

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» профилиаций: «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» профилиаций: «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 ТЕПЛООТДАЧИ 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.

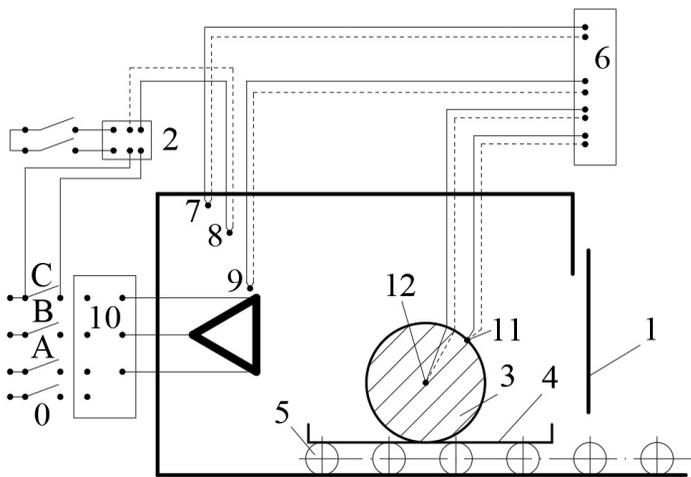


Рис. 1.1. Схема лабораторной камерной электропечи:

- 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]:

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

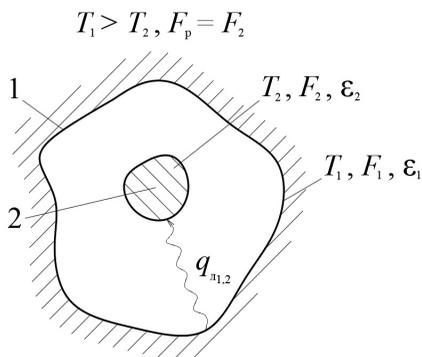


Рис. 1.2. Схема лучистого теплообмена в камере печи:
1 – излучающая футеровка; 2 – нагреваемая заготовка

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

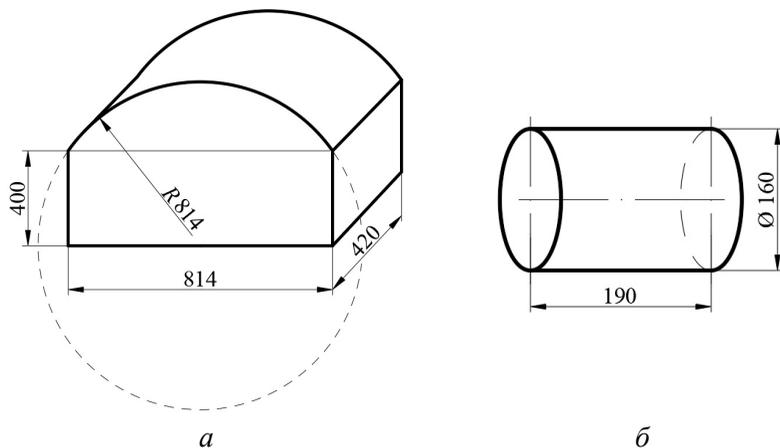


Рис. 1.3. Чертежи для определения расчетных поверхностей теплообмена:
a – эскизный чертеж рабочего пространства камерной электропечи
(камера выполнена из кирпича марки ШБЛ-2,0); *б* – эскизный чертеж заготовки
в виде цилиндра с размерами: $d = 160$ и $l = 190$ мм

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).

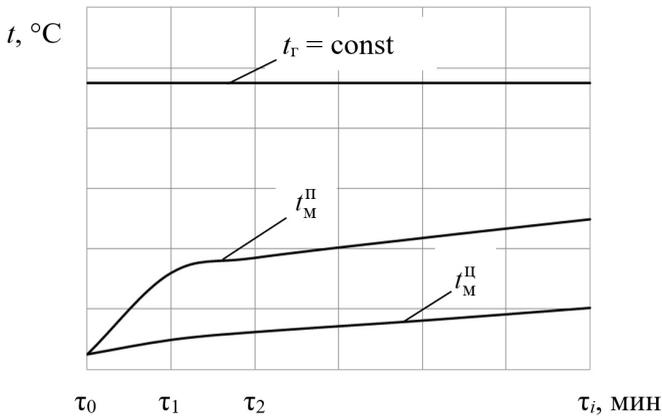


Рис. 1.4. Примерный вид зависимости температур газов, садки на поверхности и в ее середине (геометрическом центре) от времени нагрева при симметричном обогреве

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 $\alpha_{\text{эф}}$ 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.

