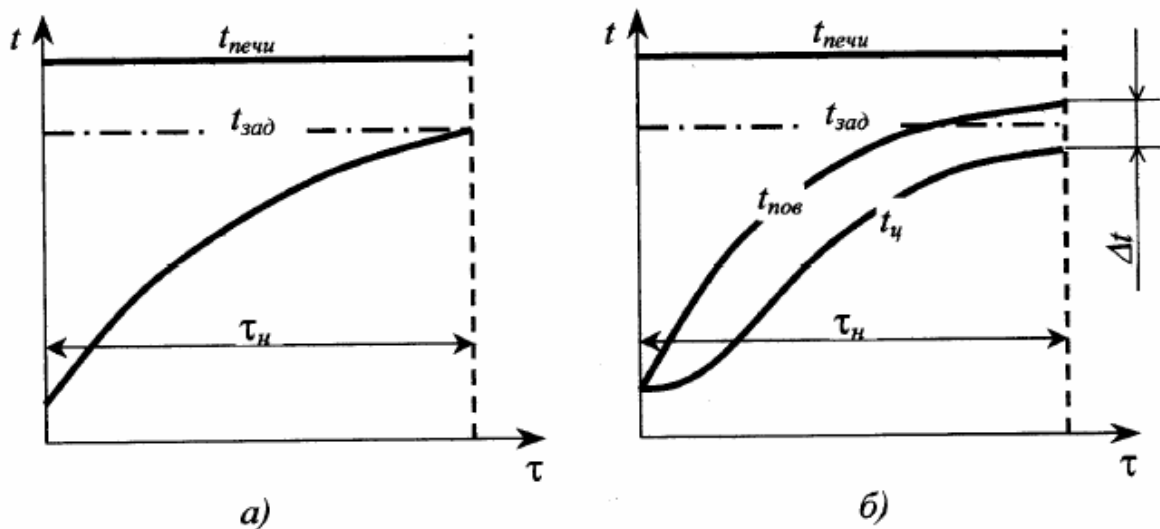


Рис. 6. График нагрева изделий в печи периодического действия при постоянной температуре печи. а) - тонкие изделия; б) - массивные изделия.

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 времен нагрева изделий по сравнению со временем нагрева по постоянной температуре печи (рис. 7).

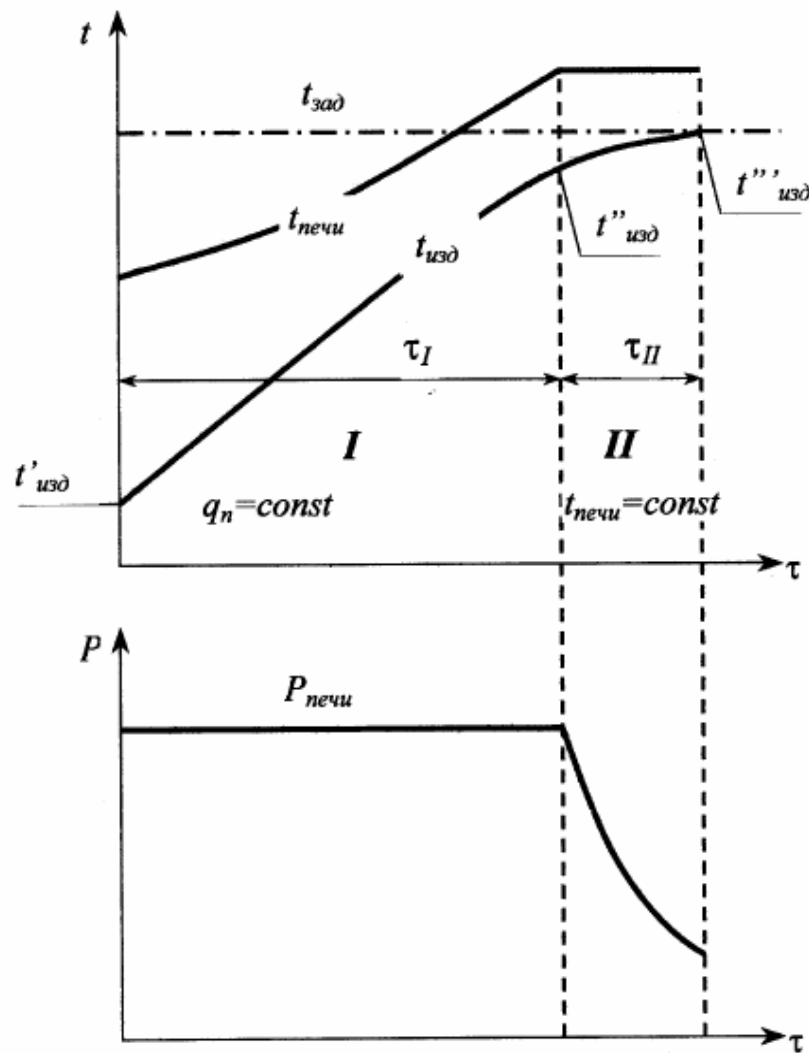


Рис. 7. График нагрева тонкого изделия в электрической печи периодического действия

