



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Металлургические технологии»

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА
НЕСТАЦИОНАРНОЙ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ПРИ НАГРЕВЕ ТЕЛ
РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ**

Лабораторная работа
по дисциплине «Металлургическая теплотехника
и теплоэнергетика»

Минск 2006

Кафедра «Металлургические технологии»

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ПРИ НАГРЕВЕ ТЕЛ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Лабораторная работа
по дисциплине «Металлургическая теплотехника
и теплоэнергетика»

для студентов специальностей

1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов давлением»,

1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства»,

1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка»,

1-42 01 02 «Порошковая металлургия,
композиционные материалы, покрытия»

УДК 669.04
ББК 34.3я7
И 39

Составители:

*В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, С.М. Кабишов,
Г.А. Климович, П.Э. Ратников*

Рецензенты:

Н.И. Иващицкий, А.Г. Слуцкий

Лабораторная работа предназначена для закрепления и углубления теоретических знаний, полученных при изучении лекционного материала по курсу «Металлургическая теплотехника и теплоэнергетика», а также для приобретения практических навыков выполнения теплотехнических измерений и расчетов.

Введение

Целью лабораторной работы является закрепление теоретического материала курса, а также ознакомление студентов с методиками измерений и исследований теплофизических процессов, протекающих в агрегатах металлургического производства. Большое внимание уделяется приобретению студентами навыков ведения самостоятельной научно-исследовательской работы, анализа и обобщения полученных результатов.

Для осмысленного выполнения работы студенты должны предварительно изучить теоретические положения по изучаемому вопросу, методику исследования, принцип работы приборов и оборудования.

Перед началом работы студенты обязаны пройти инструктаж по технике безопасности и расписаться в соответствующем журнале.

Лабораторная работа проводится под руководством преподавателя и инженера.

Студенты, пропустившие лабораторную работу, выполняют ее в конце семестра в дополнительное время по расписанию кафедры. Студенты, не защитившие лабораторную работу в установленный срок, не получают зачет и не допускаются к экзаменам.

ПРАВИЛА ОХРАНЫ ТРУДА И ПРОТИВОПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

При выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать следующие требования:

1. Лабораторные работы проводятся по подгруппам, не превышающим 12–15 человек.

2. Перед выполнением лабораторных работ студенты обязаны ознакомиться с правилами охраны труда и противопожарной безопасности в лаборатории и на рабочих местах, расписаться в журнале регистрации инструктажа по охране труда.

3. Преподаватель, ведущий занятия, перед началом каждой лабораторной работы обязан напомнить студентам о правилах охраны труда и безопасных приемах работы на лабораторном оборудовании.

4. При работе с электрооборудованием студенты обязаны выполнять правила электробезопасности и пользоваться предусмотренными для этой цели защитными средствами.

5. Работать на приборах и оборудовании студенты могут только под наблюдением преподавателя или лаборанта.

6. Студентам запрещается включать приборы и механизмы самостоятельно, без наблюдения преподавателя и лаборанта.

7. Перед проведением испытаний студенты по настоящему практикуму и соответствующим инструкциям обязаны ознакомиться с работой лабораторного оборудования.

8. К лабораторным работам допускаются студенты, овладевшие правилами и порядком их выполнения.

9. По окончании работы следует тщательно убрать свое рабочее место.

Цель работы: изучить явление нестационарной теплопроводности, по опытным данным построить кривые зависимости температуры от времени $t = f(\tau)$ для поверхности и центра образцов.

Теоретическая часть

Процессы переноса теплоты в твердом теле могут протекать таким образом, что температура в каждой точке тела, следовательно, и тепловой поток, однозначно связанный с градиентом температуры, изменяются во времени. Такое температурное поле называется *нестационарным*. Оно является не только функцией координат, но и времени, т. е. $T = T(x, y, z, \tau)$.

Нестационарная теплопроводность описывается дифференциальным уравнением теплопроводности

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = \rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau}$$

или

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности вещества, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{градус}}$;

ρ – плотность вещества, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; c_p – изобарная теплоемкость едини-

цы массы вещества, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; a – коэффициент температуропровод-

ности $\left(a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \right)$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; τ – время, с; t – температура, градус;

x, y, z – координаты точек тела.

