

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»

И. Л. Иокова
И. Е. Мигуцкий
С. М. Хужакулов
А. А. Абразовский

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
УСТАНОВКИ

Практикум
для студентов специальности 7-07-0712-02
«Теплоэнергетика и теплотехника»
профилизаций: «Промышленная теплоэнергетика»
и «Теплоэнергетические установки и системы теплоснабжения»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск
БНТУ
2024

УДК 66.041+662.92+621.783.2(076.5)

ББК 31.391я7

В93

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»
Гомельского государственного технического университета
им. П. О. Сухого (зав. каф., канд. техн. наук *Е. Н. Макеева*);
заведующий технологическим отделом инженерно-технологического
центра РУП «БЕЛТЭИ», канд. техн. наук, доцент *А. А. Бобич*

Иокова, И. Л.

В93 **Высокотемпературные теплотехнологические установки : практикум для студентов специальности 7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника» профилизиаций: «Промышленная теплоэнергетика» и «Теплоэнергетические установки и системы теплоснабжения» / И. Л. Иокова [и др.]. – Минск : БНТУ, 2024. – 54 с.
ISBN 978-985-31-0067-9.**

Практикум составлен как дополнение к лекционному материалу по дисциплине «Высокотемпературные теплотехнологические установки».

Практикум предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника» профилизиаций: «Промышленная теплоэнергетика» и «Теплоэнергетические установки и системы теплоснабжения».

УДК 66.041+662.92+621.783.2(076.5)

ББК 31.391я7

ISBN 978-985-31-0067-9

© Иокова И. Л., Мигуцкий И. Е.,
Хужакулов С. М., Абразовский А. А., 2024
© Белорусский национальный
технический университет, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа № 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОУДАЧИ К САДКЕ	5
Лабораторная работа № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА САДКИ КЛАССИЧЕСКОЙ ФОРМЫ В КАМЕРНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ.....	14
Лабораторная работа № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА САДКИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ В КАМЕРНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ.....	22
Лабораторная работа № 4 ПОСТРОЕНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПЕЧИ, РАБОТАЮЩЕЙ ПО ДВУХЗОННОМУ ТЕМПЕРАТУРНОМУ ГРАФИКУ	32
Литература	37
Приложение А.....	39
Приложение Б	44
Приложение В.....	45
Приложение Г	49
Приложение Д.....	54

Введение

Высокотемпературные теплотехнологические установки являются неотъемлемой частью машиностроительных, металлургических, станкостроительных и других видов производств, где в их рабочей камере происходят различные физико-термические высокотемпературные процессы, такие как тепловая активация металлов (нагревательные печи), термическая и химико-термическая обработка (термические печи).

Нагревательные и термические печи являются теплотехнологическими агрегатами, предназначенными для осуществления определенного технологического процесса. Основная теплотехническая задача таких печей – передать тепло нагреваемому металлу (заготовке, садке) в соответствии с технологией его нагрева или термической обработки. Таким образом, определяющим процессом для высокотемпературной теплотехнологической установки является теплопередача к металлу, подвергаемому тепловой обработке, и именно расчет этой теплопередачи есть основа расчета нагревательной и термической печи.

Теплопередача к заготовке в печах происходит излучением и конвекцией, а распространение тепла внутри металла – теплопроводностью. Основные законы, описывающие эти виды теплопередачи, а также методики определения коэффициентов теплоотдачи, приведены в данном практикуме.

Основной расчет теплопередачи дает возможность определить необходимое время нахождения заготовки в рабочей зоне печи и в печи в целом, найти необходимые размеры рабочего пространства (профилирование печи) или производительности печи, а также теплотехнические характеристики средств нагрева.

Данный практикум предполагает развитие у студентов навыков проведения численных экспериментов, построения температурных графиков высокотемпературных теплотехнологических установок, обработки экспериментальных данных, в том числе с применением ЭВМ и правильной оценки полученных результатов.

В практикум включены четыре работы, рассчитанные на 16 часов лабораторных работ (1 семестр изучения дисциплины).

Практикум составлен на основе опыта преподавания дисциплин: «Высокотемпературные теплотехнологические установки» на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» Белорусского национального технического университета (Республика Беларусь) и «Тепломассообменные процессы и устройства» на кафедре «Теплоэнергетика» Каршинского инженерно-экономического института (Республика Узбекистан).

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ К САДКЕ

Цель работы: освоить основные методики определения значения коэффициента теплоотдачи к поверхности нагреваемой цилиндрической садки (заготовки) из ст40 размерами: $d = 160$ и $l = 190$ мм.

Теоретическая часть

Нагрев металла в высокотемпературных теплотехнологияхковки, штамповки, прокатки и термообработки заготовительного и механосборочного производств машиностроительных и автотракторных предприятий выполняется в камерных (как это имеет место в нашем случае) и проходных печах [1–6]. Очень часто нагрев совершается при граничных условиях 3-го рода, когда температура печи $t_{\text{печ}}$ задана. Наиболее простое задание граничных условий (как это имеет место в нашем случае) – это $t_{\text{печ}} = \text{const}$. Если газы излучающие, то с определенными допущениями можно записать $t_{\text{печ}} = t_{\text{г}}$. Тогда граничное условие 3-го рода будет выглядеть

$$t_{\text{г}} = \text{const}. \quad (1.1)$$

В нашем случае газы не обладают способностью участвовать в лучистом теплообмене, т. к. состоят из молекул O_2 и N_2 (двухатомные молекулы). Молекул CO_2 и H_2O (трехатомные молекулы) практически нет в камере лабораторной печи (рис. 1.1). Теплообмен к поверхности нагреваемой заготовки будет совершаться излучением от электрического нагревателя сопротивления, нагретых футеровочных материалов (кладка) и конвекцией от нагретого воздуха.

В теплотехнических расчетах при сложном теплообмене, как в нашем случае, используют общий коэффициент теплоотдачи – эффективный (полный), представляющий собой сумму коэффициентов лучистой и конвективной теплоотдачи [7]:

$$\alpha_{\text{эфф}} = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}, \quad (1.2)$$

где $\alpha_{л}$ и $\alpha_{к}$ – значения коэффициентов теплоотдачи к поверхности нагреваемой металлической заготовки лучеиспусканием (излучением) и конвекцией соответственно.

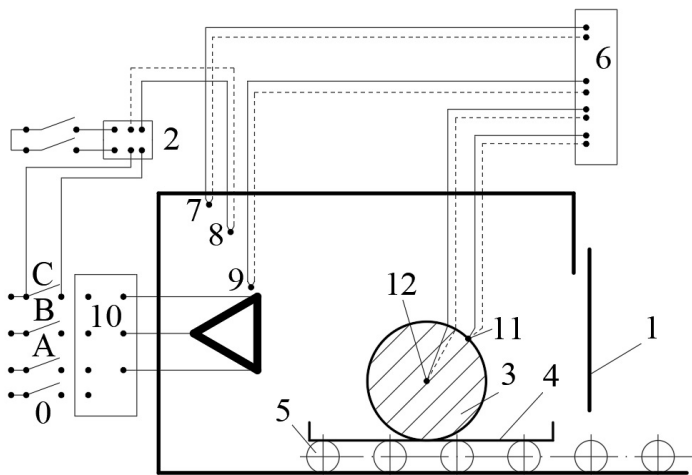


Рис. 1.1. Схема лабораторной камерной электропечи:

- 1 – камерная печь; 2 – регулятор температуры печи; 3 – нагреваемая заготовка;
- 4 – поддон для загрузки заготовки в рабочее пространство печи;
- 5 – роликовый рольганг; 6 – цифровой потенциометр для измерения температуры;
- 7, 8 и 9 – термопары для измерения температуры футеровки (кладки) рабочей камеры печи, газов и полочки, на которой расположены спирали нагревателей сопротивления, соответственно (приложение А); 10 – магнитный пускатель (контактор);
- 11 и 12 – соответственно термопары для измерения температуры на поверхности и в середине (центре) стальной заготовки (приложение А)

Для действующих промышленных печей $\alpha_{эфф}$ обычно находится в пределах [1, 8]:

- для нагревательных печей $\alpha_{эфф} = 150\text{--}520 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- для термических печей (здесь температура $t_r \approx 1000 \text{ }^\circ\text{C}$) $\alpha_{эфф} = 35\text{--}200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

В условиях лабораторной работы №1 температура теплоотдающих тел будет ниже $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, поэтому контрольное значение $\alpha_{эфф}$ будет находиться в интервале значений $\alpha_{эфф} = 10\text{--}50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Значения коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием (излучением) поверхностью печи для моментов времени τ_i ($\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_i$)

можно рассчитать с помощью закона Стефана-Больцмана по следующей формуле:

$$\alpha_{\text{лт}_i} = C_{\text{п}} \frac{\left(\frac{T_{\text{рт}_i}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\tau_i}^{\text{п}}}{100}\right)^4}{t_{\text{рт}_i} - t_{\tau_i}^{\text{п}}}, \quad (1.3)$$

где $t_{\tau_i}^{\text{п}}$ – температура поверхности нагреваемой заготовки в момент времени τ_i , °С;

$C_{\text{п}}$ – приведенная степень лучеиспускания (коэффициент излучения) в системе «поверхность нагреваемой заготовки–футеровка печи», Вт/(м² · К⁴):

$$C_{\text{п}} = \varepsilon_{\text{п}} \cdot C_0, \quad (1.4)$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ – приведенная степень черноты системы;

$C_0 = 5,67$ Вт/(м² · К⁴) – степень лучеиспускания абсолютно черного тела.

Приведенная степень черноты системы $\varepsilon_{\text{п}}$ находится в соответствии с выражением

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{1}{1 + \varphi_{1,2} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) + \varphi_{2,1} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}, \quad (1.5)$$

где ε_1 и ε_2 – соответственно степень черноты излучающей футеровки печи (кладки) и лучеиспускающей поверхности нагреваемой заготовки: $\varepsilon_1 = 0,86$ для футеровки (кладки) и $\varepsilon_2 = 0,8$ для цилиндра соответственно [1, 7, 9];

$\varphi_{1,2}$ и $\varphi_{2,1}$ – соответственно угловые коэффициенты «футеровка – поверхность заготовки» и «поверхность заготовки – футеровка» (рис. 1.2) [10]:

$$\varphi_{1,2} = \frac{F_2}{F_1}; \quad \varphi_{2,1} = 1. \quad (1.6)$$

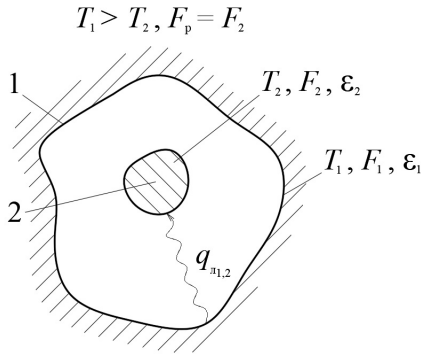


Рис. 1.2. Схема лучистого теплообмена в камере печи:
1 – излучающая футеровка; 2 – нагреваемая заготовка

Площади поверхностей излучающей футеровки F_1 и цилиндра F_2 можно определить из рис. 1.3.

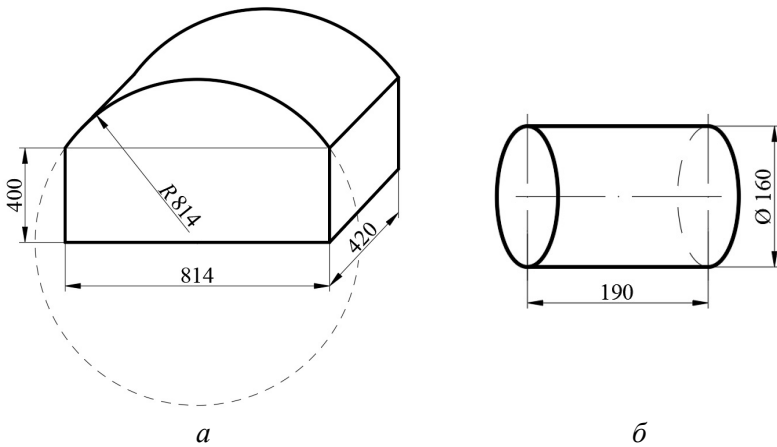


Рис. 1.3. Чертежи для определения расчетных поверхностей теплообмена:
a – эскизный чертеж рабочего пространства камерной электропечи
(камера выполнена из кирпича марки ШБЛ-2,0); *б* – эскизный чертеж заготовки
в виде цилиндра с размерами: $d = 160$ и $l = 190$ мм

Обращаясь к выражению (1.2), видим, что эффективное значение коэффициента теплоотдачи к поверхности нагреваемого цилиндра

содержит конвективную составляющую α_k , которая, как и α_l , изменяется в течение времени выполнения эксперимента ($\alpha_k = f_1(\tau)$).