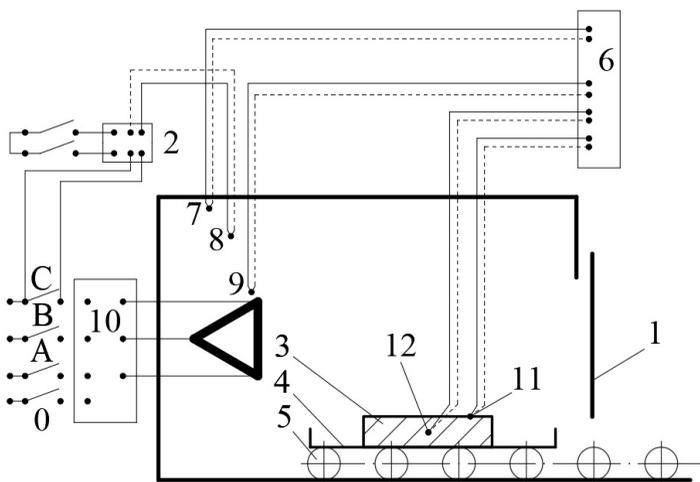


Рис. 2.1. Схема лабораторной камерной электропечи:

- 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)

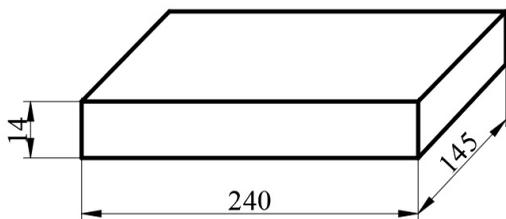


Рис. 2.2. Эскизный чертеж заготовки в виде пластины с размерами: 14 × 145 × 240 мм

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.

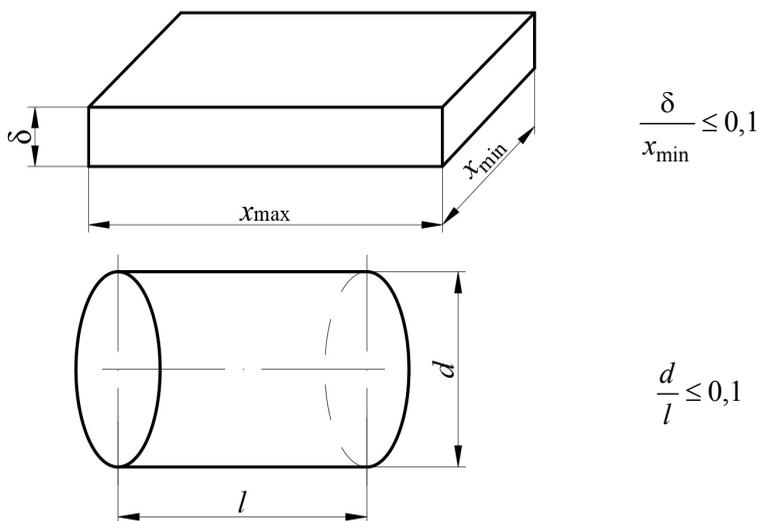


Рис. 2.3. Определение классической пластины и цилиндра

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).