Дифференциальное уравнение теплопроводности устанавливает связь между временным и пространственным изменением температуры в любой точке тела, в которой происходит процесс теплопроводности.

Запишем частные случаи дифференциального уравнения. Одномерное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right).$$

Двумерное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right).$$

Для того чтобы решить основную задачу теории теплопроводности, т. е. найти распределение температур в пространстве и во времени $t = f(x, y, z, \tau)$, необходимо решить дифференциальное уравнение (1).

Однако это уравнение имеет бесчисленное множество решений. Чтобы из этого множества выделить одно, необходимо задать условия однозначности.

В условия однозначности входят:

- ✓ геометрические параметры, т. е. форма и размеры тела;
- ✓ теплофизические параметры материала, т. е. коэффициент теплопроводности λ , плотность ρ , удельная теплоемкость тела c ;

- ✓ начальные условия, т. е. распределение температуры в объеме тела в некоторый момент времени, принимаемый за начало отсчета: $\tau = 0$;
- ✓ граничные условия, характеризующие тепловое взаимодействие окружающей среды с поверхностью тела.

Наиболее простые и часто встречающиеся на практике начальные условия показывают, что температура во всех точках тела в начальный момент времени одинакова, т. е.

$$t_{\text{нач}} = \text{const} \text{ при } \tau = 0.$$

Граничные условия могут быть заданы тремя различными способами:

1. Граничные условия I рода. В этом случае задается распределение температуры по всей поверхности тела и изменение этого распределения во времени, т. е.

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{пов}}(x, y, z, \tau).$$

Частный случай

$$t_{\text{пов}} = \text{const}.$$

2. Граничные условия II рода. В этом случае задается распределение плотности теплового потока по всей поверхности тела и изменение этого распределения во времени

$$q_{\text{пов}} = q_{\text{пов}}(x, y, z, \tau).$$

Частный случай

$$q_{\text{пов}} = \text{const}.$$

3. Граничные условия III рода. В этом случае задаются температура окружающей среды или внешнего источника теплоты $t_{\text{ср}}$ и закон теплообмена между средой и поверхностью тела. Граничные условия III рода являются наиболее общими и часто встречаются на практике.

Если внешний теплообмен между окружающей средой с температурой $t_{\text{ср}}$ и поверхностью тела с температурой $t_{\text{пов}}$ осуществляется путем конвективной теплоотдачи с коэффициентом теплоотдачи α , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, тепловой поток определяется по формуле Ньютона:

$$q = \alpha(t_{\text{ср}} - t_{\text{пов}}).$$

В соответствии с законом Фурье граничные условия принимают вид

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = \alpha(t_{\text{ср}} - t_{\text{пов}}).$$

Если внешний теплообмен между окружающей средой и поверхностью тела осуществляется путем теплового излучения, тепловой поток определяется по закону Стефана-Больцмана:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = C \left[\left(\frac{t_{\text{ср}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{пов}} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

где C – приведенный коэффициент излучения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $C = C_0 \cdot \varepsilon$, C_0 – коэффициент излучения, $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; ε – степень черноты тела.

Если внешний теплообмен между окружающей средой и поверхностью происходит за счет лучисто-конвективного потока, граничные условия имеют вид

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = C \left[\left(\frac{t_{\text{ср}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{пов}} + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha(t_{\text{ср}} - t_{\text{пов}}).$$

Основной задачей решения уравнения теплопроводности является отыскание нестационарного распределения температур в теле как функции пространственных координат и времени при плавлении, нагреве и охлаждении тел:

$$t = t(x, y, z, \tau).$$

В зависимости от поведения тел при нагреве и охлаждении их разделяют на две категории: термически тонкие и термически массивные тела.

Термически тонкими телами называют такие, при нагреве которых температуру в различных точках по сечению можно принимать одинаковой, т. е. считать, что температура таких тел изменяется только во времени.