Для начала воспользуемся упрощенной методикой. В данном случае можно воспользоваться следующим соотношением между конвекцией и излучением [1]:

$$\alpha_k = (0,05 \dots 0,15) \alpha_l. \quad (1.7)$$

Для более точного расчета будем полагать, что конвективная составляющая теплообмена α_k может быть классифицирована как теплообмен в неограниченном пространстве, естественная тепловая конвекция, величина $\alpha_{k\tau_i}$ в момент времени τ_i находится в соответствии с уравнением [7]:

$$Nu_m = c (Gr \cdot Pr)_m^n, \quad (1.8)$$

где c , n и m – соответственно коэффициент (табл. 1.1), показатель степени (табл. 1.1) и индекс, определяемые экспериментально, причем индекс m означает, что величины критериев вычислены при определяющих геометрических размерах и температуре;

Pr – число (критерий) Прандтля (табл. Б.1);

Nu_m – значение числа Нуссельта, который в свою очередь также определяется как

$$Nu_m = \frac{\alpha_k \cdot d}{\lambda}, \quad (1.9)$$

где d – диаметр заготовки (цилиндра), м;

λ – коэффициент теплопроводности греющей печной среды (приложение Б), Вт/(м · К);

Gr – число подобия Грасгофа

$$Gr = \frac{g \cdot d^3 \cdot \Delta t \cdot \beta}{\nu^2}, \quad (1.10)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

$\Delta t = t_r - t_M^n$ – разность между температурой греющей печной среды и температурой поверхности заготовки, °С;

$\beta = \frac{1}{t_r + 273}$ – коэффициент объемного расширения печной среды, 1/К;

ν – коэффициент кинематической вязкости печной среды, $\text{м}^2/\text{с}$ (приложение Б).

Таблица 1.1

К выбору значений c и n в формуле (1.8)

Значение $Gr \cdot Pr$	Значение c	Значение n
$1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$2 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^{13}$	0,135	0,333

Методика выполнения эксперимента

Электродпечь прогревается накануне выполнения работы № 1. Заготовка должна быть вне рабочего пространства печи и иметь температуру окружающей среды, которая измеряется термометром.

В фиксированный момент времени (сразу же по получению задания на выполнение работы) нагреваемая заготовка загружается в камеру печи, имеющую фиксированную температуру. Сразу же после загрузки делается первый замер температур (инженер лаборатории указывает на маркировку термопар: ХК (хромель-копель) или ХА (хромель-алюмель)).

Время проведения эксперимента определяется преподавателем. Результаты измерений температуры газов t_r , температуры поверхности t_M^n и центра металлической садки t_M^n заносятся в протокол измерений (табл. 1.2).

Протокол измерений

Время, мин	t_r		t_M^{II}		t_M^{II}	
	мВ	°С	мВ	°С	мВ	°С
0						
3						
5						
10						
...						
τ_i						

Затем строится температурный график (рис. 1.4).

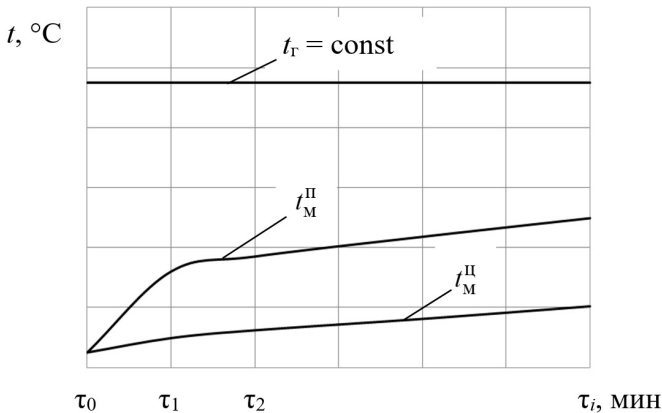


Рис. 1.4. Примерный вид зависимости температур газов, садки на поверхности и в ее середине (геометрическом центре) от времени нагрева при симметричном обогреве

Производится обработка экспериментальных данных.

Дается анализ результатов эксперимента:

- почему коэффициент теплоотдачи изменяется во времени;
- почему получены малые значения коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{эфф}}$ (сравнить с теоретической частью);

– какова погрешность эксперимента при использовании обеих методик расчета;

– правильно ли установлены термопары для измерения температур поверхности и середины (центра) нагреваемой садки (цилиндра).

Обработка экспериментальных данных

1. Данные протокола измерений обрабатываются с использованием таблиц ($mv = f(t)$) для термопар ХК и ХА (приложение А). Полученные данные заносятся в протокол измерений (табл. 1.2).

2. Определить площади излучающих поверхностей футеровки (кладки) печи F_1 и садки (цилиндра) F_2 с помощью рис. 1.3.

3. Определить угловые коэффициенты $\varphi_{1,2}$ и $\varphi_{2,1}$ по формуле (1.6).

4. Рассчитать приведенную степень черноты системы ε_{Π} по формуле (1.5).

5. Определить приведенную степень лучеиспускания C_{Π} по формуле (1.4).

6. Рассчитать численные значения коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием $\alpha_{\text{лт},i}$ для каждого эксперимента по формуле (1.3).

7. Определить при помощи всех вышеописанных методик значения коэффициента теплоотдачи конвекцией $\alpha_{\text{кт},i}$ для каждого момента времени из формул (1.7) и (1.9).

8. В соответствии с целью работы выполнить расчеты численных значений эффективного коэффициента теплоотдачи к садке (цилиндру) по обеим методикам $\alpha_{\text{эфф}}$ по формуле (1.2).

9. Для удобства, наглядности и в случае расчета лабораторной работы в программе MS Excel либо другой аналогичной программе результаты вычислений можно свести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

Результаты обработки экспериментальных данных

$t_{\Gamma},$ К	$t_{\text{М}}^{\text{П}},$ К	$\Delta t,$ °С	$\beta,$ 1/К	Gr	Gr·Pr	Nu	$\alpha_{\text{к}},$ Вт/(м ² ·К)	$\alpha_{\text{л}},$ Вт/(м ² ·К)	$\alpha_{\text{эфф}},$ Вт/(м ² ·К)

10. Построить графики для всех рассматриваемых методик:
 $\alpha_{л\tau_i} = f(\tau_i)$; $\alpha_{к\tau_i} = f(\tau_i)$ и $\alpha_{эфф\tau_i} = f(\tau_i)$.

11. Выполнить анализ полученных результатов работы.

Контрольные вопросы

1. Что такое высокотемпературные процессы?
2. Какие бывают физические высокотемпературные теплотехнологические процессы и что они из себя представляют?
3. Какие существуют операции нагрева? Для чего они применяются?
4. Какие существуют операции термической обработки?
5. Что такое плавление?
6. Что такое испарение?
7. Что такое термическое обезвоживание?
8. Какие существуют операции химико-термической обработки?
9. Что такое обжиг?
10. Что такое выплавка?
11. Что такое отжиг?
12. Что такое нормализация?
13. Что такое закалка?
14. Что такое отпуск?
15. Что такое улучшение?
16. Что такое высокотемпературные теплотехнологические установки?
17. Что такое промышленная печь?
18. Как делятся высокотемпературные теплотехнологические установки по технологическому признаку?
19. Как делятся высокотемпературные теплотехнологические установки по источнику тепловой энергии и способу использования теплоты уходящих газов?
20. Как делятся высокотемпературные теплотехнологические установки по конфигурации рабочего пространства?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА САДКИ КЛАССИЧЕСКОЙ ФОРМЫ В КАМЕРНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Цель работы: изучить методику определения времени нагрева садки классической формы в виде пластины из ст20 размерами $14 \times 145 \times 240$ мм. Определить время пребывания заготовки в рабочем пространстве печи и сопоставить его с экспериментальными данными.

Теоретическая часть

Время нагревания садки ложится в основу практически всех показателей, характеризующих экономичность как самой высокотемпературной теплотехнологической установки, так и теплотехнологии нагрева.

Это время может быть определено расчетным путем с использованием общеизвестных методик. Остановить выбор на конкретной методике, пригодной для рассматриваемого случая нагрева, – достаточно сложная задача. От правильности выбора зависит погрешность расчета, достигающая 10–50 %. Такая погрешность исключает возможность реальной оценки энергозатрат в теплотехнологиях горячего формообразования и термической термообработки [2].

Очевидно, что наиболее верный путь оценки энергозатрат – это эксперимент. В эксперименте конкретная заготовка подвергается нагреву до температуры операции. При этом фиксируется время нагрева, которое будет соответствовать действительному. Эксперимент будет проводиться в камерной электропечи сопротивления (рис. 2.1).

В нашем эксперименте нагреву подвергается заготовка (пластина) из ст20 размерами $14 \times 145 \times 240$ мм (рис. 2.2). Теплофизические характеристики различных марок сталей приведены в приложении В.

Нагрев заготовки от поверхности к ее середине происходит теплопроводностью. К поверхности теплота поступает теплоотдачей от газов, излучающей футеровки, электрических нагревателей и характеризуется коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{эфф}$, методики определения которого были представлены в лабораторной работе № 1.

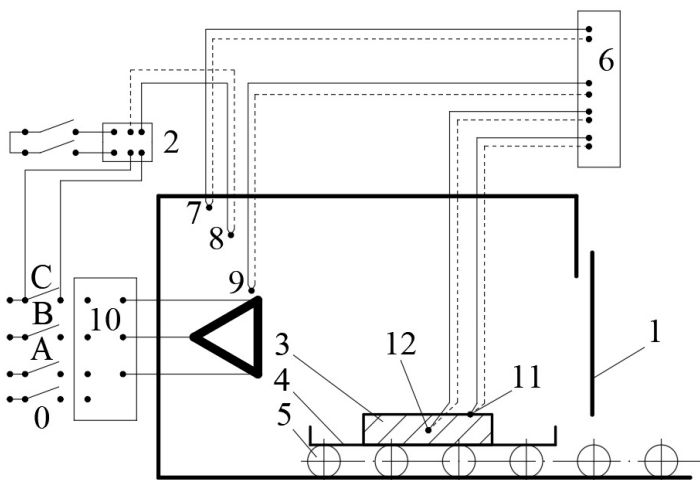


Рис. 2.1. Схема лабораторной камерной электропечи:

1 – камерная печь; 2 – регулятор температуры печи; 3 – нагреваемая заготовка; 4 – поддон для загрузки заготовки в рабочее пространство печи; 5 – роликовый рольганг; 6 – цифровой потенциометр для измерения температуры; 7, 8 и 9 – термопары для измерения температуры футеровки (кладки) рабочей камеры печи, газов и полочки, на которой расположены спирали нагревателей сопротивления, соответственно (приложение А); 10 – магнитный пускатель (контактор); 11 и 12 – соответственно термопары для измерения температуры на поверхности и в середине (центре) стальной заготовки (приложение А)

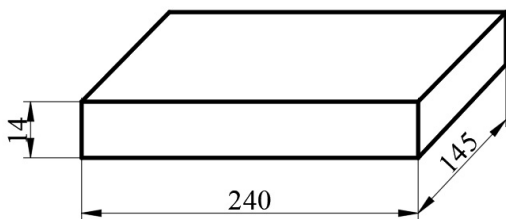


Рис. 2.2. Эскизный чертеж заготовки в виде пластины с размерами: 14 × 145 × 240 мм

Все расчетные методики анализа нестационарной теплопроводности разделяются на 2 группы. К первой группе следует отнести методики, описывающие теплопроводность в термически тонких телах, ко второй – в массивных телах [2, 3].

Граница между тонкими и массивными телами (в термическом понимании) устанавливается критическим значением числа (критерия) $Bi_{кр} = 0,5$. Если $Bi \geq Bi_{кр}$, то тело следует рассматривать как термически массивное, в противном случае оно – термически тонкое.

Для термически массивных тел расчетные методики сложнее нежели для тел тонких.

Существует также разделение методик для тел классической и произвольной формы. Тела классической формы – это классическая пластина, цилиндр и шар, все остальные объекты относятся к телам произвольной формы: произвольные параллелепипед и цилиндр при условии, что $\delta/x_{min} > 0,1$ для параллелепипеда и $d/l > 0,1$ для цилиндра.

Как видно, для рассматриваемых тел (рис. 2.3) при соотношении $\delta/x_{min} \leq 0,1$ и $d/l \leq 0,1$, данные тела рассматриваются как классические. Шар всегда является фигурой классической формы. Для расчета теплопроводности (определение температуры на поверхности и внутри в направлении потока теплоты, а также времени нагревания до заданной температуры) в телах классической формы (пластина, цилиндр и шар) существуют достаточно простые методики.

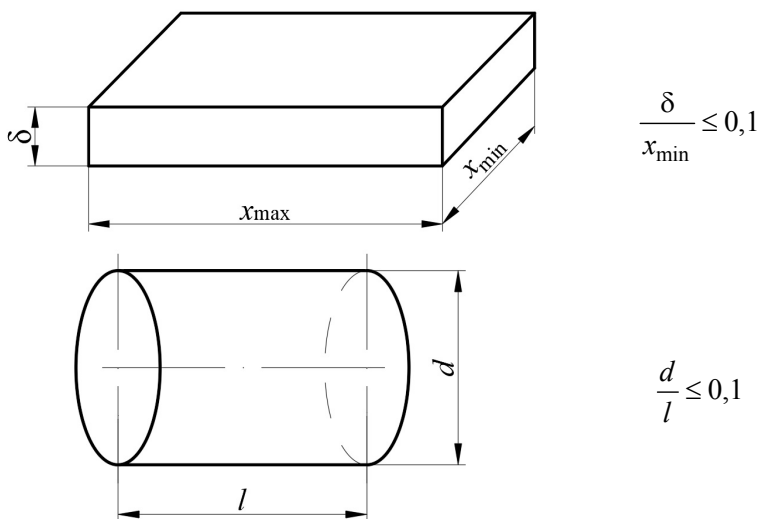


Рис. 2.3. Определение классической пластины и цилиндра

После классификации тела по форме, необходимо классифицировать тело в термическом понимании. Для этого находят численное значение критерия Био

$$Bi = \frac{\alpha_{эфф} \cdot x}{\lambda_m}, \quad (2.1)$$

где $\alpha_{эфф}$ – эффективное (полное) значение коэффициента теплоотдачи (методики определения изложены в лабораторной работе № 1), Вт/(м² · К);

x – характерный размер садки (для пластины при одностороннем нагреве $x = \delta$), м;

λ_m – коэффициент теплопроводности металла при средней температуре металла по поверхности (приложение В), Вт/(м · К).