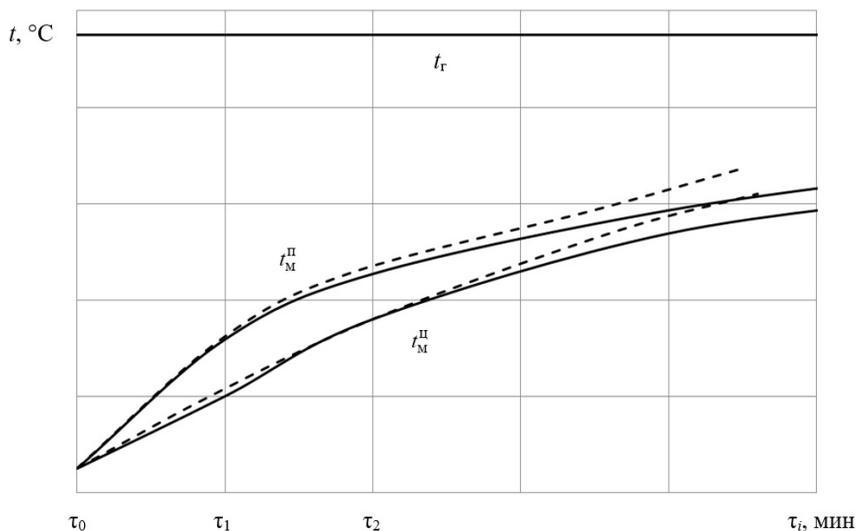


Рис. 2.4. Примерный вид экспериментального (сплошная линия) и расчетного (штриховая линия) температурных графиков

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), м²/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 \prod – 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:

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

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

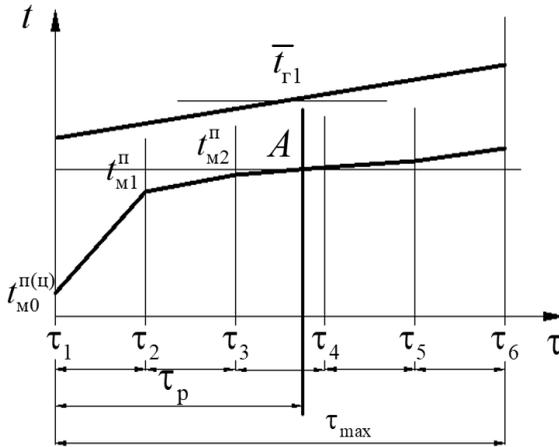


Рис. 3.1. Графическое определение времени нагрева заготовки до заданной температуры

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 $X_2 =$ $Bi^{(2)} =$ | | $\Pi \left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0} \right)_i^{n(u)}$ | $t_{Mi}^{n(u)}$ |
|-----------------|------------------------------------|---|-------------------------------------|---|--|-----------------|
| | $Fo_i^{(1)}$ | $\left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0} \right)_i^{n(u)(1)}$ | $Fo_i^{(2)}$ | $\left(\frac{\theta_\tau}{\theta_0} \right)_i^{n(u)(2)}$ | | |
| 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).

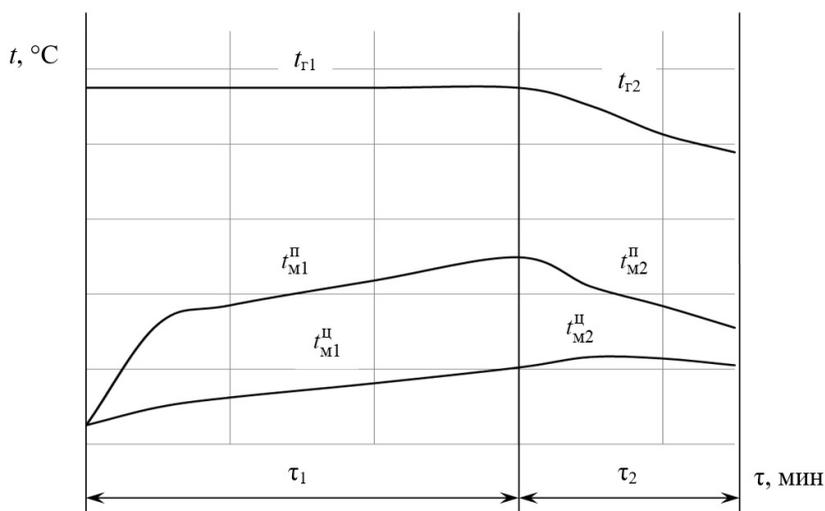


Рис. 4.1. Примерный вид температурного графика печи

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).