Термически массивными считаются такие тела, при нагреве которых температура изменяется как по сечению тела, так и во времени. В отличие от тонких тел, при нагреве массивных необходимо учитывать неравномерность температурного поля по сечению.

Мерой массивности тела, позволяющей отнести его к одной из указанных категорий, является *критерий или число Био*

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

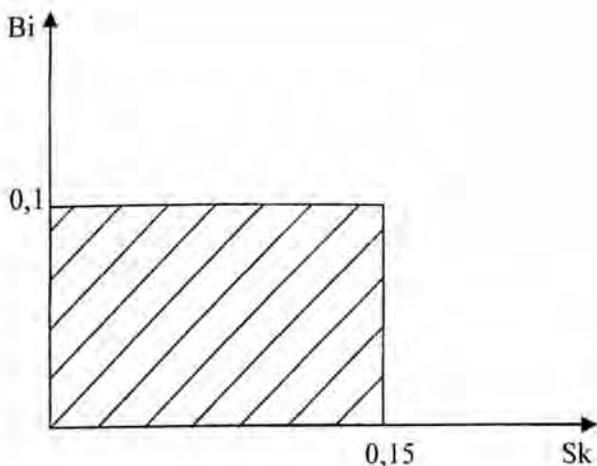
где α – коэффициент теплоотдачи, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$; S – характерный размер тела (для пластины – половина ее толщины при симметричном нагреве, при несимметричном нагреве – толщина; для цилиндра и шара – радиус), м.

Если $Bi \leq 0,25$ – тело считается термически тонким, если $Bi > 0,5$ – термически массивным, интервал от 0,25 до 0,5 – переходная область.

Если наряду с критерием Био ввести в рассмотрение критерий

Старка ($Sk = \frac{C \cdot 10^{-8} T_{cp} S}{\lambda}$), учитывающий лучистый теплообмен,

то к термически тонким телам можно отнести те, для которых расчетные значения указанных критериев будут находиться в заштрихованной области (см. рисунок).



Область значений критериев Био и Старка
для термически тонких тел

Существующие методы решения задач нестационарной теплопроводности можно классифицировать по различным признакам.

Один из них – форма, в которой представлены результаты решений. Решение задачи может быть представлено в виде формул, позволяющих по заданным значениям аргументов получить значения искомых функций. Такие решения называют аналитическими. При использовании численных методов решение получают в виде численных значений функции, соответствующих заданным численным значениям аргумента.

Аналитические методы решения задач нестационарной теплопроводности могут быть точными (классические) и приближенными. Все численные методы решения являются приближенными.

Решение дифференциального уравнения теплопроводности с начальными и граничными условиями позволяет найти температурное поле для простейших по форме тел (пластины, цилиндра и шара):

$$T = f(x; \tau; \alpha; \lambda; a; T_{\text{печ}}; T_{\text{нач}}; S).$$

Теория подобия позволяет сократить число переменных и констант с 8 до 3 и получить решение в следующем виде:

$$\frac{t_{\text{печ}} - t}{t_{\text{печ}} - t_{\text{нач}}} = f\left(\frac{x}{R}; \frac{a\tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}\right) = f\left(\frac{x}{R}; Fo, Bi\right), \quad (2)$$

где t – текущая температура в данной точке, градус; x – расстояние от середины тела до данной точки, м; S – половина толщины пластины (при симметричном нагреве), радиус цилиндра или шара, м; $\frac{x}{S}$ – от-

носительная длина ($\frac{x}{S} = 0$ соответствует центру, а $\frac{x}{S} = 1$ – поверх-

ности тела); $\frac{a\tau}{S^2} = Fo$ – относительное время (критерий Фурье);

$\frac{\alpha S}{\lambda} = Bi$ – критерий Био.

С использованием выражения (2) построены номограммы Будрина, с помощью которых можно определить температуру в центре и на поверхности тела при его нагреве или охлаждении при заданной температуре печи и заданном времени нагрева. Либо при заданной температуре тела (поверхности или центра) определить необходимое время нагрева.