Полученный результат сравнивают с $Bi_{кр}$.

Далее, в зависимости от заданной температуры, до которой следует нагреть поверхность либо центр заготовки, определяют безразмерную температуру:

$$\left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)^\Pi = \frac{\bar{t}_\Gamma \cdot t_{M\tau_i}^\Pi}{\bar{t}_\Gamma \cdot t_{M0}^\Pi} \quad \text{или} \quad \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)^\Pi = \frac{\bar{t}_\Gamma \cdot t_{M\tau_i}^\Pi}{\bar{t}_\Gamma \cdot t_{M0}^\Pi}. \quad (2.2)$$

Для определения времени нагрева садки до заданной температуры, с учетом того, что число Фурье

$$Fo = f\left(Bi; \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)^{\Pi(u)}\right), \quad (2.3)$$

воспользуемся номограммами для соответствующего тела (приложение Г).

Используя найденное с помощью номограмм число Фурье, можно определить необходимое время нагрева садки в печи:

$$\tau = \frac{Fo \cdot x^2}{a}, \quad (2.4)$$

где a – коэффициент температуропроводности садки (приложение В), м²/мин.

В случае, если садка представляет собой термически тонкое тело ($Bi < Bi_{кр}$), можно воспользоваться методикой расчета времени пребывания тонких заготовок в рабочем пространстве печи [8].

Процесс нагрева тонких тел характерен тем, что неравномерностью нагрева по сечению можно пренебречь. Это, в свою очередь, существенно упрощает задачу: в результате определения времени нагрева на температурном графике строится только температура нагрева поверхности заготовки t_{M}^{Π} , которая будет совпадать с температурой нагрева центра t_{M}^{Π} .

В таком случае время пребывания садки классической формы рассчитывается по формуле (преобладает лучистая составляющая теплообмена)

$$\tau = \frac{x\rho_M \bar{c}_{pM}}{kC_{\Pi}} \left(F_{t_{Mi}^{\Pi}} - F_{t_{M0}^{\Pi(u)}} \right), \quad (2.5)$$

где ρ_M – плотность металла (приложение В), кг/м³;

\bar{c}_{pM} – средняя массовая изобарная теплоемкость металла (приложение В), Дж/(кг · К);

k – коэффициент формы (для классической пластины $k = 1$);

C_{Π} – приведенный коэффициент излучения из формулы (1.4), Вт/(м² · К⁴);

$F_{t_{Mi}^{\Pi}}$ и $F_{t_{M0}^{\Pi(u)}}$ – конечный и начальный температурные факторы при необходимой температуре поверхности садки и при начальной температуре соответственно (приложение Д), К⁻³.

Методика выполнения эксперимента

Электропечь прогревается накануне выполнения работы № 2. Заготовка должна быть вне рабочего пространства печи и иметь температуру окружающей среды, которая измеряется термометром.

В фиксированный момент времени (сразу же по получению задания на выполнение работы) нагреваемая пластина загружается

в камеру печи, имеющую фиксированную температуру. Сразу же после загрузки делается первый отсчет температур (инженер лаборатории указывает на маркировку термопар: ХК (хромель-копель) или ХА (хромель-алюмель)).

Время проведения эксперимента определяется преподавателем. Результаты измерений заносятся в аналогичный лабораторной работе № 1 протокол измерений (табл. 1.2).

Производится обработка экспериментальных данных.

Затем строятся экспериментальный и расчетный температурные графики (рис. 2.4).

Дается анализ результатов эксперимента: требуется сделать выводы о необходимости классификации садки и пригодности предлагаемых расчетных методик определения времени нагрева заготовки в печи; сравнить расчетные кривые с экспериментальными (рис. 2.4), которые принимаются за идеал, т. к. получены опытным путем и их достоверность зависит только от качества (точности) измерительного инструмента (термопар и цифровых вольтметров).

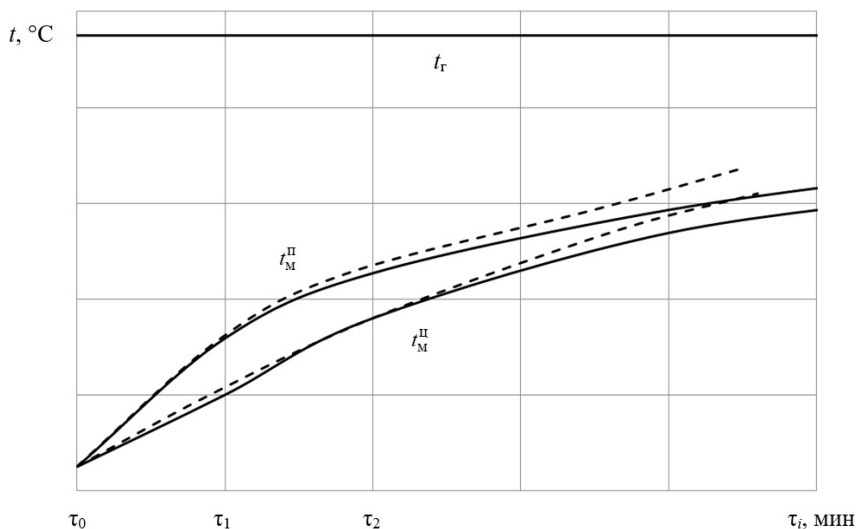


Рис. 2.4. Примерный вид экспериментального (сплошная линия) и расчетного (штриховая линия) температурных графиков

Обработка экспериментальных данных

1. Данные протокола измерений обрабатываются с использованием таблиц ($mv = f(t)$) для термопар ХК и ХА (приложение А). Полученные данные заносятся в протокол измерений (табл. 1.2).

2. Определить площади излучающих поверхностей футеровки печи F_1 (рис. 1.3) и садки (пластины) F_2 (рис. 2.2).

3. Построить экспериментальный температурный график согласно протоколу измерений (табл. 1.2).

4. Выбрать методику из предложенных в лабораторной работе № 1 и рассчитать согласно ей численные значения эффективного коэффициента теплоотдачи к садке (пластине) $\alpha_{\text{эфф}}$ по формуле (1.2).

5. Классифицировать садку по форме (рис. 2.3).

6. Определить термически тонкое либо массивное тело представляет собой садка. Для этого определить число Bi по формуле (2.1) и сравнить его значение с критическим.

7. С помощью преподавателя выбрать несколько характерных точек (температур поверхности садки) и рассчитать для них соответствующие безразмерные температуры по формуле (2.2).

8. При помощи номограмм для поверхности пластины найти соответствующие характерным точкам числа Fo по формуле (2.3).

9. По полученным значениям определить необходимое время нагрева τ по формуле (2.4).

10. Нанести на температурный график (рис. 2.4) расчетную зависимость температуры нагрева поверхности пластины от времени.

11. В случае необходимости повторить все действия для середины (центра) пластины.

12. Нанести на температурный график (рис. 2.4) расчетную зависимость температуры нагрева центра пластины от времени.

13. В случае термически тонкого тела воспользоваться формулой (2.5) для определения времени пребывания пластины в рабочей камере печи.

14. Для удобства, наглядности и в случае расчета лабораторной работы в программе MS Excel либо другой аналогичной программе результаты вычислений можно свести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты обработки экспериментальных данных

$t_M^П$	$\left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)^П$	Fo	τ	$t_M^Ц$	$\left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)^Ц$	Fo	τ

15. Выполнить анализ полученных результатов работы.

Контрольные вопросы

1. Что такое легированная сталь?
2. Что такое цементация?
3. Что такое нитроцементация?
4. Что такое азотирование?
5. Что такое цианирование?
6. Что такое хромирование?
7. Что такое алитирование?
8. Что такое калориметрическая температура?
9. Что такое теоретическая температура?
10. Что такое действительная температура?
11. Что такое камерные печи?
12. Что такое методические печи?
13. Что такое туннельные печи?
14. Использование критерия Vi при определении времени пребывания заготовки в рабочей зоне печи.
15. Использование критерия Fo при определении времени пребывания заготовки в рабочей зоне печи.
16. Использование безразмерных температур при определении времени пребывания заготовки в рабочей зоне печи.
17. Что такое случай серого тела при лучистом теплообмене?
18. Что такое случай прозрачного тела при лучистом теплообмене?
19. Что такое случай факела при лучистом теплообмене?
20. Материальный баланс зоны печи.

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВАНИЯ САДКИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ В КАМЕРНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Цель работы: изучить методики определения времени нагрева садки произвольной формы в виде цилиндра. Определить время пребывания заготовки в рабочем пространстве печи и сопоставить его с экспериментальным значением.

Теоретическая часть

В нашем эксперименте нагреву подвергается заготовка (цилиндр), используемая для изучения теплообмена в рабочей камере печи в лабораторной работе № 1. Металлическая садка изготовлена из ст40 (рис. 1.3, б) размерами $d = 160$ и $l = 190$ мм. Теплофизические характеристики различных марок сталей приведены в приложении В.

Нагрев поверхности цилиндра осуществляется теплоотдачей от греющей печной среды, излучающей кладки печи и ее электрических нагревателей, характеризуется коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{эфф}$, методики определения которого были представлены в лабораторной работе № 1. Далее от поверхности к середине цилиндра теплота поступает теплопроводностью.

Для определения того, как долго должна находиться садка в рабочей камере печи, чтобы нагреться до необходимой температуры, следует воспользоваться подходящей методикой расчета. Выбор методики зависит от классификации садки. Для начала следует определить, является ли садка телом классической формы или произвольной. Подробнее об этом говорилось в лабораторной работе № 2 (рис. 2.3). Согласно указанной классификации исследуемая стальная заготовка (рис. 1.3, б) должна быть отнесена к телам произвольной формы.

Самым простым способом решения поставленной задачи является приведение нагреваемой заготовки к шару (тело классической формы) по эквивалентному радиусу $r_{эkv}$, для которого имеется математически точное решение. Принятое допущение вносит опреде-

ленную погрешность при расчете времени нагревания до заданной температуры поверхности или середины. Решение имеет вид:

$$Fo = f_1 \left(Bi; \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0} \right)^n \right); \quad Fo = f_2 \left(Bi; \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0} \right)^n \right), \quad (3.1)$$

а число (критерий) Фурье Fo можно также рассчитать из соотношения

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{x^2}, \quad (3.2)$$

где все компоненты подробно рассматривались в лабораторной работе № 2. Характерный размер x в данном случае будет равен $r_{\text{экв}}$. Он также будет использоваться при расчете числа (критерия) Bi по формуле (2.1).

И с учетом того, что

$$\left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0} \right)^{n(n)} = f(Bi; Fo), \quad (3.3)$$

воспользовавшись соответствующими номограммами для шара (приложение Г), можно определить значения времени нагрева до заданных температур поверхности (центра) садки:

$$\tau_i = \frac{Fo_i \cdot x^2}{a}. \quad (3.4)$$

Полученные расчетным путем данные переносят на график (рис. 2.4), и сравнивают кривые, построенные в натурном эксперименте и те, что получены расчетным путем. Определяют погрешность, возникающую при использовании описанной выше методики.

Теперь рассмотрим еще одну методику, согласно которой реальную стальную заготовку ($d = 160$ и $l = 190$ мм) – тело произвольной формы, можно представить заготовкой, полученной при пересечении классического цилиндра и классической пластины [8].

В основу методики положен метод сечений – приближенные расчетные формулы для составного тела. В нашем случае рассматриваем реальную нагреваемую стальную садку (цилиндр произвольной формы) как тело, образованное пересечением бесконечного цилиндра (с диаметром равным диаметру исходного тела d) и бесконечной пластины толщиной, равной длине исходного цилиндра $\delta = l$ (рис. 2.3):

– классический цилиндр с характерным размером $X_1 = d/2$ (симметричный нагрев);

– классическая пластина с характерным размером $X_2 = l/2$ (симметричный нагрев).

Тела будем нумеровать (1) – цилиндр и (2) – пластина.

Для каждого классического тела рассчитываем значения числа (критерия) Bi :

$$Bi^{(1)} = \frac{\alpha_{эфф} \cdot X_1}{\lambda_m}; \quad Bi^{(2)} = \frac{\alpha_{эфф} \cdot X_2}{\lambda_m}, \quad (3.5)$$

где $\alpha_{эфф}$ – эффективное (полное) значение коэффициента теплоотдачи (методики определения изложены в лабораторной работе № 1), $Вт/(м^2 \cdot К)$;

λ_m – коэффициент теплопроводности ст40 (приложение В), $Вт/(м \cdot К)$.

В результате расчетов, путем сравнения полученных значений, определяем максимальное число Био Bi_{max} .