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

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

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

$P_{печи}$ - мощность печи: Вт

$P_{пот}$ - мощность тепловых потерь печи: Вт

$F_{изд}$ - тепловоспринимающая поверхность изделий: м²

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

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

здесь $T_{печи}$ и $T_{изд}$ - текущие значения температур печи и изделия, К; $c_{пр}$ - приведенный коэффициент лучеиспускания, Вт/м² · К⁴.

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

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

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

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

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

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

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; °C

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

Количество тепла, воспринятое изделием за период первого этапа, будет равно: $q_n \cdot F_{изд} \cdot \tau_1$, где τ_1 - длительность первого этапа. Это тепло пойдет на нагрев изделий от начальной температуры $t'_{изд}$ до $t''_{изд}$, поэтому можно написать:

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

и, следовательно,

$$\tau_1 = \frac{G c (t''_{изд} - t'_{изд})}{q_n F_{изд}}, \quad (7)$$

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

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

здесь q_n - может быть определен из (1); $\alpha_{изл}$ - коэффициент теплоотдачи излучением, может быть определен из формулы

$$\alpha_{изл} = c_{np} \frac{\left[\left(\frac{T_{печи}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{изд}}{100}\right)^4\right]}{t_{печи} - t_{изд}}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C} \quad (9)$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_{конв}$ может быть рассчитан в зависимости от характера конвекции. В печах с естественной конвекцией он

меняется сравнительно мало и может быть в среднем принят равным $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Учитывая это для момента времени, соответствующего достижению температурой печи заданного значения $T''_{\text{печи}}$ будем иметь:

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

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

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

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

$$\Psi(Y) = \frac{1}{4} \ln \frac{1+Y}{1-Y} + \frac{1}{2} \text{arctg} Y, \quad (12)$$

где Y - аргумент функции, $Y = \frac{T_1}{T_2}$.

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 по формуле (12), 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

$$\tau_2 = \frac{Gc}{\alpha F_{изд}} \ln \left(\frac{t_{печи} - t_{изд}^{II}}{t_{печи} - t_{изд}^{III}} \right) \quad (13)$$

В (12) $t_{изд}^{II}$ и $t_{изд}^{III}$ — температуры изделий в начале и конце рассматриваемого периода известны, так же как и температура печи - $t_{печи}$, неизвестным остается для определения τ_2 значение коэффициента теплоотдачи $\alpha = \alpha_{изл} + \alpha_{конв}$. Последнее следует определять как среднее арифметическое из значений α для начала и конца периода, когда $t_{изд} = t_{изд}^{II}$ и $t_{изд} = t_{изд}^{III}$ соответственно. Значения $\alpha_{изл}$ для этих моментов времени могут быть вычислены из (9), а $\alpha_{конв}$ 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 (рис. 8).

На первом этапе изделия будут нагреваться тепловым потоком q_n , который определяется по (1) В течение времени $\tau^I = 0,3S^2/a$ для бесконечной пластины толщиной $2S$ и $\tau^I = 0,25R^2/a$ 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 $\Delta t_1 = q_n R / 2\lambda$ для пластины и $\Delta t_1 = q_n R / 2\lambda$ для цилиндра (рис. 8). К концу начального и к началу регулярного периода нагрева температура поверхности пластины достигнет

$$t_{нов}^I = 1,27\Delta t = 1,27q_n S / 2\lambda,$$

а температура центра

$$t_{центр}^I = 0,27\Delta t = 0,27q_n S / 2\lambda,$$

аналогично для цилиндра

$$t_{нов}^I = 1,5\Delta t = 1,5q_n R / 2\lambda \quad \text{и} \quad t_{центр}^I = 0,5\Delta t = 0,5q_n R / 2\lambda.$$

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

$$\Theta = t_{\text{пов}_{\tau+1}} - t_{\text{пов}_{\tau}} = \frac{q_n}{c\rho S} \quad (14)$$