Номограммы построены для пластины (поверхности и центра) и цилиндра (поверхности и центра) при допущении постоянства теплофизических свойств нагреваемого или охлаждаемого материала ($\lambda = \text{const}$; $a = \text{const}$). В действительности теплофизические свойства металлов и сплавов существенно зависят от температуры, и это необходимо учитывать при решении задач теплопроводности.

Кроме того, для условий высокотемпературных печей необходимо учитывать нагрев тел лучисто-конвективным потоком. Такие задачи называются нелинейными или задачами с нелинейностью I рода (учет зависимости теплофизических свойств от температуры) и с нелинейностью II рода (учет нелинейности граничных условий, т. е. лучистого теплообмена).

В этом случае задача теплопроводности имеет следующий вид:

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{x^m} \frac{\partial}{\partial x} \left[x^m \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right];$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=R} = \sigma_b [T_{cp}^4 - T_n^4(\tau)] + \alpha [T_{cp} - T_n(\tau)];$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0;$$

$$T(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = T_{нач} = \text{const},$$

где $\sigma_b = \sigma_0 \cdot \epsilon_{прив}$ – видимый коэффициент излучения, Вт/(м²·К⁴); $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – число Больцмана; $\epsilon_{прив}$ – приведенная степень черноты системы, в которой нагревается тело; T_{cp} – температура греющей среды, К; $T_n(\tau)$ – температура поверхности тела, К; α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К); R – характерный размер тела, м; $T(x, \tau)$ – температура тела в момент времени τ , К; $T_{нач} = \text{const}$ – начальная температура тела, К; m – коэффициент формы, $m = 0$ – пластина; $m = 1$ – цилиндр; $m = 2$ – сфера (шар).

Основная трудность решения такой системы уравнений заключается в том, что она не имеет решения в замкнутой форме. Поэтому применяют приближенные методы решения (при этом используют те или иные упрощения), либо численные.

Порядок выполнения работы

1. Поместить в лабораторную печь опытные цилиндрические образцы и в заранее просверленные отверстия зачеканить термопары.
2. Включить лабораторную печь.
3. Нагревать заготовки в течение 30 минут. Снимать показания каждую минуту и заносить их в таблицу.
4. Построить кривые нагрева образцов $t_{пов} = f(\tau)$ и $t_{ц} = f(\tau)$.
5. Вычислить критерий Био для образцов:

$$Bi = \frac{\alpha_{л+к} R}{\lambda}.$$

Так как в электрических печах почти вся тепловая энергия передается лучеиспусканием, то коэффициент теплоотдачи определяется по формуле

$$\alpha_{л+к} = \frac{C_{пр} \left[\left(\frac{T_{печи}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{п}}{100} \right)^4 \right]}{t_{печи} - t_{п}},$$

где $C_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения, $C_{пр} = C_0 \varepsilon$; ε –

степень черноты тела; $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$, $\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$,

где F_1, F_2 – площади поверхностей образца и стен печи, м^2 ; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степени черноты образца и стен печи соответственно.

Так как температура поверхности образца при его нагреве изменяется, то расчет следует вести по среднегеометрическому значению коэффициента теплоотдачи

$$\alpha_{л+к} = \sqrt{\alpha_{н} \alpha_{к}},$$

где $\alpha_{н}, \alpha_{к}$ – значения коэффициента теплоотдачи, подсчитанные по температуре поверхности образца в начале и в конце рассматриваемого промежутка времени.

Определить коэффициент теплопроводности λ в зависимости от средней по времени и массе температуры образца.

6. Определить критерий Фурье

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{R^2}.$$

7. Используя номограммы Будрина, определить безразмерные температуры поверхности $\Theta_{п}$ и центра $\Theta_{ц}$ образца.

8. По полученным значениям безразмерных температур определить температуры поверхности и центра образца и сравнить с измеренными значениями:

$$\Theta = \frac{t_{печи} - t}{t_{печи} - t_{нач}}.$$

Результаты занести в таблицу.