Далее в зависимости от заданной температуры, до которой следует нагреть поверхность (центр) заготовки, определяем максимальную безразмерную температуру:

$$\left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0} \right)_{max}^{\Pi} = \frac{\bar{t}_\tau - t_{M\tau}^{\Pi}}{\bar{t}_\tau - t_{M0}^{\Pi(u)}} \quad \text{или} \quad \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0} \right)_{max}^{\Pi} = \frac{\bar{t}_\tau - t_{M\tau}^{\Pi}}{\bar{t}_\tau - t_{M0}^{\Pi(u)}}. \quad (3.6)$$

Для определения максимального времени нагрева заготовки до заданной температуры, с учетом того, что максимальное число Фурье

$$Fo_{\max} = f \left(Bi_{\max}; \left(\frac{\theta_{\tau}}{\theta_0} \right)_{\max}^{n(u)} \right), \quad (3.7)$$

воспользуемся номограммами для соответствующего тела (приложение Г).

Используя найденное с помощью номограмм максимальное число Фурье, можно определить максимальное время:

$$\tau_{\max} = \frac{Fo_{\max} X^2}{a}, \quad (3.8)$$

где a – коэффициент температуропроводности ст40 (приложение В), $\text{м}^2/\text{ч}$.

Полученное максимальное время делят на 6 равных интервалов: $\tau_1 = 0, \tau_2, \dots, \tau_6 = \tau_{\max}$.

Далее расчет ведется для каждого тела классической формы, из которых состоит заготовка, и для каждого временного интервала в отдельности.

Для поверхности (центра) классического цилиндра:

$$Fo_1^{(1)} = 0; Fo_2^{(1)} = \frac{a\tau_2}{X_1^2}; Fo_3^{(1)} = \frac{a\tau_3}{X_1^2}; \dots \quad (3.9)$$

Безразмерные температуры для цилиндра определяются по соответствующим номограммам (приложение Г):

$$\begin{aligned} \left(\frac{\theta_{\tau}}{\theta_0} \right)_1^{n(1)} = 0; \left(\frac{\theta_{\tau}}{\theta_0} \right)_2^{n(1)} = f \left(Bi^{(1)}; Fo_2^{(1)} \right); \dots \\ \text{или} \left(\frac{\theta_{\tau}}{\theta_0} \right)_1^{ц(1)} = 0; \left(\frac{\theta_{\tau}}{\theta_0} \right)_2^{ц(1)} = f \left(Bi^{(1)}; Fo_2^{(1)} \right); \dots \end{aligned} \quad (3.10)$$

Для поверхности (центра) классической пластины:

$$Fo_1^{(2)} = 0; Fo_2^{(2)} = \frac{a\tau_2}{X_2^2}; Fo_3^{(2)} = \frac{a\tau_3}{X_2^2}; \dots \quad (3.11)$$

Безразмерные температуры для пластины определяются по соответствующим номограммам (приложение Г):

$$\begin{aligned} \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_1^{п(2)} = 0; \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_2^{п(2)} = f\left(\text{Bi}^{(2)}; Fo_2^{(2)}\right); \dots \\ \text{или} \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_1^{ц(2)} = 0; \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_2^{ц(2)} = f\left(\text{Bi}^{(2)}; Fo_2^{(2)}\right); \dots \end{aligned} \quad (3.12)$$

Для поверхности первоначального цилиндра произвольной формы безразмерная температура находится как произведение соответствующих безразмерных температур найденных ранее составляющих ее тел классической формы:

$$\begin{aligned} \prod \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_1^п = 0; \prod \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_2^п = \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_2^{п(1)} \cdot \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_2^{п(2)}; \\ \prod \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_3^п = \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_3^{п(1)} \cdot \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_3^{п(2)}; \dots \\ \prod \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_1^ц = 0; \prod \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_2^ц = \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_2^{ц(1)} \cdot \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_2^{ц(2)}; \\ \prod \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_3^ц = \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_3^{ц(1)} \cdot \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0}\right)_3^{ц(2)}; \dots, \end{aligned} \quad (3.13)$$

где Π – знак произведения (как знак Σ – сумма в математике).

Затем, согласно методу сечений, определяют действительные температуры для каждого временного интервала, пока не получат температуру равную либо больше заданной температуры:

$$\begin{aligned}
 t_{M1}^{\Pi} &= t_{M0}^{\Pi(u)}; \quad t_{M2}^{\Pi} = \bar{t}_T - \Pi \left(\frac{\theta_{\tau}}{\theta_0} \right)_2 \left(\bar{t}_T - t_{M0}^{\Pi(u)} \right); \\
 t_{M3}^{\Pi} &= \bar{t}_T - \Pi \left(\frac{\theta_{\tau}}{\theta_0} \right)_3 \left(\bar{t}_T - t_{M0}^{\Pi(u)} \right); \dots \\
 t_{M1}^{\Pi} &= t_{M0}^{\Pi(u)}; \quad t_{M2}^{\Pi} = \bar{t}_T - \Pi \left(\frac{\theta_{\tau}}{\theta_0} \right)_2 \left(\bar{t}_T - t_{M0}^{\Pi(u)} \right); \\
 t_{M3}^{\Pi} &= \bar{t}_T - \Pi \left(\frac{\theta_{\tau}}{\theta_0} \right)_3 \left(\bar{t}_T - t_{M0}^{\Pi(u)} \right); \dots
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

Далее наносят полученные температуры на температурный график (рис. 3.1). Зная заданную температуру поверхности (центра) заготовки, графически определяют время нагрева заготовки.

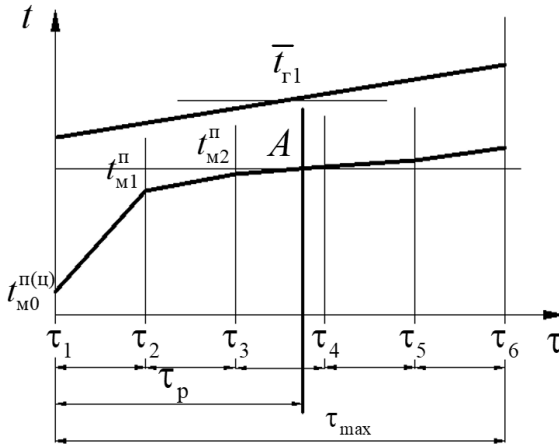


Рис. 3.1. Графическое определение времени нагрева заготовки до заданной температуры

Полученное значение τ_p должно удовлетворять условию:

$$\tau_i < \tau_p < \tau_{\max}, \tag{3.15}$$

где τ_i — экспериментальное время, за которое поверхность (центр) заготовки нагрелись до заданной температуры.

Методика выполнения эксперимента

Электродпечь прогревается накануне выполнения лабораторной работы № 3. Заготовка должна быть вне рабочего пространства печи и иметь температуру окружающей среды, которая измеряется термометром. Затем заготовка 3 (рис. 1.1) загружается в рабочее пространство печи. Сразу же после загрузки с помощью цифрового вольтметра (потенциометра) делается первый отсчет данных (инженер лаборатории указывает на маркировку термопар: ХК (хромель-копель) или ХА (хромель-алюмель)).

Время проведения эксперимента определяется преподавателем. Результаты измерений заносятся в протокол измерений (табл. 1.2).

Затем строится температурный график (рис. 1.4).

Производится обработка экспериментальных данных по первой методике с добавлением построений на температурный график (рис. 2.4).

Далее экспериментальные данные обрабатываются согласно второй методике. Время нагрева садки до заданной температуры определяется графически (рис. 3.1).

Дается анализ результатов эксперимента: необходимо сделать выводы о пригодности предлагаемых расчетных методик, сравнить расчетные кривые с экспериментальными на обоих полученных температурных графиках, которые принимаются за идеал, т. к. получены опытным путем и их достоверность зависит только от качества (точности) измерительного инструмента (термопар и цифровых вольтметров, а также регулятора температуры в печи).

Обработка экспериментальных данных

1. Данные протокола измерений обрабатываются с использованием таблиц ($mv = f(t)$) для термопар ХК и ХА (приложение А). Полученные данные заносятся в протокол измерений (табл. 1.2).

2. Строим экспериментальный температурный график (табл. 1.2).

3. Выбираем методику из предложенных в лабораторной работе № 1 и рассчитываем согласно ей численные значения эффективного коэффициента теплоотдачи к садке (цилиндр) $\alpha_{эфф}$ по формуле (1.2).

4. Классифицируем садку размерами $d = 160$ и $l = 190$ мм. Определяем: перед нами тело классической или произвольной формы (рис. 2.3).

5. Приводим садку к шару, определяем $r_{\text{экв}}$ полученного тела.

6. Находим значения критериев Bi по формуле (2.1) и безразмерные температуры по формуле (2.2).

7. Используем необходимые номограммы (приложение Г) для определения критерия Fo по формуле (3.1) и расчета времени нагрева по формуле (3.4).

8. Наносим полученные расчетные данные на температурный график (рис. 2.4), а результаты вычислений для удобства, наглядности и в случае расчета лабораторной работы в MS Excel либо другой аналогичной программе можно свести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты обработки экспериментальных данных
согласно методу шара

$t_{\text{мт}i}^{\text{п}}$	$\left(\frac{\theta_{\tau}}{\theta_0}\right)^{\text{п}}$	Fo	τ	$t_{\text{мт}i}^{\text{п}}$	$\left(\frac{\theta_{\tau}}{\theta_0}\right)^{\text{п}}$	Fo	τ

9. Согласно второй рассмотренной выше методике определения времени нагрева садки в случае тела произвольной формы разделяем его на тела классической формы и определяем характерные размеры X каждого из них, с учетом особенностей нагрева заготовки (симметричный или односторонний нагрев).

10. Для каждого классического тела рассчитываем значения числа Bi по формуле (3.5) и находим максимальное из них Bi_{max} .

11. Задаемся значением температуры, до которой следует нагреть поверхность (центр) заготовки (при помощи преподавателя).

12. Определяем максимальную безразмерную температуру по формуле (3.6).

13. Находим максимальное значение числа Фурье Fo_{max} по формуле (3.7) с помощью номограмм, представленных в приложении Г.

14. Определяем максимальное время нагрева заготовки по формуле (3.8).

15. Полученное максимальное время делим на 6 равных интервалов: $\tau_1 = 0, \tau_2, \dots, \tau_6 = \tau_{\max}$.

16. Производим необходимые расчеты чисел Фурье по формулам (3.9), (3.11) и безразмерных температур по формулам (3.10), (3.12) для каждого тела классической формы, из которых состоит заготовка, и для каждого временного интервала в отдельности.

17. Находим безразмерную температуру первоначального цилиндра произвольной формы по формуле (3.13).

18. Согласно методу сечений определяем действительные температуры для каждого временного интервала, пока не получим температуру равную либо больше заданной температуры по формуле (3.14).

19. Наносим полученные температуры на экспериментальный температурный график (рис. 3.1). Зная заданную температуру поверхности (центра) заготовки, графически определяем время нагрева заготовки τ_p .

20. Проверяем полученное значение по формуле (3.15).

21. Для удобства, наглядности и в случае расчета лабораторной работы в MS Excel либо другой аналогичной программе результаты вычислений можно свести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты обработки экспериментальных данных
по методу сечений

Время τ	Цилиндр $X_1 =$ $Bi^{(1)} =$		Пластина $X_2 =$ $Bi^{(2)} =$		$\prod \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0} \right)_i^{n(i)}$	$t_{Mi}^{n(i)}$
	$Fo_i^{(1)}$	$\left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0} \right)_i^{n(i)(1)}$	$Fo_i^{(2)}$	$\left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0} \right)_i^{n(i)(2)}$		
τ_1						
τ_2						
...						
τ_6						

22. Выполняем анализ полученных результатов работы.

Контрольные вопросы

1. Тепловой баланс зоны печи.
2. Что такое температурные графики и какие они бывают?
3. Что такое «зона основного щадящего нагрева»?
4. Что такое «зона основного форсированного нагрева»?
5. Что такое «зона выдержки»?
6. Как определить классической или произвольной формы нагреваемое тело?
7. Что такое естественная атмосфера печной среды?
8. Что такое окислительная атмосфера печной среды?
9. Что такое нейтральная атмосфера печной среды?
10. Что такое восстановительная атмосфера печной среды?
11. Что относится к профилированию рабочего пространства печи?
12. Как определить ширину печи?
13. Как определить длину печи при плотном посаде заготовок прямоугольного сечения?
14. Как определить длину печи при плотном посаде заготовок круглого сечения?
15. Как определить длину печи при укладке заготовок прямоугольного сечения с зазором?
16. Как определить длину печи при укладке заготовок круглого сечения с зазором?
17. Как определить высоту рабочего пространства печи?
18. Что такое площадь активного пода?
19. Что такое напряженность активного пода?
20. Горелки для сжигания газообразного топлива.

Лабораторная работа № 4

ПОСТРОЕНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПЕЧИ, РАБОТАЮЩЕЙ ПО ДВУХЗОННОМУ ТЕМПЕРАТУРНОМУ ГРАФИКУ

Цель работы: изучить методику построения графических зависимостей, характеризующих тепловой режим работы высокотемпературной теплотехнологической установки.

Теоретическая часть

Изучению тепловых режимов, как правило, предшествует составление теплового баланса печи и разработка норм расхода топлива на единицу продукции. Оптимальный вариант теплового режима выбирается в результате сопоставления между собой наиболее экономичных и технологически оправданных вариантов [11].

Садка представлена цилиндром (рис. 1.3, б) или пластиной (рис. 2.2). Эксперимент будет проводиться в камерной электропечи сопротивления (рис. 1.1 и 2.1). Для начала следует построить температурный график, определив зависимости температур газов, поверхности и центра садки от времени, а также рассчитать коэффициент теплоотдачи $\alpha_{эфф}$ к поверхности садки. Для этого необходимо выбрать методику расчета $\alpha_{эфф}$, из представленных в лабораторной работе № 1. Выбор осуществляется при помощи преподавателя.