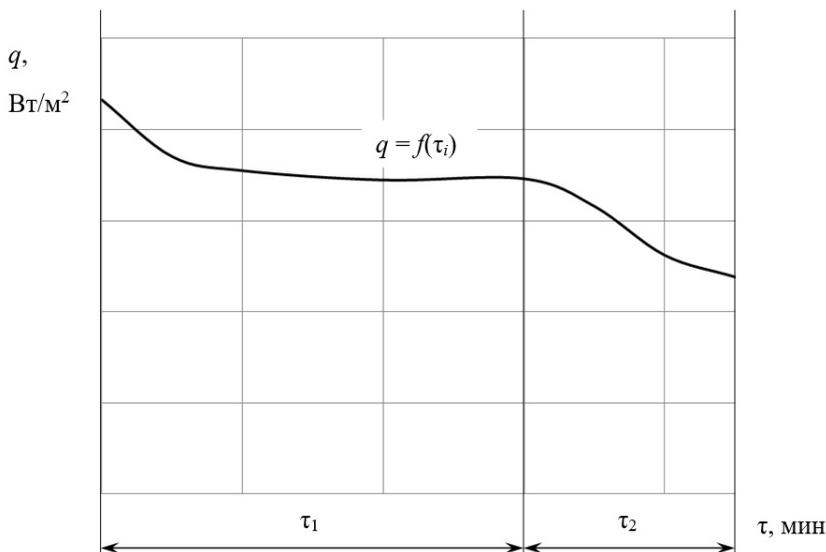


Рис. 4.2. Примерный вид теплового графика

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

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

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)

| | | | | | | | | | | | |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| °C | 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

