



Министерство образования  
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

---

Кафедра «Металлургические технологии»

**ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МНОГОСЛОЙНОЙ  
ПЛОСКОЙ СТЕНКИ  
ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ**

**Методические указания  
к выполнению лабораторной работы  
по дисциплине «Металлургическая теплотехника  
и теплоэнергетика»**

Минск 2006

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Металлургические технологии»

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛОСКОЙ  
СТЕНКИ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы  
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»

М и н с к 2 0 0 6

УДК 669.045(076.5)

ББК 34.3я7

Т 34

Составители:

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

Рецензенты:

Д.М. Кукуй, И.М. Шиманович

Лабораторная работа предназначена для закрепления и углубления теоретических знаний, полученных при изучении лекционного материала по дисциплине «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 при выполнении лабораторной работы 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, обязан перед началом каждой лабораторной работы 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 обязаны ознакомиться с работой лабораторного оборудования по настоящему практикуму и соответствующим инструкциям.

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 процесс теплопроводности при стационарном режиме, построить температурное поле многослойной плоской стенки.

### Теоретическая часть

**Теплопроводность** – процесс передачи теплоты от одной части тела к другой или от одного тела к другому, находящемуся в соприкосновении с первым, обусловленный разностью температур. В газах теплота переносится в результате хаотического движения молекул, в диэлектриках – упругими волнами, в металлах – в результате движения свободных электронов.

**Количество теплоты  $Q^*$**  (Дж), проходящее через какую-либо поверхность, нормальную к вектору градиента температуры  $\text{grad } t$ , пропорционально его величине, площади поверхности  $F$ , времени  $\tau$  и коэффициенту пропорциональности  $\lambda$ , характеризующему физические свойства тела:

$$Q^* = -\lambda F \tau \text{grad } t. \quad (1)$$

Уравнение (1) является выражением основного закона теплопроводности – закона Фурье. Закон Фурье можно представить и в таком виде:

$$Q = \frac{Q^*}{\tau} = -\lambda F \text{grad } t;$$

$$q = \frac{Q^*}{F \tau} = -\lambda \text{grad } t.$$

Величины  $Q$  и  $q$  называются соответственно **тепловым потоком** (Вт) и **удельным тепловым потоком** (Вт/м<sup>2</sup>); величина  $\lambda$  – коэффициентом теплопроводности  $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}\right)$ .

Таким образом, **коэффициент теплопроводности** – это мощность, проходящая через площадку в 1 м<sup>2</sup> при градиенте температуры 1 К/м. Он является физическим параметром вещества, характеризует его способность проводить теплоту и зависит от температуры, а для газов – также и от давления. Значения коэффициентов теплопроводности для различных веществ приведены в справочниках.

Коэффициент теплопроводности металлов достаточно высок  $\left(5 \dots 385 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}\right)$ , с увеличением температуры коэффициент теплопроводности большинства металлов уменьшается. Коэффициент теплопроводности сплавов меньше коэффициента теплопроводности чистых металлов.

Коэффициенты теплопроводности неметаллических твердых материалов ниже, чем металлов  $\left(0,15 \dots 19 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}\right)$ . С увеличением температуры коэффициент теплопроводности неметаллических материалов, как правило, возрастает.

Коэффициенты теплопроводности газов и жидкостей при нормальных условиях весьма низкие. Коэффициент теплопроводности газов с температурой значительно возрастает. При нормальной температуре он составляет  $1,75 \cdot 10^{-2} \dots 0,16 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

Коэффициент теплопроводности жидкостей убывает с температурой (исключение составляют вода и глицерин). При нормальной температуре коэффициент теплопроводности жидкостей изменяется в пределах  $0,13 \dots 0,28 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

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, остаются постоянными во времени, т. е. в этом случае температура является функцией лишь пространственных координат:  $T = T(x, y, z)$ . Такое температурное поле называется **стационарным**.

Если температурное поле является не только функцией координат, но и времени, т. е.  $T = T(x, y, z, \tau)$ , то имеет место **нестационарное температурное поле**.

Как отмечено выше, коэффициент теплопроводности зависит от температуры. Но учет этой зависимости приводит к нелинейным дифференциальным уравнениям теплопроводности, которые в большинстве случаев не имеют решения. Поэтому на практике в каждом конкретном случае используют среднее для данного температурного интервала значение коэффициента теплопроводности.