Далее можно установить зависимости

$$\Delta t = f(\tau_i) \text{ и } q = f(\tau_i), \quad (4.1)$$

где Δt – температурный перепад между греющими газами и поверхностью садки в моменты времени τ_i , °C:

$$\Delta t = t_r - t_m^п; \quad (4.2)$$

q – плотность теплового потока к поверхности садки в моменты времени τ_i , Вт/м²:

$$q = \alpha_{эфф} \cdot \Delta t, \quad (4.3)$$

где $\alpha_{\text{эфф}}$ – эффективное значение коэффициента теплоотдачи в моменты времени τ_i , Вт/(м² · К).

Методика выполнения эксперимента

Эксперимент выполняется в лабораторной камерной печи, работающей по двухзонному температурному графику. Электродпечь прогревается накануне выполнения работы № 4. Режим работы печи устанавливается в соответствии с заранее принятым температурным графиком (рис. 4.1).

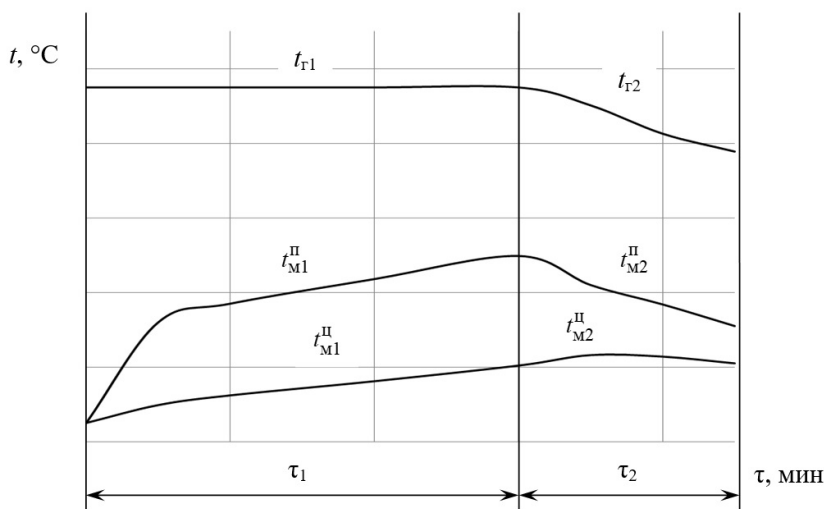


Рис. 4.1. Примерный вид температурного графика печи

Садка должна быть вне рабочего пространства печи и иметь температуру окружающей среды, которая измеряется термометром. В фиксированный момент времени (сразу же по получению задания на выполнение работы) нагреваемая садка загружается вместе с поддоном в печь, имеющую фиксированную температуру. Сразу же после загрузки делается первый отсчет температур (инженер лаборатории указывает на маркировку термопар: ХК (хромель-копель) или ХА (хромель-алюмель)). По истечении времени τ_1 печь выключается, и температура газов изменяется, как показано на рис. 4.1

(участок кривой, соответствующей времени τ_2). По истечении времени $\tau_1 + \tau_2$ опыт прекращается. Время τ_1 и τ_2 определяется преподавателем. Результаты измерений заносятся в протокол измерений (табл. 1.2).

Производится обработка экспериментальных данных.

Затем строится температурный график и график зависимости $q = f(\tau_i)$ (рис. 4.2).

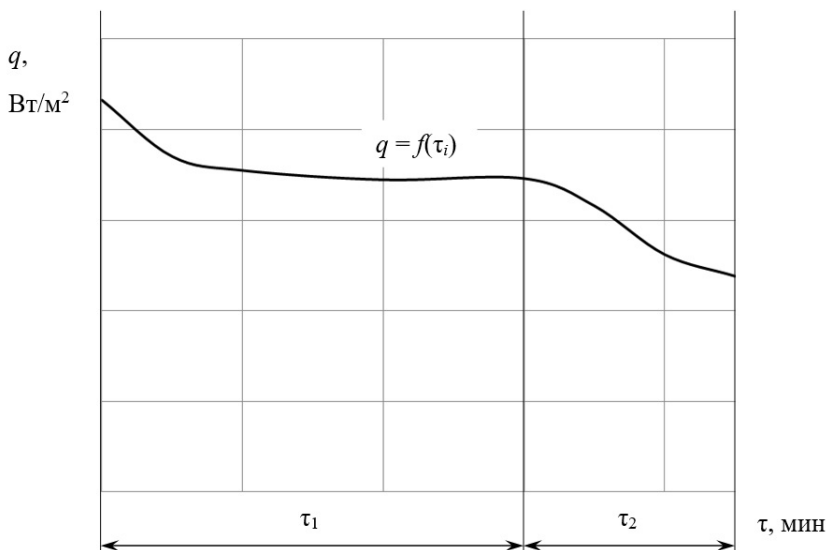


Рис. 4.2. Примерный вид теплового графика

Дается анализ результатов эксперимента: необходимо проанализировать полученный тепловой график (рис. 4.2); при анализе объяснить поведение теплового потока во времени.

Обработка экспериментальных данных

1. Данные протокола измерений обрабатываются с использованием таблиц ($mv = f(t)$) для термопар ХК и ХА (приложение А). Полученные данные заносятся в протокол измерений (табл. 1.2).

2. Определить площади излучающих поверхностей футеровки печи F_1 (рис. 1.3) и садки (пластины или цилиндра) F_2 (рис. 2.2).

3. Построить экспериментальный температурный график согласно протоколу измерений (табл. 1.2).

4. Выбрать методику из предложенных в лабораторной работе № 1 и рассчитать согласно ей численные значения эффективного коэффициента теплоотдачи к садке (пластине или цилиндру) $\alpha_{\text{эфф}}$ (1.2).

5. Рассчитать температурный перепад между греющими газами и поверхностью садки по формуле (4.2).

6. Определить плотность теплового потока к поверхности садки по формуле (4.3).

7. Построить график зависимости $q = f(\tau_i)$ (рис. 4.2).

8. Для удобства, наглядности и в случае расчета лабораторной работы в программе MS Excel либо другой аналогичной программе результаты вычислений можно свести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты обработки экспериментальных данных

$t_r, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_m^p, \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\alpha_{л},$ Вт/(м ² · К)	$\alpha_{к},$ Вт/(м ² · К)	$\alpha_{\text{эфф}},$ Вт/(м ² · К)	$q,$ Вт/м ²

9. Выполнить анализ полученных результатов работы.

Контрольные вопросы

1. Горелки для сжигания жидкого топлива.
2. Основные правила выбора горелочных устройств.
3. Что такое нагреватели и какие они бывают?
4. Игольчатые рекуператоры.
5. Пластинчатые рекуператоры.
6. Трубчатые (петлевые) рекуператоры.
7. Радиационные обечаечные (щелевые) рекуператоры.
8. Блочный керамический рекуператор.

9. Трубчатый керамический рекуператор.
10. Какие бывают расчеты рекуператоров?
11. Для чего используются и какие бывают конструкционные материалы в высокотемпературной теплотехнологической установке?
12. Для чего используются и какие бывают огнеупорные материалы в высокотемпературной теплотехнологической установке?
13. Для чего используются и какие бывают строительные материалы в высокотемпературной теплотехнологической установке?
14. Фундаменты, основания и каркасы высокотемпературной теплотехнологической установки.
15. Как выполняется аэродинамический расчет воздушного тракта печи?
16. Для чего применяют защитные и контролируемые атмосферы?
17. Какие бывают и как обозначаются защитные и контролируемые атмосферы?
18. Как можно получить контролируемую атмосферу?
19. Какие основные и дополнительные блоки имеет схема контрольно-измерительных приборов и автоматики высокотемпературной теплотехнологической установки?
20. Основные методы защиты окружающей среды при работе высокотемпературной теплотехнологической установки.

Литература

1. Несенчук, А. П. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки : в 2 ч. / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск : БНТУ, 2008. – Ч. 1. – 525 с.
2. Несенчук, А. П. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки : в 2 ч. / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск : БНТУ, 2008. – Ч. 2. – 531 с.
3. Несенчук, А. П. Промышленные теплотехнологии: машиностроительное и металлургическое производство : учебник : в 2 ч. / А. П. Несенчук [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука, В. И. Тимошпольского. – Минск : Вышэйшая школа, 1995. – Ч. 1. – 412 с.
4. Несенчук, А. П. Промышленные теплотехнологии: машиностроительное и металлургическое производство : учебник : в 2 ч. / А. П. Несенчук [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука, В. И. Тимошпольского. – Минск: Вышэйшая школа, 1997. – Ч. 2 421 с.
5. Тимошпольский, В. И. Промышленные теплотехнологии: Методики и инженерные расчеты оборудования высокотемпературных теплотехнологий машиностроительного и металлургического производства: учебник / В. И. Тимошпольский, А. П. Несенчук, И. А. Трусова; под общ. ред. А. П. Несенчука, В. И. Тимошпольского. – Минск : Вышэйшая школа, 1998. – 422 с.
6. Несенчук, А. П. Промышленные теплотехнологии: Печи и сушила машиностроительного и металлургического производства : учебник / А. П. Несенчук [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука, В. И. Тимошпольского. – Минск : Вышэйшая школа, 1999. – 238 с.
7. Брюханов, О. Н. Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики : учебник / О. Н. Брюханов, В. И. Коробко, А. Т. Мелик-Аракелян. – Москва : ИНФРА-М, 2014. – 254 с.
8. Несенчук, А. П. Тепловые расчеты пламенных печей для нагрева и термообработки металла : учебное пособие для политехнических и машиностроительных вузов по машиностроительным и энергетическим специальностям / А. П. Несенчук, Н. П. Жмакин. – Минск : Вышэйшая школа, 1974. – 288 с.

9. Расчет нагревательных и термических печей : справочник / С. Б. Василькова [и др.]; под ред. В. М. Тымчака, В. Л. Гусовского. – Москва : Metallургия, 1983. – 481 с.

10. Гусовский, В. Л. Методики расчета нагревательных и термических печей : учебно-справочное издание / В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц. – Москва : Теплотехник, 2004. – 400 с.

11. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах : учебное пособие для вузов специальности «Промышленная теплоэнергетика» / В. И. Тимошпольский [и др.]; под общ. ред. В. И. Тимошпольского. – Минск : Высшэйшая школа, 1992. – 217 с.

Преобразование показаний термопар

Таблица А.1

Для термопар типа ХА (хромель-алюмель)

°С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357	0,397
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758	0,798
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,163	1,203
30	1,203	1,244	1,285	1,326	1,366	1,407	1,448	1,489	1,530	1,571	1,612
40	1,612	1,653	1,694	1,735	1,776	1,817	1,858	1,899	1,941	1,982	2,023
50	2,023	2,064	2,106	2,147	2,188	2,230	2,271	2,312	2,354	2,395	2,436
60	2,436	2,478	2,519	2,561	2,602	2,644	2,685	2,727	2,768	2,810	2,851
70	2,851	2,893	2,934	2,976	3,017	3,059	3,100	3,142	3,184	3,225	3,267
80	3,267	3,308	3,350	3,391	3,433	3,474	3,516	3,557	3,599	3,640	3,682
90	3,682	3,723	3,765	3,806	3,848	3,889	3,931	3,972	4,013	4,055	4,096
100	4,096	4,138	4,179	4,220	4,262	4,303	4,344	4,385	4,427	4,468	4,509
110	4,509	4,550	4,591	4,633	4,674	4,715	4,756	4,797	4,838	4,879	4,920
120	4,920	4,961	5,002	5,043	5,084	5,124	5,165	5,206	5,247	5,288	5,328
130	5,328	5,369	5,410	5,450	5,491	5,532	5,572	5,613	5,653	5,694	5,735
140	5,735	5,775	5,815	5,856	5,896	5,937	5,977	6,017	6,058	6,098	6,138
150	6,138	6,179	6,219	6,259	6,299	6,339	6,380	6,420	6,460	6,500	6,540
160	6,540	6,580	6,620	6,660	6,701	6,741	6,781	6,821	6,861	6,901	6,941
170	6,941	6,981	7,021	7,060	7,100	7,140	7,180	7,220	7,260	7,300	7,340
180	7,340	7,380	7,420	7,460	7,500	7,540	7,579	7,619	7,659	7,699	7,739
190	7,739	7,779	7,819	7,859	7,899	7,939	7,979	8,019	8,059	8,099	8,138
200	8,138	8,178	8,218	8,258	8,298	8,338	8,378	8,418	8,458	8,499	8,539
210	8,539	8,579	8,619	8,659	8,699	8,739	8,779	8,819	8,860	8,900	8,940
220	8,940	8,980	9,020	9,061	9,101	9,141	9,181	9,222	9,262	9,302	9,343
230	9,343	9,383	9,423	9,464	9,504	9,545	9,585	9,626	9,666	9,707	9,747
240	9,747	9,788	9,828	9,869	9,909	9,950	9,991	10,031	10,072	10,113	10,153
250	10,153	10,194	10,235	10,276	10,316	10,357	10,398	10,439	10,480	10,520	10,561
260	10,561	10,602	10,643	10,684	10,725	10,766	10,807	10,848	10,889	10,930	10,971
270	10,971	11,012	11,053	11,094	11,135	11,176	11,217	11,259	11,300	11,341	11,382
280	11,382	11,423	11,465	11,506	11,547	11,588	11,630	11,671	11,712	11,753	11,795
290	11,795	11,836	11,877	11,919	11,960	12,001	12,043	12,084	12,126	12,167	12,209
300	12,209	12,250	12,291	12,333	12,374	12,416	12,457	12,499	12,540	12,582	12,624
310	12,624	12,665	12,707	12,748	12,790	12,831	12,873	12,915	12,956	12,998	13,040
320	13,040	13,081	13,123	13,165	13,206	13,248	13,290	13,331	13,373	13,415	13,457
330	13,457	13,498	13,540	13,582	13,624	13,665	13,707	13,749	13,791	13,833	13,874
340	13,874	13,916	13,958	14,000	14,042	14,084	14,126	14,167	14,209	14,251	14,293