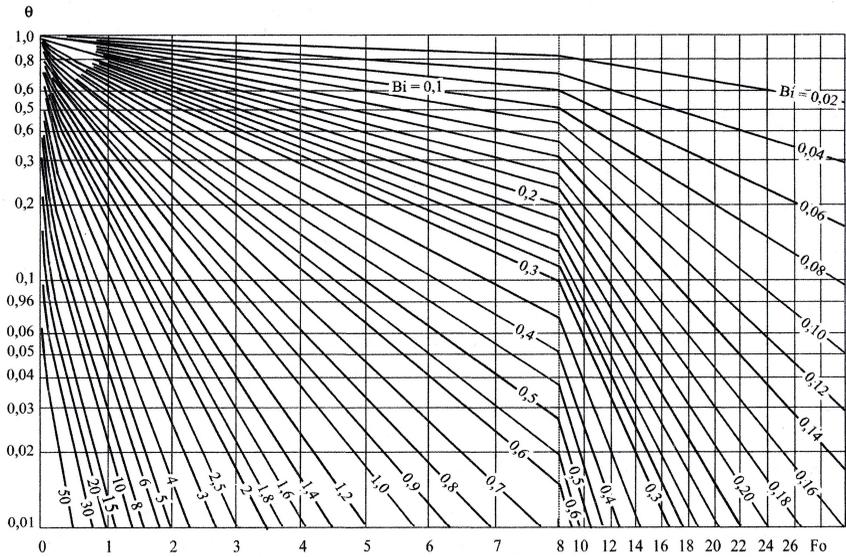


Рис. Г.1. Безразмерная температура для поверхности пластины при $Fo = 0-30$

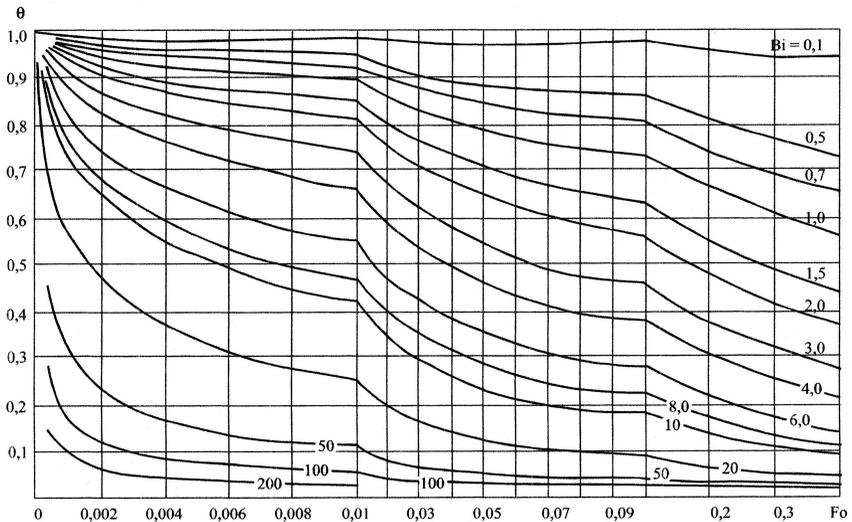


Рис. Г.2. Безразмерная температура для поверхности пластины при $Fo = 0-0,5$

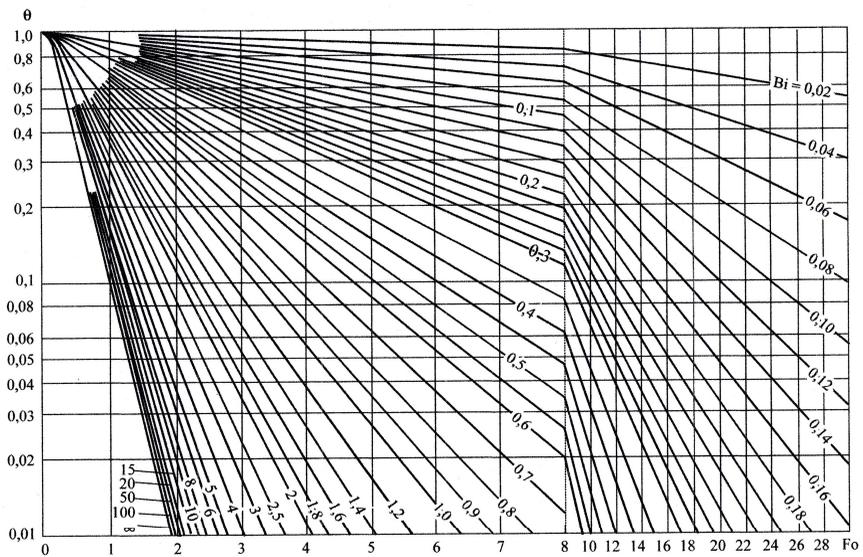


Рис. Г.3. Безразмерная температура для середины пластины при $Fo = 0-30$

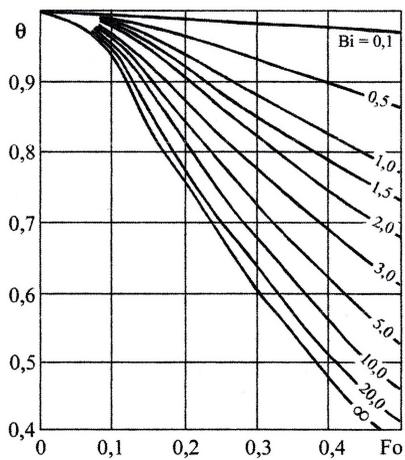


Рис. Г.4. Безразмерная температура для середины пластины при $Fo = 0-0,5$