№	Материал образца	τ , мин	$t_{\text{нач}}$, °C	$t_{\text{печи}}$, °C	$t_{\text{п}}$, °C	$t_{\text{ц}}$, °C	Bi	Fo	$\Theta_{\text{п}}$	$\Theta_{\text{ц}}$	$t_{\text{п}}^{\text{теор}}$, °C	$t_{\text{ц}}^{\text{теор}}$, °C

Содержание отчета

Общие сведения о процессе нестационарной теплопроводности. Описание методики проведения эксперимента. Результаты опытов в виде таблиц, расчетов, графиков. Выводы.

Литература

1. Metallurgicheskaya teplo tekhnika: uchebник для вузов. В 2 т. / В.А. Кривандин [и др.]. – М.: Metallургия, 1986.
2. Арутюнов, В.А., Миткалинный, В.И., Старк, С.Б. Metallургия- ческая теплотехника. В 2 т. – М.: Metallургия, 1974.
3. Исаченко, В.П., Осипова, В.А., Сукомел, А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981.
4. Кривандин, В.А., Марков, Б.Л. Metallургияческие печи. – М.: Metallургия, 1977.
5. Краснощеков, Е.А., Сукомел, А.С. Задачник по теплопередаче. – М.: Энергия, 1969.
6. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, А.Б. Стеблов, И.А. Павлюченков; под общ. ред. В.И. Тимошпольского. – Мн.: Вышэйшая школа, 1992.
7. Промышленные теплотехнологии. Машиностроительное и metallургияческое производство: учебник. В 2 ч. / Под общ. ред. В.И. Тимошпольского. – Мн.: Вышэйшая школа, 1995.
8. Промышленные теплотехнологии. Методики и инженерные расчеты оборудования высокотемпературных теплотехнологий машиностроительного и metallургияческого производства: учебник / Под общ. ред. В.И. Тимошпольского. – Мн.: Вышэйшая школа, 1998.
9. Прибытков, И.А., Левицкий, И.А. Теоретические основы теплотехники. – М.: Издательский центр «Академия», 2004.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Теплофизические свойства некоторых металлов и сплавов

Материал	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	$c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$\frac{Q_{\text{пл}}, \text{кДж}}{\text{кг}}$
Алюминий	2700	209,3	0,896	660,1	358,18
Сплав Al-Cu (5 %)	2800	159,2	0,883	—	—
Сплав Al-Si (13 %)	2660	162,8	0,871	—	—
Олово	7300	66,3	0,222	231,9	58,62
Свинец	11350	35,1	0,126	327,3	23,03
Серебро	10500	418,7	0,234	960,5	104,67
Сурьма	6690	18,8	0,205	630,5	163,29
Цинк	7150	112,8	0,381	419,5	104,67
Медь	8950	393,1	0,385	1083	213,53
Латунь Л-68 (68 % Cu, 32 % Zn)	8520	105,8	0,385	938	—
Бронза (90 % Cu, 10 % Sn)	8660	48,1	0,343	1020	—
Железо	7880	74,4	0,439	1535	267,96
Сталь среднеугле- родистая	7860	51,9	0,486	—	—
Чугун серый	7220	54,5	0,502	—	—