Продолжение табл. А.1

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
350	14,293	14,335	14,377	14,419	14,461	14,503	14,545	14,587	14,629	14,671	14,713
360	14,713	14,755	14,797	14,839	14,881	14,923	14,965	15,007	15,049	15,091	15,133
370	15,133	15,175	15,217	15,259	15,301	15,343	15,385	15,427	15,469	15,511	15,554
380	15,554	15,596	15,638	15,680	15,722	15,764	15,806	15,849	15,891	15,933	15,975
390	15,975	16,017	16,059	16,102	16,144	16,186	16,228	16,270	16,313	16,355	16,397
400	16,397	16,439	16,482	16,524	16,566	16,608	16,651	16,693	16,735	16,778	16,820
410	16,820	16,862	16,904	16,947	16,989	17,031	17,074	17,116	17,158	17,201	17,243
420	17,243	17,285	17,328	17,370	17,413	17,455	17,497	17,540	17,582	17,624	17,667
430	17,667	17,709	17,752	17,794	17,837	17,879	17,921	17,964	18,006	18,049	18,091
440	18,091	18,134	18,176	18,218	18,261	18,303	18,346	18,388	18,431	18,473	18,516
450	18,516	18,558	18,601	18,643	18,686	18,728	18,771	18,813	18,856	18,898	18,941
460	18,941	18,983	19,026	19,068	19,111	19,154	19,196	19,239	19,281	19,324	19,366
470	19,366	19,409	19,451	19,494	19,537	19,579	19,622	19,664	19,707	19,750	19,792
480	19,792	19,835	19,877	19,920	19,962	20,005	20,048	20,090	20,133	20,175	20,218
490	20,218	20,261	20,303	20,346	20,389	20,431	20,474	20,516	20,559	20,602	20,644
500	20,644	20,687	20,730	20,772	20,815	20,857	20,900	20,943	20,985	21,028	21,071
510	21,071	21,113	21,156	21,199	21,241	21,284	21,326	21,369	21,412	21,454	21,497
520	21,497	21,540	21,582	21,625	21,668	21,710	21,753	21,796	21,838	21,881	21,924
530	21,924	21,966	22,009	22,052	22,094	22,137	22,179	22,222	22,265	22,307	22,350
540	22,350	22,393	22,435	22,478	22,521	22,563	22,606	22,649	22,691	22,734	22,776
550	22,776	22,819	22,862	22,904	22,947	22,990	23,032	23,075	23,117	23,160	23,203
560	23,203	23,245	23,288	23,331	23,373	23,416	23,458	23,501	23,544	23,586	23,629
570	23,629	23,671	23,714	23,757	23,799	23,842	23,884	23,927	23,970	24,012	24,055
580	24,055	24,097	24,140	24,182	24,225	24,267	24,310	24,353	24,395	24,438	24,480
590	24,480	24,523	24,565	24,608	24,650	24,693	24,735	24,778	24,820	24,863	24,905
600	24,905	24,948	24,990	25,033	25,075	25,118	25,160	25,203	25,245	25,288	25,330
610	25,330	25,373	25,415	25,458	25,500	25,543	25,585	25,627	25,670	25,712	25,755
620	25,755	25,797	25,840	25,882	25,924	25,967	26,009	26,052	26,094	26,136	26,179
630	26,179	26,221	26,263	26,306	26,348	26,390	26,433	26,475	26,517	26,560	26,602
640	26,602	26,644	26,687	26,729	26,771	26,814	26,856	26,898	26,940	26,983	27,025
650	27,025	27,067	27,109	27,152	27,194	27,236	27,278	27,320	27,363	27,405	27,447
660	27,447	27,489	27,531	27,574	27,616	27,658	27,700	27,742	27,784	27,826	27,869
670	27,869	27,911	27,953	27,995	28,037	28,079	28,121	28,163	28,205	28,247	28,289
680	28,289	28,332	28,374	28,416	28,458	28,500	28,542	28,584	28,626	28,668	28,710
690	28,710	28,752	28,794	28,835	28,877	28,919	28,961	29,003	29,045	29,087	29,129
700	29,129	29,171	29,213	29,255	29,297	29,338	29,380	29,422	29,464	29,506	29,548
710	29,548	29,589	29,631	29,673	29,715	29,757	29,798	29,840	29,882	29,924	29,965
720	29,965	30,007	30,049	30,090	30,132	30,174	30,216	30,257	30,299	30,341	30,382
730	30,382	30,424	30,466	30,507	30,549	30,590	30,632	30,674	30,715	30,757	30,798
740	30,798	30,840	30,881	30,923	30,964	31,006	31,047	31,089	31,130	31,172	31,213

Окончание табл. А.1

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
750	31,213	31,255	31,296	31,338	31,379	31,421	31,462	31,504	31,545	31,586	31,628
760	31,628	31,669	31,710	31,752	31,793	31,834	31,876	31,917	31,958	32,000	32,041
770	32,041	32,082	32,124	32,165	32,206	32,247	32,289	32,330	32,371	32,412	32,453
780	32,453	32,495	32,536	32,577	32,618	32,659	32,700	32,742	32,783	32,824	32,865
790	32,865	32,906	32,947	32,988	33,029	33,070	33,111	33,152	33,193	33,234	33,275
800	33,275	33,316	33,357	33,398	33,439	33,480	33,521	33,562	33,603	33,644	33,685
810	33,685	33,726	33,767	33,808	33,848	33,889	33,930	33,971	34,012	34,053	34,093
820	34,093	34,134	34,175	34,216	34,257	34,297	34,338	34,379	34,420	34,460	34,501
830	34,501	34,542	34,582	34,623	34,664	34,704	34,745	34,786	34,826	34,867	34,908
840	34,908	34,948	34,989	35,029	35,070	35,110	35,151	35,192	35,232	35,273	35,313
850	35,313	35,354	35,394	35,435	35,475	35,516	35,556	35,596	35,637	35,677	35,718
860	35,718	35,758	35,798	35,839	35,879	35,920	35,960	36,000	36,041	36,081	36,121
870	36,121	36,162	36,202	36,242	36,282	36,323	36,363	36,403	36,443	36,484	36,524
880	36,524	36,564	36,604	36,644	36,685	36,725	36,765	36,805	36,845	36,885	36,925
890	36,925	36,965	37,006	37,046	37,086	37,126	37,166	37,206	37,246	37,286	37,326
940	38,918	38,958	38,997	39,037	39,076	39,116	39,155	39,195	39,235	39,274	39,314
950	39,314	39,353	39,393	39,432	39,471	39,511	39,550	39,590	39,629	39,669	39,708
960	39,708	39,747	39,787	39,826	39,866	39,905	39,944	39,984	40,023	40,062	40,101
970	40,101	40,141	40,180	40,219	40,259	40,298	40,337	40,376	40,415	40,455	40,494
980	40,494	40,533	40,572	40,611	40,651	40,690	40,729	40,768	40,807	40,846	40,885
990	40,885	40,924	40,963	41,002	41,042	41,081	41,120	41,159	41,198	41,237	41,276
1000	41,276	41,315	41,354	41,393	41,431	41,470	41,509	41,548	41,587	41,626	41,665
1010	41,665	41,704	41,743	41,781	41,820	41,859	41,898	41,937	41,976	42,014	42,053
1020	42,053	42,092	42,131	42,169	42,208	42,247	42,286	42,324	42,363	42,402	42,440
1030	42,440	42,479	42,518	42,556	42,595	42,633	42,672	42,711	42,749	42,788	42,826
1040	42,826	42,865	42,903	42,942	42,980	43,019	43,057	43,096	43,134	43,173	43,211

Таблица А.2

Для терморпар типа ХК (хромель-копель)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,000	0,063	0,127	0,190	0,254	0,318	0,382	0,446	0,510	0,575	0,639
10	0,639	0,704	0,768	0,833	0,898	0,963	1,028	1,093	1,159	1,224	1,290
20	1,290	1,355	1,421	1,487	1,553	1,619	1,685	1,752	1,818	1,885	1,951
30	1,951	2,018	2,085	2,152	2,219	2,286	2,354	2,421	2,488	2,556	2,624
40	2,624	2,692	2,759	2,828	2,896	2,964	3,032	3,101	3,169	3,238	3,306
50	3,306	3,375	3,444	3,513	3,582	3,652	3,721	3,790	3,860	3,929	3,999
60	3,999	4,069	4,139	4,209	4,279	4,349	4,419	4,490	4,560	4,631	4,701
70	4,701	4,772	4,843	4,914	4,985	5,056	5,127	5,198	5,270	5,341	5,413
80	5,413	5,484	5,556	5,628	5,700	5,772	5,844	5,916	5,988	6,060	6,133
90	6,133	6,205	6,278	6,351	6,423	6,496	6,569	6,642	6,715	6,788	6,862

Продолжение табл. А.2

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100	6,862	6,935	7,008	7,082	7,155	7,229	7,303	7,377	7,451	7,525	7,599
110	7,599	7,673	7,747	7,821	7,896	7,970	8,045	8,119	8,194	8,269	8,344
120	8,344	8,419	8,494	8,569	8,644	8,719	8,794	8,870	8,945	9,021	9,096
130	9,096	9,172	9,248	9,324	9,400	9,476	9,552	9,628	9,704	9,780	9,857
140	9,857	9,933	10,010	10,086	10,163	10,239	10,316	10,393	10,470	10,547	10,624
150	10,624	10,701	10,778	10,856	10,933	11,010	11,088	11,165	11,243	11,321	11,398
160	11,398	11,476	11,554	11,632	11,710	11,788	11,866	11,944	12,023	12,101	12,179
170	12,179	12,258	12,336	12,415	12,494	12,572	12,651	12,730	12,809	12,888	12,967
180	12,967	13,046	13,125	13,204	13,284	13,363	13,442	13,522	13,601	13,681	13,761
190	13,761	13,840	13,920	14,000	14,080	14,160	14,240	14,320	14,400	14,480	14,560
200	14,560	14,641	14,721	14,802	14,882	14,963	15,043	15,124	15,204	15,285	15,366
210	15,366	15,447	15,528	15,609	15,690	15,771	15,852	15,933	16,015	16,096	16,177
220	16,177	16,259	16,340	16,422	16,503	16,585	16,667	16,748	16,830	16,912	16,994
230	16,994	17,076	17,158	17,240	17,322	17,404	17,486	17,569	17,651	17,733	17,816
240	17,816	17,898	17,981	18,063	18,146	18,228	18,311	18,394	18,477	18,559	18,642
250	18,642	18,725	18,808	18,891	18,974	19,057	19,141	19,224	19,307	19,390	19,474
260	19,474	19,557	19,641	19,724	19,808	19,891	19,975	20,059	20,142	20,226	20,310
270	20,310	20,394	20,478	20,561	20,645	20,729	20,813	20,898	20,982	21,066	21,150
280	21,150	21,234	21,319	21,403	21,487	21,572	21,656	21,741	21,825	21,910	21,995
290	21,995	22,079	22,164	22,249	22,333	22,418	22,503	22,588	22,673	22,758	22,843
300	22,843	22,928	23,013	23,098	23,183	23,268	23,354	23,439	23,524	23,609	23,695
310	23,695	23,780	23,866	23,951	24,037	24,122	24,208	24,293	24,379	24,465	24,550
320	24,550	24,636	24,722	24,807	24,893	24,979	25,065	25,151	25,237	25,323	25,409
330	25,409	25,495	25,581	25,667	25,753	25,839	25,926	26,012	26,098	26,184	26,271
340	26,271	26,357	26,443	26,530	26,616	26,702	26,789	26,875	26,962	27,048	27,135
350	27,135	27,222	27,308	27,395	27,482	27,568	27,655	27,742	27,828	27,915	28,002
360	28,002	28,089	28,176	28,263	28,350	28,437	28,523	28,610	28,697	28,784	28,872
370	28,872	28,959	29,046	29,133	29,220	29,307	29,394	29,481	29,569	29,656	29,743
380	29,743	29,830	29,918	30,005	30,092	30,180	30,267	30,354	30,442	30,529	30,617
390	30,617	30,704	30,792	30,879	30,967	31,054	31,142	31,229	31,317	31,404	31,492
400	31,492	31,580	31,667	31,755	31,843	31,930	32,018	32,106	32,193	32,281	32,369
410	32,369	32,457	32,544	32,632	32,720	32,808	32,896	32,983	33,071	33,159	33,247
420	33,247	33,335	33,423	33,511	33,599	33,686	33,774	33,862	33,950	34,038	34,126
430	34,126	34,214	34,302	34,390	34,478	34,566	34,654	34,742	34,830	34,918	35,007
440	35,007	35,095	35,183	35,271	35,359	35,447	35,535	35,623	35,711	35,799	35,888
450	35,888	35,976	36,064	36,152	36,240	36,328	36,417	36,505	36,593	36,681	36,769
460	36,769	36,857	36,946	37,034	37,122	37,210	37,299	37,387	37,475	37,563	37,651
470	37,651	37,740	37,828	37,916	38,004	38,093	38,181	38,269	38,357	38,446	38,534
480	38,534	38,622	38,710	38,799	38,887	38,975	39,063	39,152	39,240	39,328	39,417
490	39,417	39,505	39,593	39,681	39,770	39,858	39,946	40,034	40,123	40,211	40,299