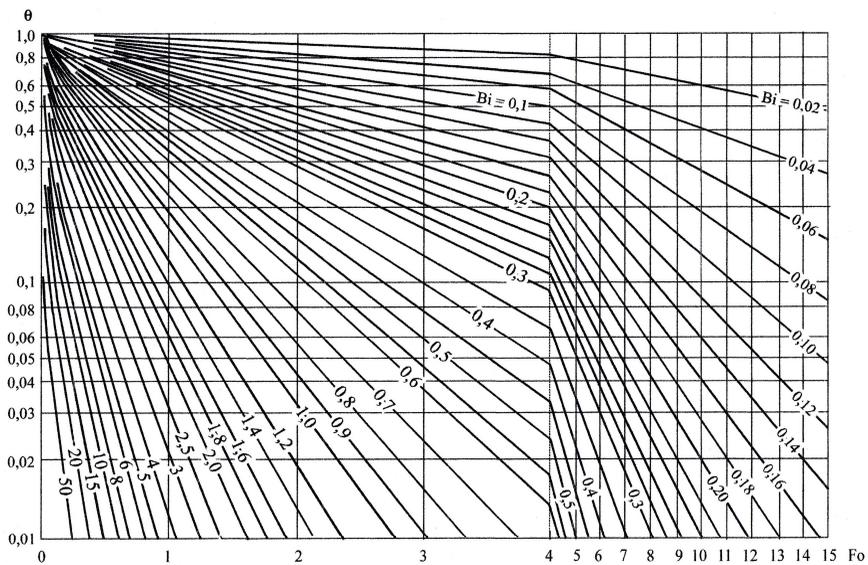


Рис. Г.5. Безразмерная температура для поверхности цилиндра при $Fo = 0-15$

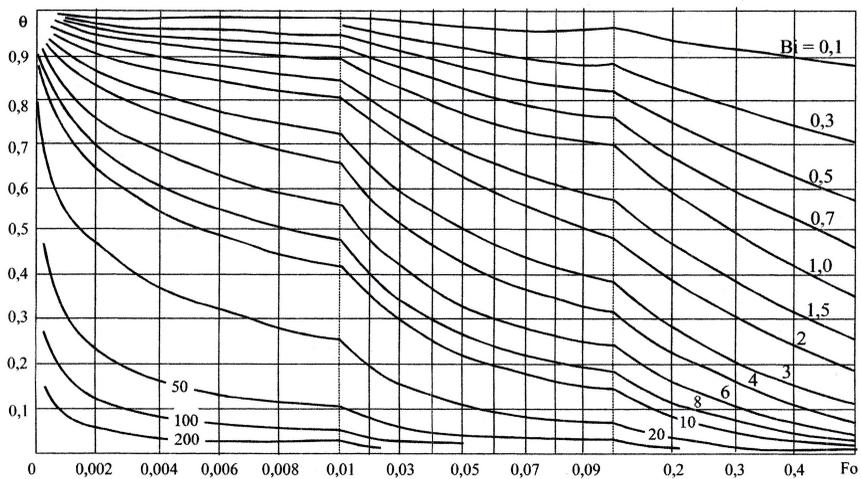


Рис. Г.6. Безразмерная температура для поверхности цилиндра при $Fo = 0-0,5$

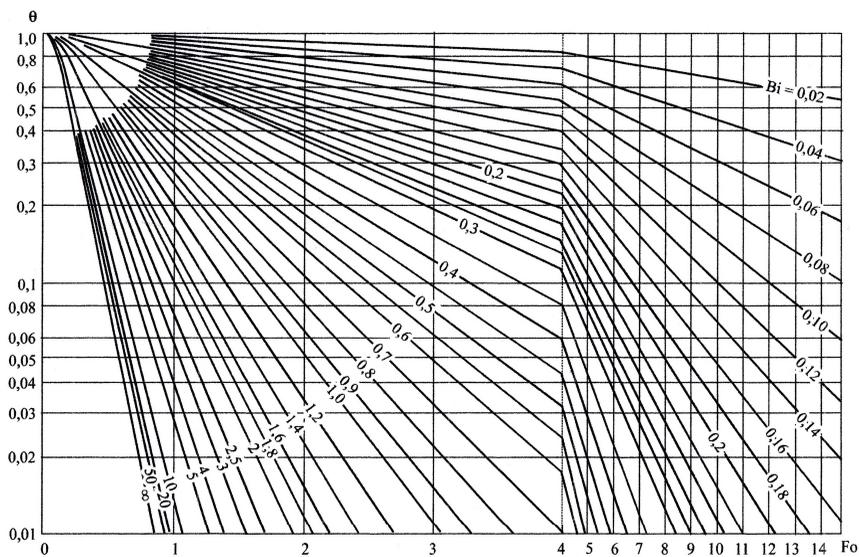


Рис. Г.7. Безразмерная температура для середины цилиндра при $Fo = 0-15$

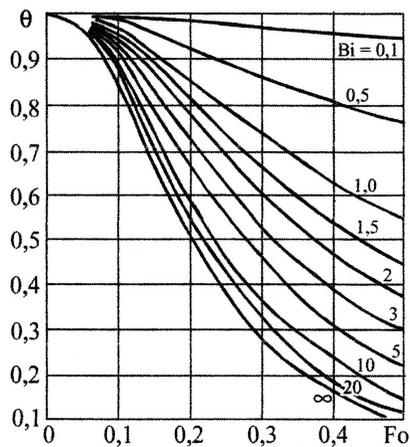