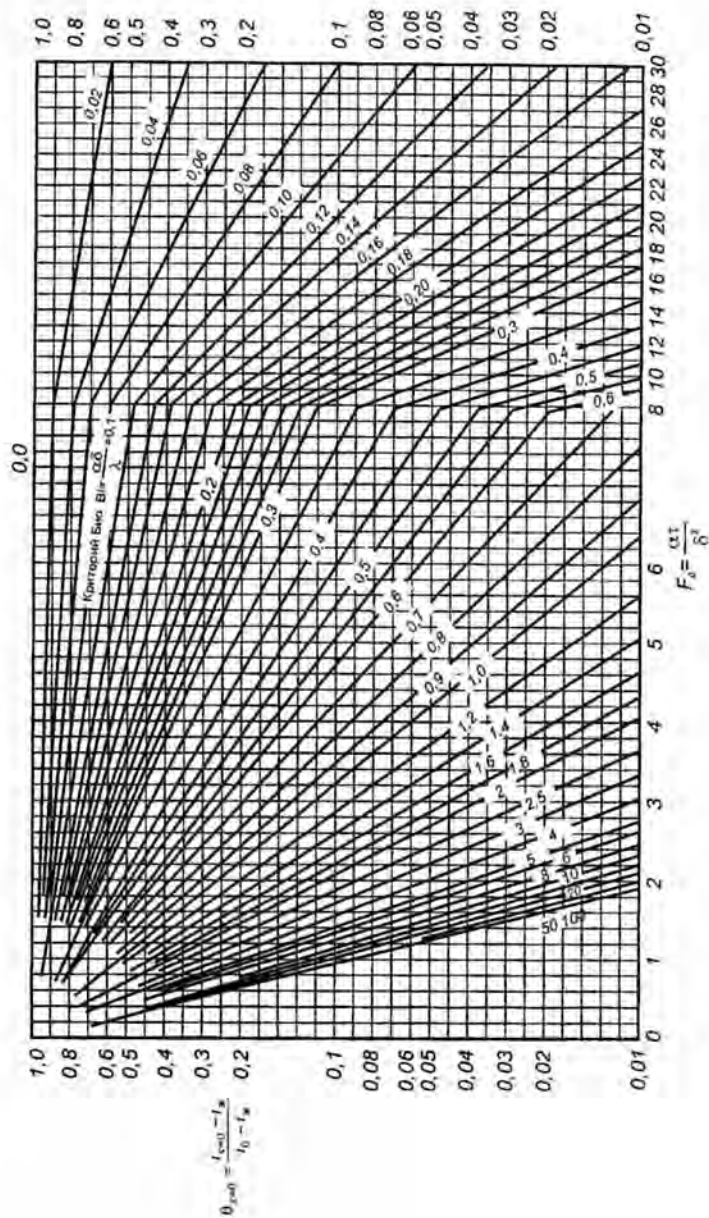
Приложение 2

Теплофизические свойства основных огнеупоров

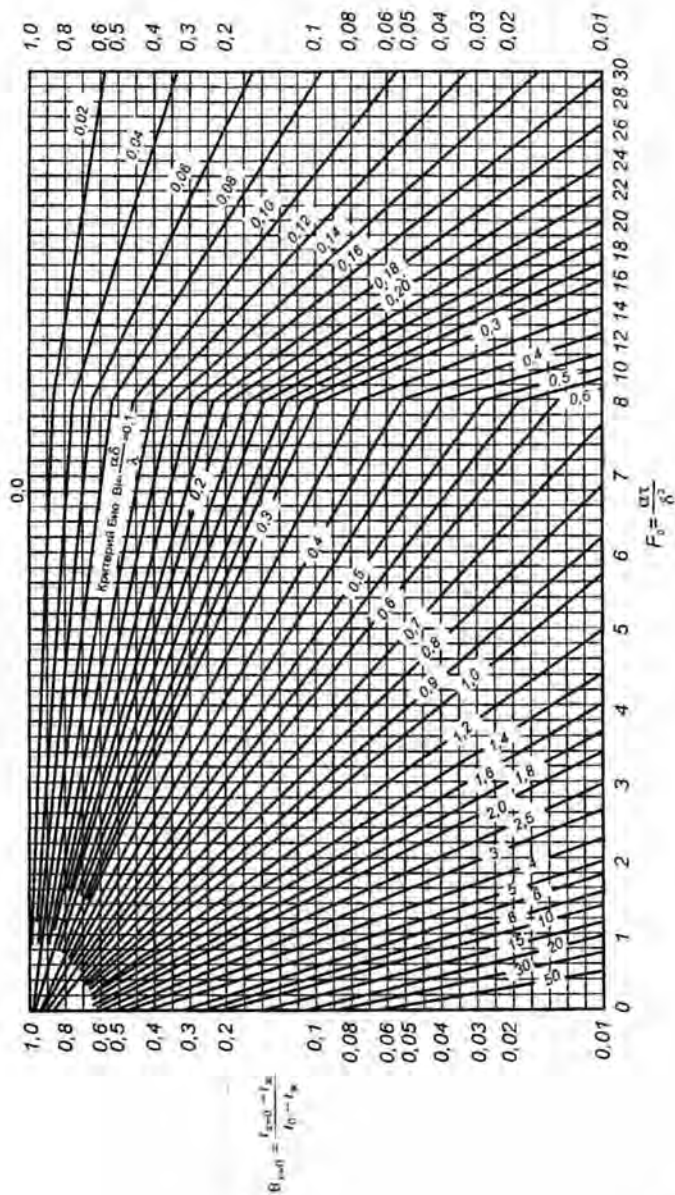
Материал	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{градус}}$	$c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$t, ^\circ\text{C}$
1	2	3	4	5
Асбестовый картон	900	$0,16-0,17 \cdot 10^{-3} t$	0,816	—
Шамотный кирпич	1800...1900	$0,84+0,6 \cdot 10^{-3} t$	$0,88+0,0023 t$	1350...1450
Динасовый кирпич	1900...1930	$0,93+0,7 \cdot 10^{-3} t$	$0,84+0,00025 t$	1700