Продолжение табл. А.2

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
500	40,299	40,387	40,476	40,564	40,652	40,740	40,829	40,917	41,005	41,093	41,182
510	41,182	41,270	41,358	41,446	41,535	41,623	41,711	41,799	41,888	41,976	42,064
520	42,064	42,152	42,241	42,329	42,417	42,505	42,593	42,682	42,770	42,858	42,946
530	42,946	43,034	43,123	43,211	43,299	43,387	43,475	43,564	43,652	43,740	43,828
540	43,828	43,916	44,004	44,092	44,181	44,269	44,357	44,445	44,533	44,621	44,709
550	44,709	44,798	44,886	44,974	45,062	45,150	45,238	45,326	45,414	45,502	45,590
560	45,590	45,678	45,766	45,854	45,942	46,031	46,119	46,207	46,295	46,383	46,471
570	46,471	46,559	46,647	46,735	46,823	46,911	46,999	47,087	47,175	47,262	47,350
580	47,350	47,438	47,526	47,614	47,702	47,790	47,878	47,966	48,054	48,142	48,230
590	48,230	48,318	48,405	48,493	48,581	48,669	48,757	48,845	48,933	49,020	49,108
600	49,108	49,196	49,284	49,372	49,460	49,547	49,635	49,723	49,811	49,898	49,986
610	49,986	50,074	50,162	50,250	50,337	50,425	50,513	50,600	50,688	50,776	50,864
620	50,864	50,951	51,039	51,127	51,214	51,302	51,390	51,477	51,565	51,653	51,740
630	51,740	51,828	51,916	52,003	52,091	52,179	52,266	52,354	52,441	52,529	52,617
640	52,617	52,704	52,792	52,879	52,967	53,054	53,142	53,229	53,317	53,405	53,492
650	53,492	53,580	53,667	53,755	53,842	53,930	54,017	54,104	54,192	54,279	54,367
660	54,367	54,454	54,542	54,629	54,717	54,804	54,891	54,979	55,066	55,154	55,241
670	55,241	55,328	55,416	55,503	55,590	55,678	55,765	55,852	55,940	56,027	56,114
680	56,114	56,202	56,289	56,376	56,464	56,551	56,638	56,725	56,813	56,900	56,987
690	56,987	57,074	57,161	57,249	57,336	57,423	57,510	57,597	57,684	57,772	57,859
700	57,859	57,946	58,033	58,120	58,207	58,294	58,381	58,468	58,555	58,642	58,729
710	58,729	58,816	58,903	58,990	59,077	59,164	59,251	59,338	59,425	59,512	59,599
720	59,599	59,686	59,772	59,859	59,946	60,033	60,120	60,206	60,293	60,380	60,467
730	60,467	60,553	60,640	60,727	60,813	60,900	60,987	61,073	61,160	61,246	61,333
740	61,333	61,419	61,506	61,592	61,679	61,765	61,851	61,938	62,024	62,110	62,197
750	62,197	62,283	62,369	62,456	62,542	62,628	62,714	62,800	62,886	62,972	63,058
760	63,058	63,144	63,230	63,316	63,402	63,488	63,574	63,659	63,745	63,831	63,917
770	63,917	64,002	64,088	64,173	64,259	64,344	64,430	64,515	64,601	64,686	64,771
780	64,771	64,856	64,942	65,027	65,112	65,197	65,282	65,367	65,452	65,537	65,621
790	65,621	65,706	65,791	65,875	65,960	66,044	66,129	66,213	66,298	66,382	66,466

Теплофизические характеристики греющей печной среды

Таблица Б.1

Теплофизические свойства сухого воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^3,$ Вт/(м·К)	$\eta \cdot 10^6,$ Па·с	Pr	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	$c_p,$ кДж/(кг·К)	$c_p / c_v = k$	$a \cdot 10^2,$ м ² /ч	$\rho,$ кг/м ³
0	24,4	17,2	0,707	13,3	1,004	1,400	6,76	1,293
100	32,1	21,9	0,688	23,0	1,009	1,397	12,1	0,946
200	39,3	26,0	0,680	34,8	1,026	1,390	18,4	0,747
300	46,1	29,7	0,674	48,2	1,047	1,378	25,7	0,616
400	52,1	33,0	0,678	63,0	1,068	1,366	33,5	0,524
500	57,4	36,2	0,687	79,3	1,093	1,357	41,5	0,456
600	62,3	39,1	0,699	96,8	1,114	1,345	49,9	0,404
700	67,1	41,8	0,706	115	1,135	1,337	58,7	0,363
800	71,8	44,3	0,713	135	1,156	1,330	68,2	0,328
900	76,3	46,7	0,717	155	1,172	1,325	77,8	0,301
1000	80,7	49,0	0,719	178	1,185	1,320	88,8	0,276

Теплофизические характеристики различных марок сталей

Таблица В.1

Коэффициент теплопроводности углеродистых сталей различных марок в зависимости от температуры λ , Вт/(м · К)

Температура, °С	Марка стали					
	08кп	08	20	40	У8	У12
0	65,1	59,5	51,9	51,9	51,1	45,2
50	62,8	58,6	51,5	51,5	50,2	45,2
100	60,2	57,7	51,1	50,6	48,9	44,8
150	57,7	55,2	49,9	49,8	47,7	42,4
200	55,6	53,5	48,5	48,1	46,1	42,7
250	53,0	51,5	46,5	46,9	43,9	41,1
300	50,9	49,4	44,4	45,6	41,9	40,2
350	48,5	47,7	43,6	44,3	40,2	38,5
400	46,5	44,8	42,7	41,9	37,6	37,2
450	43,5	42,3	41,1	40,0	36,9	36,1
500	41,1	40,2	39,3	38,1	35,6	34,7
550	39,4	38,1	37,7	36,1	34,4	33,5
600	37,4	36,1	35,6	33,6	33,3	31,9
650	36,1	33,9	33,9	31,9	31,9	30,0
700	33,9	31,9	31,9	30,0	30,7	28,3
750	31,9	29,8	28,5	26,9	27,3	26,9
800	30,1	28,5	25,9	24,8	24,3	23,7
850	27,7	27,2	25,9	24,8	24,3	23,7
900	27,2	26,7	26,4	25,7	25,2	24,8
950	27,2	27,2	27,2	26,1	26,1	25,7
1000	27,7	27,7	27,7	26,9	26,9	26,1
1050	28,0	28,0	28,0	27,2	27,7	26,9
1100	28,5	28,5	28,5	28,0	28,6	27,2
1150	29,8	29,3	29,3	28,7	28,7	28,0
1200	29,8	29,8	29,8	29,5	29,5	28,6

Коэффициент температуропроводности
углеродистых сталей a , м²/ч

Интервал температур, °С	Углеродистые стали					
	08кп	08	20	40	У8	У12
50–100	0,059	0,055	0,049	0,048	0,046	0,043
100–150	0,053	0,052	0,046	0,046	0,042	0,040
150–200	0,050	0,048	0,044	0,044	0,040	0,038
200–250	0,047	0,045	0,041	0,041	0,037	0,036
250–300	0,044	0,042	0,038	0,039	0,035	0,034
300–350	0,040	0,040	0,036	0,037	0,032	0,032
350–400	0,037	0,036	0,033	0,034	0,030	0,029
400–450	0,034	0,033	0,031	0,031	0,028	0,028
450–500	0,030	0,029	0,028	0,028	0,025	0,026
500–550	0,027	0,026	0,026	0,025	0,023	0,024
550–600	0,024	0,023	0,023	0,023	0,022	0,022
600–650	0,022	0,021	0,021	0,021	0,021	0,020
650–700	0,019	0,018	0,018	0,019	0,019	0,017
700–750	0,014	0,013	0,010	0,009	0,007	0,006
750–800	0,017	0,014	0,014	0,020	0,020	0,019
800–850	0,017	0,015	0,017	0,018	0,019	0,019
850–900	0,015	0,016	0,019	0,019	0,019	0,019
900–950	0,019	0,019	0,019	0,019	0,020	0,019
950–1000	0,019	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
1000–1050	0,020	0,020	0,021	0,020	0,020	0,020
1050–1100	0,020	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021

Таблица В.3

Плотность углеродистых сталей различных марок ρ_m , кг/м³

Температура, °С	Марка стали					
	08кп	08	20	40	У8	У12
0	7876	7861	7863	7858	7855	7834
15	7871	7856	7859	7854	7851	7830
50	7861	7847	7849	7845	7842	7822
100	7846	7832	7834	7832	7829	7809
150	7830	7846	7819	7817	7815	7796
200	7814	7800	7803	7801	7800	7781
250	7798	7783	7787	7784	7784	7765
300	7781	7765	7770	7766	7767	7749
350	7763	7748	7753	7748	7749	7731
400	7745	7730	7736	7730	7731	7713
450	7727	7711	7718	7711	7713	7694
500	7708	7692	7699	7692	7694	7675
550	7688	7673	7679	7672	7675	7655
600	7668	7653	7659	7652	7655	7634
650	7648	7632	7635	7628	7632	7613
700	7628	7613	7617	7613	7612	7592
750	7610	7594	7620	7624	7604	7581
300	7598	7582	7624	7635	7594	7565
850	7601	7589	7616	7617	7565	7528
900	7602	7594	7600	7590	7533	7489
950	7580	7572	7574	7564	7509	7463
1000	7550	7543	7548	7538	7485	7438
1050	7523	7515	7522	7512	7460	7413
1100	7495	7488	7496	7436	7436	7388

Таблица В.4

Средняя массовая изобарная теплоемкость углеродистых сталей

$$\bar{c}_{pM}, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Температура, °С	Марка стали					
	08кп	08	20	40	У8	У12
100	485,7	485,7	485,7	485,7	485,7	485,7
150	494,0	494,0	494,0	494,0	502,4	502,4
200	502,4	502,4	502,4	498,2	515,0	515,0
250	510,8	510,8	510,8	506,6	523,4	523,4
300	519,2	519,2	519,2	515,0	531,7	531,7
350	527,5	527,5	527,5	523,4	540,1	540,1
400	535,9	540,1	540,1	531,7	548,5	544,3
450	548,5	548,5	548,5	544,3	556,8	556,8
500	561,0	561,0	561,0	556,8	569,4	565,2
550	573,6	577,8	573,6	569,4	582,0	577,8
600	590,3	590,3	590,3	582,0	594,5	586,2
650	611,3	607,1	607,1	594,5	602,9	598,7
700	628,0	628,0	628,0	607,1	619,6	615,5
750	644,8	661,5	669,9	678,3	724,3	720,1
800	678,3	682,4	703,4	674,1	715,9	715,9
850	682,4	695,0	703,4	661,5	711,8	711,8
900	695,0	703,4	703,4	657,3	707,6	707,6
950	690,8	699,2	699,2	653,1	703,4	703,4
1000	690,8	695,0	695,0	653,1	699,2	699,2
1050	690,8	695,0	690,8	653,1	695,0	695,0
1100	690,8	695,0	690,8	649,0	695,0	695,0
1150	686,6	690,8	686,6	649,0	690,8	690,8
1200	686,6	690,8	686,6	649,0	690,8	690,8
1250	686,6	690,8	686,6	653,1	690,8	690,8