Рассмотрим стенку, размеры которой значительно превышают толщину  $s$  (рис. 1). Площадь, через которую проходит тепловой поток, постоянна; коэффициент теплопроводности также постоянен. Температуры  $t_1$  и  $t_2$  на наружных поверхностях стенки известны и постоянны. Так как разность температур наблюдается только в направлении оси  $x$ , тепловой поток направлен также вдоль оси  $x$ . Возьмем произвольное сечение  $a$ , параллельное наружным поверхностям стенки. Тепловые потоки, проходящие через левую поверхность и сечения  $a$ , должны быть одинаковыми, иначе количество теплоты между этими поверхностями изменится, что приведет к изменению температуры и нарушению стационарности. Так как координата  $a$  произвольная, тепловой поток вдоль оси  $x$  постоянен. Применяя закон Фурье

$$\frac{\partial t}{\partial x} = - \frac{Q}{\lambda \cdot F} = \text{const},$$



после преобразования получим

$$Q = \frac{\lambda F}{s}(t_1 - t_2).$$

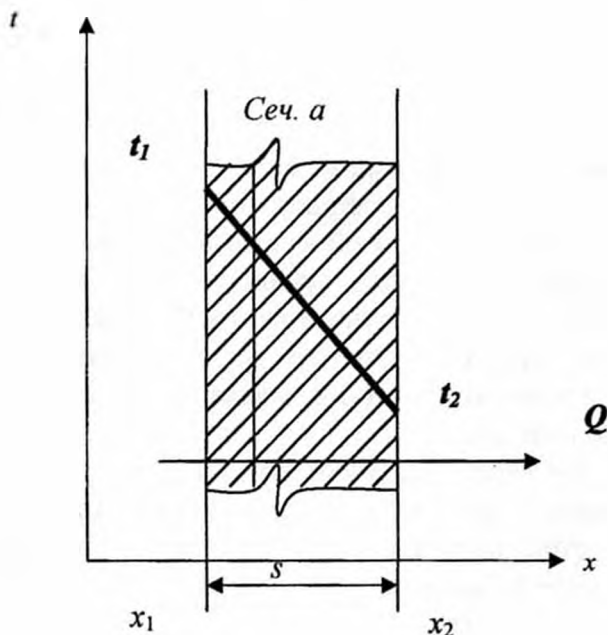


Рис. 1. Распределение температур в однослойной плоской стенке

Величина  $\frac{s}{\lambda F} = R$  называется **тепловым сопротивлением** стенки и выражается в К/Вт – это разность температур, необходимая для того, чтобы обеспечить прохождение через данную поверхность теплового потока в 1 Вт.

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{R}$$

Величина удельного теплового потока через плоскую стенку определяется по формуле

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{\lambda}{s}(t_1 - t_2). \quad (2)$$

Рассмотрим стенку, состоящую из нескольких слоев, прилегающих друг к другу с идеальным термическим контактом так, что температура соприкасающихся поверхностей одинакова (рис. 2). Температуры  $t_1$  и  $t_4$  на наружных поверхностях стенки известны и постоянны.

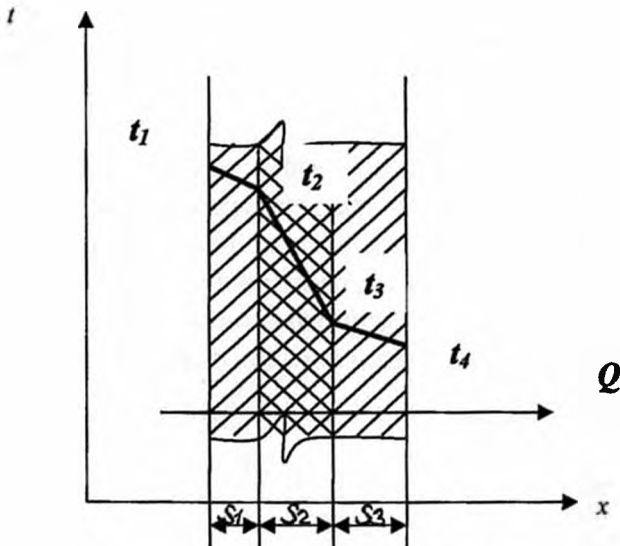


Рис. 2. Распределение температур в многослойной плоской стенке

Тепловые потоки, направленные вдоль оси  $x$ , одинаковы.