и

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

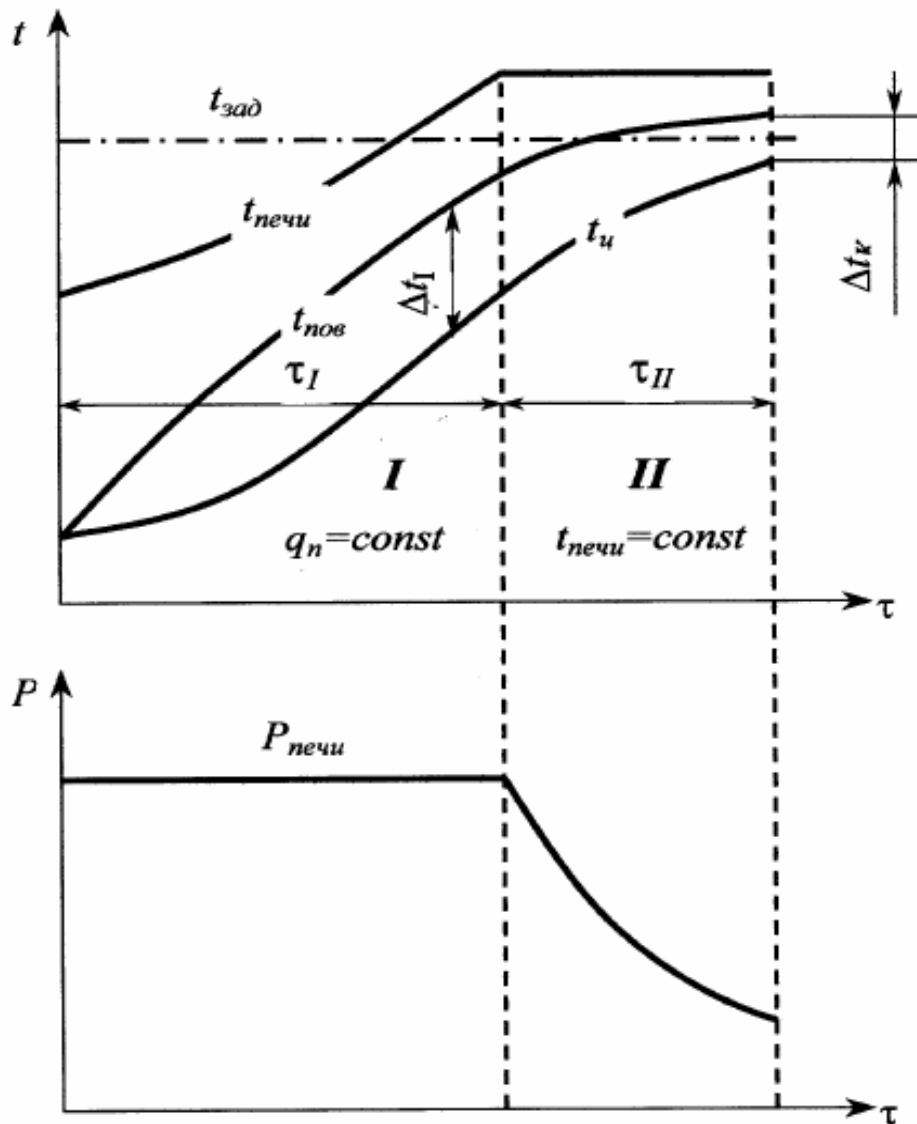


Рис. 8. График нагрева массивного изделия в электрической печи периодического действия.

Аналогично этому

$$\tau'' = \frac{t''_{нов} - t'_{нов}}{\Theta} = \frac{t''_{нов} - t'_{нов}}{2q_n} \cdot c\rho R$$

для цилиндра

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

$$\tau_1 = \tau' + \tau'' = 0,3 \frac{S^2}{a} + \frac{c\rho S}{q_n} (t''_{нов} - t'_{нов}) \quad (15)$$

и для бесконечного цилиндра

$$\tau_1 = \tau' + \tau'' = 0,25 \frac{R^2}{a} + \frac{c\rho R}{q_n} (t''_{нов} - t'_{нов}) \quad (16)$$

Здесь температура поверхности изделия к концу первого этапа в соответствии с (6) может быть определена из формулы, °C

$$t''_{нов} = 100 \sqrt[4]{\left(\frac{T_{печи}}{100}\right)^4 - \frac{q_n}{c_{np}}} - 273 \quad (17)$$

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 $t''_{центр} = t''_{нов} - \Delta t$ 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''_{cp} . Она может быть принята равной $t''_{cp} = t''_{нов} - 0,7\Delta t$ для бесконечной плиты и $t''_{cp} = t''_{нов} - 0,6\Delta t$ 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 (рис. 1П - 4П) с тем лишь, однако, изменением, что относительные температуры будут равны:

$$\Theta_{нов} = \frac{t_{печи} - t'''_{нов}}{t_{печи} - t''_{cp}}$$

и

$$\Theta_{\text{центр}} = \frac{t_{\text{печи}} - t_{\text{центр}}'''}{t_{\text{печи}} - t_{\text{ср}}'''}.$$