Номограммы для расчета нагрева (охлаждения) тел

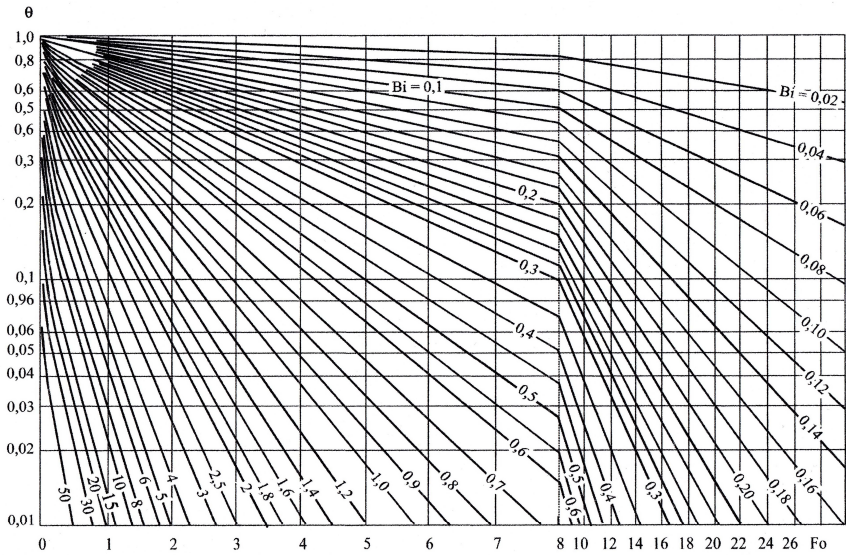


Рис. Г.1. Безразмерная температура для поверхности пластины при $Fo = 0-30$

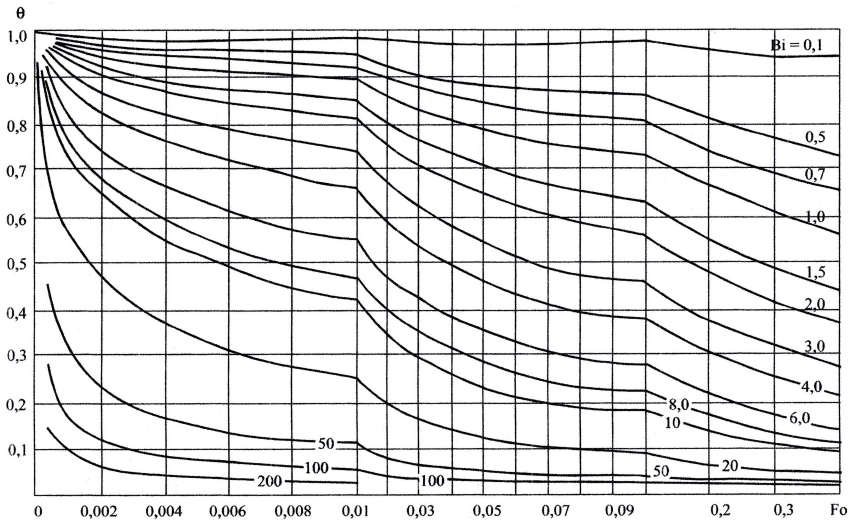


Рис. Г.2. Безразмерная температура для поверхности пластины при $Fo = 0-0,5$

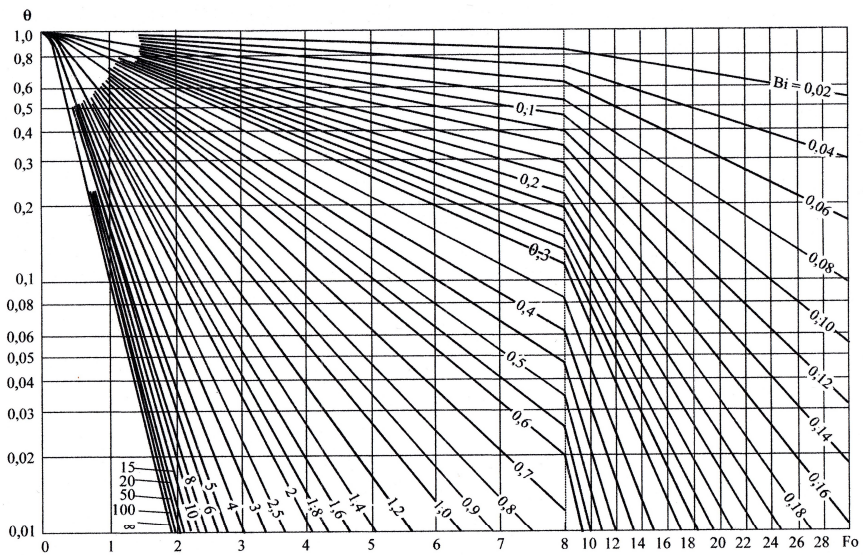


Рис. Г.3. Безразмерная температура для середины пластины при $Fo = 0-30$

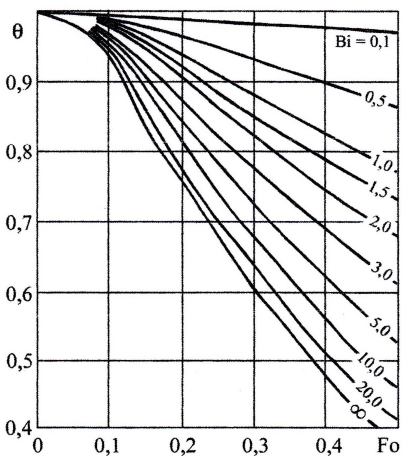


Рис. Г.4. Безразмерная температура для середины пластины при $Fo = 0-0,5$

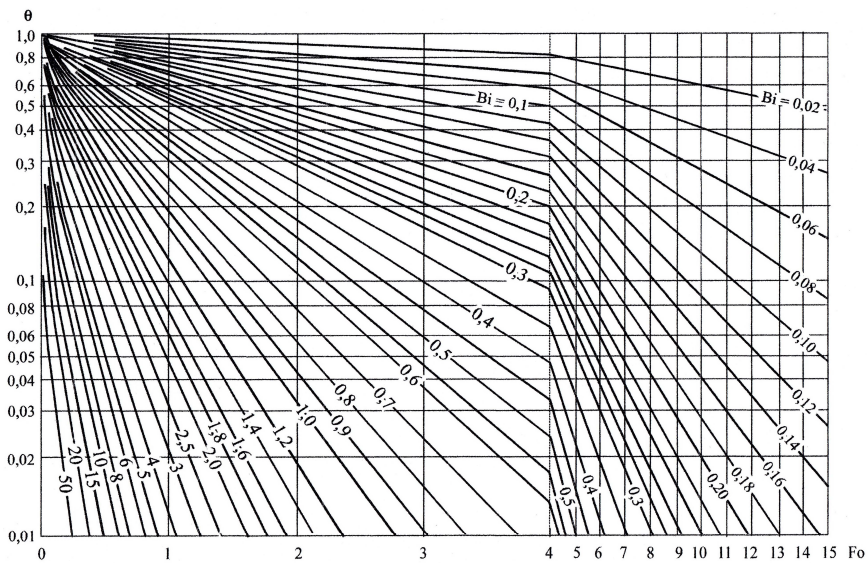


Рис. Г.5. Безразмерная температура для поверхности цилиндра при $Fo = 0-15$

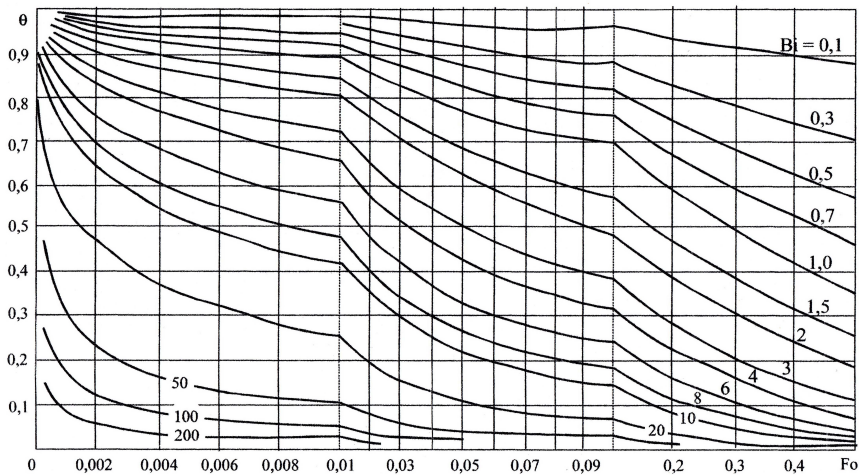


Рис. Г.6. Безразмерная температура для поверхности цилиндра при $Fo = 0-0,5$

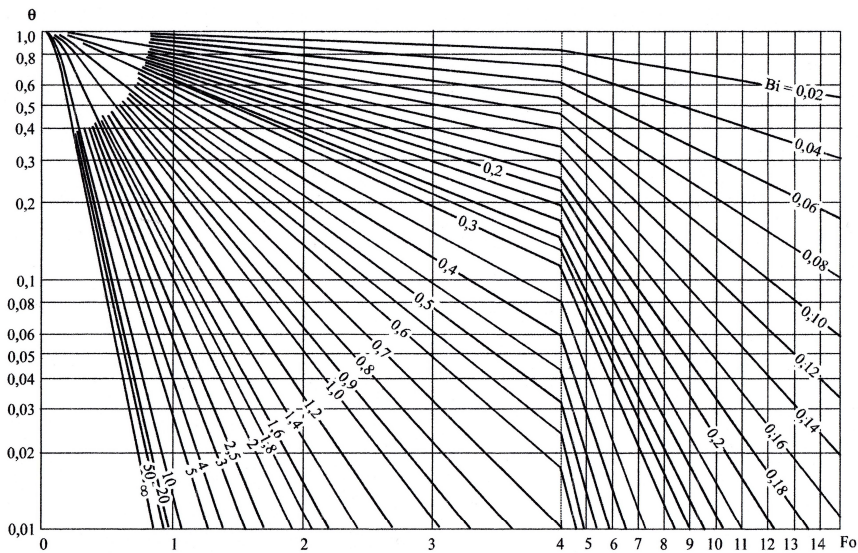


Рис. Г.7. Безразмерная температура для середины цилиндра при $Fo = 0-15$

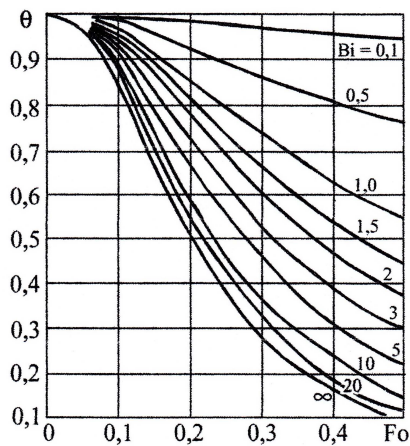


Рис. Г.8. Безразмерная температура для середины цилиндра при $Fo = 0-0,5$

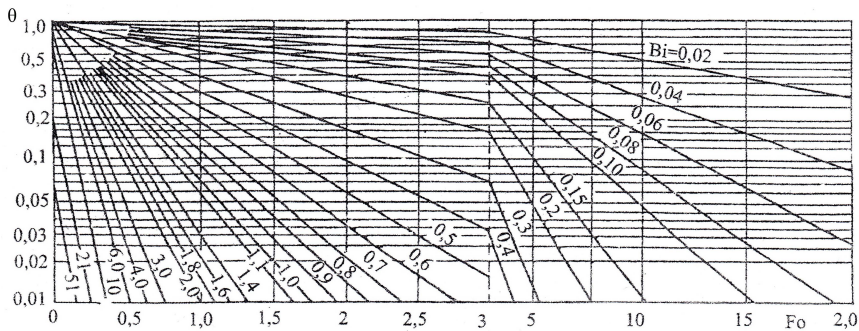


Рис. Г.9. Безразмерная температура для поверхности шара

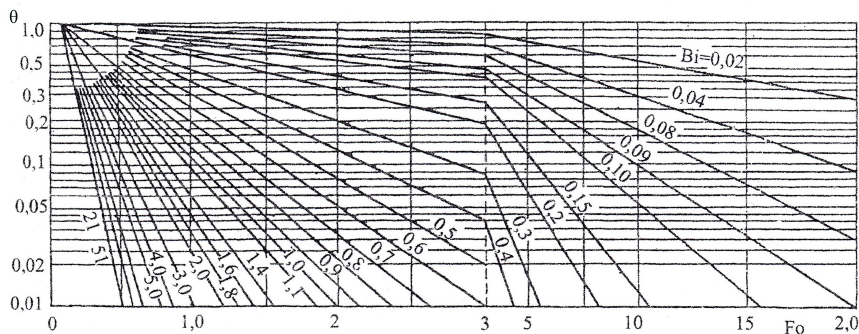


Рис. Г.10. Безразмерная температура для середины шара

К выбору температурного фактора при нагреве тонкого тела

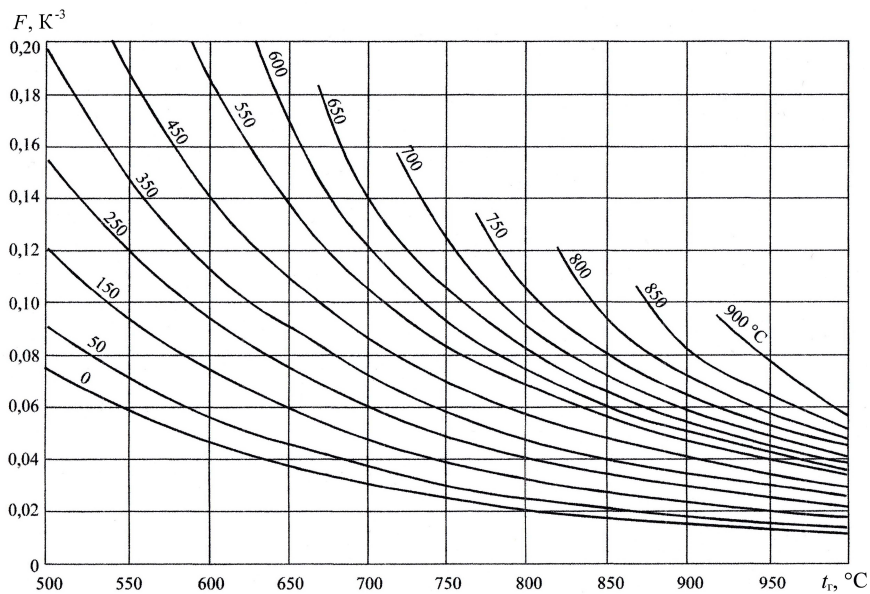


Рис. Д.1. К выбору температурного фактора (тонкое тело)

Учебное издание

ИОКОВА Ирина Леонидовна
МИГУЦКИЙ Игорь Евгеньевич
ХУЖАКУЛОВ Сайдулло Мирзаевич и др.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Практикум
для студентов специальности 7-07-0712-02
«Теплоэнергетика и теплотехника»
профилизаций: «Промышленная теплоэнергетика»
и «Теплоэнергетические установки и системы теплоснабжения»

Редактор *К. С. Мельникова*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 21.11.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,20. Уч.-изд. л. 2,01. Тираж 100. Заказ 451.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.