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Магнезитовый кирпич	2600...2800	$4,65-1,7 \cdot 10^{-3} t$	$1,05+0,0003 t$	1650...1700
Хромомагнезитовый кирпич	2750...2850	1,86 –1,98	–	1700
Хромитовый кирпич	3000...3200	$1,3+0,41 \cdot 10^{-3} t$	$0,8+0,0003 t$	1650...1700
Пеношамот	950	$0,28+0,23 \cdot 10^{-3} t$	–	1350
Ультралегковес	300	$0,08+0,3 \cdot 10^{-3} t$	–	1100

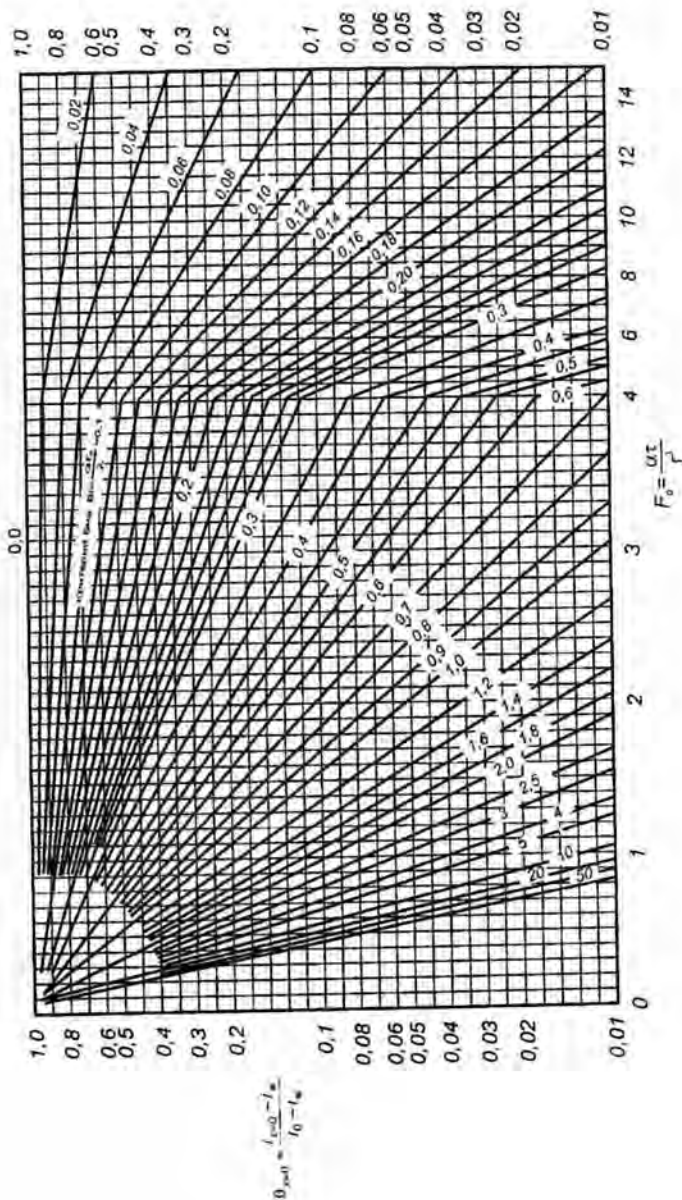
Зависимость безразмерной температуры от критериев Bi и Fo для середины тонкой пластины