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q.$$

Для каждого отдельного слоя запишем

$$t_1 - t_2 = QR_{12};$$

$$t_2 - t_3 = QR_{23}; \quad (3)$$

$$t_3 - t_4 = QR_{34}.$$

Для всей стенки имеем

$$Q = \frac{t_1 - t_4}{R_{12} + R_{23} + R_{34}} = \frac{(t_1 - t_4)F}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3}}.$$

Так как при постоянных коэффициентах теплопроводности  $\lambda$  в пределах каждого слоя температура изменяется по прямой, для стенки в целом распределение температур представляет собой ломаную линию. Перепады температур в слоях пропорциональны их тепловым сопротивлениям.

Величина удельного теплового потока через многослойную плоскую стенку

$$q = \frac{(t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i}}, \quad (4)$$

где  $n$  – число слоев.

## Порядок выполнения работы

1. Включить лабораторную печь, дверца которой представляет собой многослойную стенку, состоящую из следующих слоев: ультралегковес, асбест, сталь. Измерительная схема состоит из термопар и многоточечного потенциометра. На внешней и внутренней поверхностях заслонки и между ее слоями вмонтировано по термопаре.

2. Печь разогреть до заданной температуры и вывести на стационарный режим. При этом температура во всех точках заслонки остается постоянной во времени.

3. Произвести замеры температур на границах слоев заслонки.

4. Рассчитать среднее значение коэффициента теплопроводности для каждого из слоев по формуле  $\lambda_{\text{ср}} = \lambda_0 + a(T_{\text{ср}})$ .

5. Показания занести в таблицу.

| № слоя          | № термопары | $t_i, ^\circ\text{C}$ | $\delta_i, \text{м}$ | $\frac{\lambda_i, \text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{градус}}$ | $q_i, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ | $q_{\Sigma}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ |
|-----------------|-------------|-----------------------|----------------------|---|-------------------------------------|--|
| I<br>(легковес) |             |                       |                      |   |                                     |  |
| II (асбест)     |             |                       |                      |   |                                     |  |
| III (сталь)     |             |                       |                      |   |                                     |  |

6. Рассчитать величину удельного теплового потока, проходящего через многослойную плоскую стенку по формуле (4) и через каждый слой по формуле (2). Полученные результаты занести в таблицу и сравнить.

7. Вычислить температуры поверхностей отдельных слоев по формулам (3) и сравнить со значениями, полученными опытным путем.

8. Построить температурное поле многослойной плоской заслонки.

9. Определить температурный градиент в каждом слое заслонки.

### **Содержание отчета**

Общие сведения о теплообмене теплопроводностью, понятие коэффициента теплопроводности. Расчет теплопроводности плоской стенки при стационарном режиме. Описание методики проведения эксперимента. Эскиз стенки с расположенными термопарами. Результаты опытов в виде таблиц, расчетов, графиков. Выводы.

### **Литература**

1. Металлургическая теплотехника: учебник для вузов. В 2 т. / В.А. Кривандин [и др.]. – М.: Metallurgy, 1986.
2. Арутюнов, В.А., Миткалинный, В.И., Старк, С.Б. Металлургическая теплотехника. В 2 т. – М.: Metallurgy, 1974.
3. Исаченко, В.П., Осипова, В.А., Сукомел, А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981.
4. Кривандин, В.А., Марков, Б.Л. Металлургические печи. – М.: Metallurgy, 1977.
5. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В.И. Тимошпольский [и др.]; под общ. ред. В.И. Тимошпольского. – Мн.: Вышэйшая школа, 1992.
6. Прибытков, И.А., Левицкий, И.А. Теоретические основы теплотехники. – М.: Издательский центр «Академия», 2004.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Теплофизические свойства основных огнеупоров

| Материал                 | $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{градус}}$ | $c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ | $t, ^\circ\text{C}$ |
|--------------------------|--------------------------------------|---|--|---------------------|
| 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                |
| 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                |

### Приложение 2

#### Теплофизические свойства некоторых металлов и сплавов

| Материал                       | $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$ | $c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ | $t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$ | $Q_{\text{пл}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ |
|--------------------------------|--------------------------------------|--|--|---------------------------------|---|
| 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 среднеуглеродистая       | 7860                                 | 51,9   | 0,486  | —                               | —   |
| Чугун серый                    | 7220                                 | 54,5   | 0,502  | —                               | —   |

Учебное издание

**ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛОСКОЙ СТЕНКИ  
ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы  
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 А.Г. Гармазы

---

Подписано в печать 29.06.2006.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 0,8. Уч.-изд. л. 0,6. Тираж 100. Заказ 679.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский национальный технический университет.  
ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.  
220013, Минск, проспект Независимости, 65.