Значения коэффициента теплоотдачи α , подставляемые в число Био при расчете времени нагрева массивных изделий во втором этапе следует брать равными средним значениям из соответствующих коэффициентов для температур $t_{\text{нов}}''$ и $t_{\text{нов}}'''$. Если нагрев при постоянной температуре печи осуществляется от нуля (или близкой к нулю температуры), то значения α следует брать по рис. 5П (приложения)

Пример выполнения практического задания № 2.1

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

Итак, имеем:

$$S = 0,5 \text{ м};$$

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

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

Первый этап нагрева согласно (1)

$$q_n = \frac{25 - 5}{0,84} \cdot 10^3 = 23\,800 \text{ Вт} / \text{м}^2$$

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 (3)

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

По (4)

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

По (6)

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

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

Определяем коэффициент теплоотдачи α для температур изделий 0 и 807°С
В начальный момент нагрева температура печи упадет по (2) до

$$t_{печи}' = 100 \sqrt[4]{\frac{273}{100} + \frac{23800}{4,48}} - 273 = 583 \text{ } ^\circ\text{C}$$

По (9)

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

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

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

место нагрев тонких изделий.

Время нагрева изделий до 807 °С при постоянном удельном тепловом потоке в 23800 Вт/м² будет равно по (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 °С,

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

Коэффициенты теплоотдачи при 807 и 860 °С:

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

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

$$\alpha_{cp} = 266 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{°С}$$

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 (11):

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

здесь значения функции Ψ определены по формуле (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 °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. С другой стороны, при загрузке и выгрузке изделий печь обычно дополнительно охлаждается, снижая свою температуру; $t'_{печи}$, поэтому фактическое время нагрева слитков до 860 °С будет весьма близким к расчетному 2,7 ч.

Пример выполнения практического 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 $\Delta t_{max} = 50$ °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) с учетом (3) получим

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

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

$$T''_{нов} = 0,85 \cdot 950 \approx 810^\circ\text{C}, \text{ или } 1083 \text{ K};$$

с другой стороны, определяем максимальный допустимый удельный тепловой поток q_n из условий $\Delta t_{\text{макс}} = 50^\circ\text{C}$:

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

Температура поверхности изделия к концу этапа нагрева при $q_n = \text{const}$ по (6)

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

здесь

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

Время нагрева слитка до $t_{нов} = 938^\circ\text{C}$ согласно (16)

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

$$= 0,33 + 5,63 = 5,96 \text{ ч}$$

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 °С, получаем, что температура поверхности изделий к моменту начала регулярного режима

достигнет значения

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

температура на его оси

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

температура на его оси к моменту окончания регулярного режима

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

а средняя температура по сечению слитка к этому моменту

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

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

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

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

считая его бесконечным цилиндром.

При начале нагрева $t_{печи} = 1000^{\circ}C$; $t_{нов} = 938^{\circ}C$ по (9)

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

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

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

Среднее значение коэффициента теплоотдачи

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

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

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

С учетом этих данных по графикам нагрева поверхности цилиндра (рисю П4) 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 находим $\Theta_{центр} = 0,77$, откуда

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

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

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

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

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

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

Средняя температура вала к моменту окончания первого периода нагрева

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

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

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

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

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

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

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

Полное время нагрева изделия:

$$\tau_1 + \tau_2 = 5,81 + 0,72 = 6,5 \text{ ч}$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Metallurgical heat engineering /Под ред. В.А.Кривандина. Том 1 и 2, - М. Metallurgy, 1986 г.
2. Metallurgical heat engineering /Под ред. М.А.Глинкова. Том 1 и 2, - М. Metallurgy, 1974 г.
3. Кривандин В.А., Филлимонов Ю.П. Теория конструкции и расчеты металлургических печей. Том 1 и 2, - М. Metallurgy, 1986 г.
4. Кривандин В.А., Марков Б.А. Metallurgical furnaces. М. Metallurgy, 1977 г.
5. Минаев А.Н., Шипилин Б.И. Liquefying furnaces and dryers., М. Mashgiz, 1959 г.
6. Methodical instructions for practical lessons in the discipline «Furnaces and dryers of casting shops» VlgU. Comp. Sharshin V.N. Vladimir, 2000, 36 p
7. Methodical instructions for laboratory work in the discipline «Furnaces of casting shops». VlgU. Comp. Sharshin V.N. Vladimir, 2001, 28 p
8. Methodical instructions for course work in the discipline «Furnaces of casting shops». VlgU, comp. Sharshin V.N.. Vladimir, 2002, 20 p
9. Svenchanskiy A.D. Electric industrial furnaces. In two parts. Edition second, reworked, М. Energy, 1975 г.