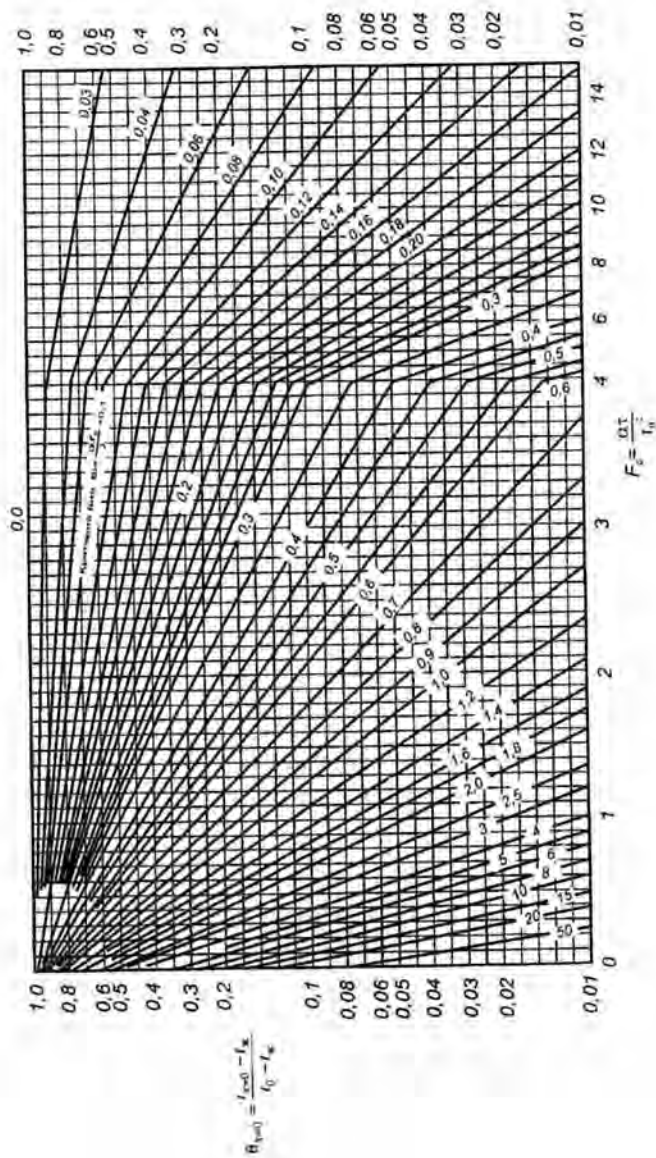
Зависимость безразмерной температуры от критериев Bi и Fo для поверхности тонкой пластины



Зависимость безразмерной температуры от критериев Bi и Fo для оси цилиндра



Зависимость безразмерной температуры от критериев Bi и Fo для поверхности цилиндра



Учебное издание

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ПРИ НАГРЕВЕ ТЕЛ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Лабораторная работа
по дисциплине «Металлургическая теплотехника
и теплоэнергетика»

для студентов специальностей

1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов давлением»,

1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства»,

1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка»,

1-42 01 02 «Порошковая металлургия,
композиционные материалы, покрытия»

Составители:

ТИМОШПОЛЬСКИЙ Владимир Исаакович

ТРУСОВА Ирина Александровна

КАБИШОВ Сергей Михайлович и др.

Редактор Л.Н. Дубовик

Компьютерная верстка О.В. Дубовик

Подписано в печать 05.07.2006.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,2. Уч.-изд. л. 0,9. Тираж 100. Заказ 677.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Независимости, 65.