Рис. Г.8. Безразмерная температура для середины цилиндра при $Fo = 0-0,5$

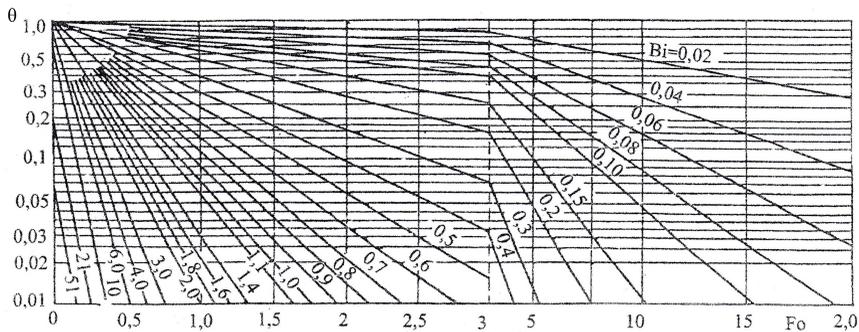


Рис. Г.9. Безразмерная температура для поверхности шара

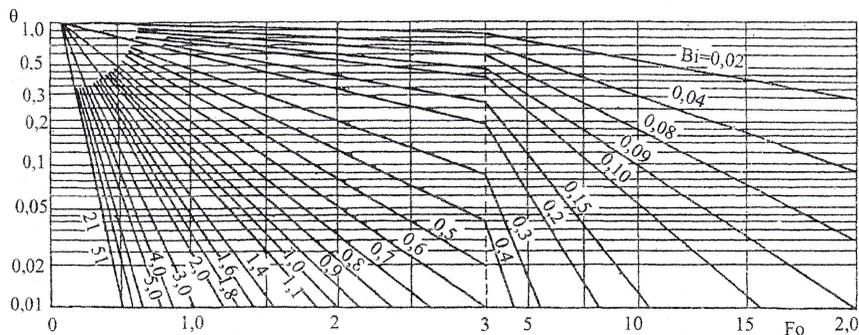


Рис. Г.10. Безразмерная температура для середины шара

К выбору температурного фактора при нагреве тонкого тела

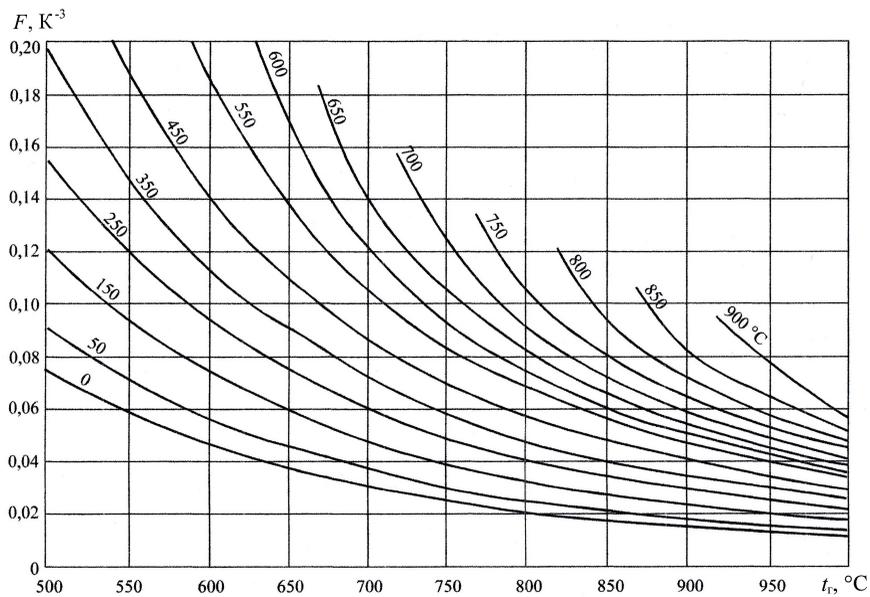


Рис. Д.1. К выбору температурного фактора (тонкое тело)

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.