



Министерство образования  
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

---

Кафедра «Металлургические технологии»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННОГО  
КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ  
И СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ  
ТВЕРДОГО ТЕЛА**

*Методические указания*

Минск 2007

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Металлургические технологии»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА  
ИЗЛУЧЕНИЯ И СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ТВЕРДОГО ТЕЛА

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»

Минск 2007

УДК 621.745  
ББК 34.3я7  
О 62

Составители:

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

Рецензенты:

А.Г. Слуцкий, И.М. Шиманович

Методические указания к выполнению лабораторной работы предназначены 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 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 явление переноса теплоты излучением, определить приведенный коэффициент излучения и степень черноты образца, построить график зависимости  $\varepsilon = f(t)$ .

### Теоретическая часть

**Излучение** – это процесс распространения электромагнитных волн, испускаемых телом при преобразовании внутренней энергии тела в результате внутримолекулярных и внутриатомных возмущений в лучистый поток.

Суммарный процесс теплообмена излучением между двумя телами состоит из трех последовательных процессов: превращение тепловой энергии первого тела в энергию электромагнитных волн; перенос энергии в пространстве в виде электромагнитных волн от одного тела к другому; при попадании тепловых лучей на второе тело их энергия частично поглощается им, снова превращаясь во внутреннюю. Таким образом, процесс теплообмена излучением включает в себя как процесс превращения энергии, так и процесс переноса энергии в пространстве.

Источниками электромагнитных волн являются заряженные частицы, т.е. электроны и ионы, входящие в состав вещества.

В процессе теплообмена излучением два тела могут обмениваться теплотой, если они отделены друг от друга в пространстве или даже если между ними абсолютный вакуум. Особенностью теплообмена излучением является и то, что два тела обмениваются теплотой и в том случае, если их температуры одинаковы.

Электромагнитные волны характеризуются длиной волны  $\lambda$  и частотой колебания  $\nu \left( \nu = \frac{c}{\lambda} \right)$ . Диапазон длин волн при излучении от 0,02 мкм до 400 мкм, при этом ультрафиолетовые находятся в диапазоне 0,02...0,4 мкм; световые – 0,4...0,76 мкм; инфракрасные – 0,76...1000 мкм.

*Излучение свойственно любому телу при условии, что его температура отлична от абсолютного нуля. Чем выше температура тела, тем больше его тепловое излучение.*

Суммарное излучение, испускаемое телом по всему спектру (от  $\lambda = 0$  до  $\lambda = \infty$ ), называют **интегральным**. Излучение, испускаемое при определенной длине волны или в узком диапазоне длин волн, называют **монохроматическим**.

В зависимости от направления излучения различают сферическое и направленное излучение. Все реальные тела излучают энергию по всем направлениям сферы (полусферы). Излучение, рассматриваемое в каком-либо одном направлении, называется направленным.

**Потоком энергии излучения  $Q$**  называется количество теплоты, переносимое через некоторую поверхность  $F$ ,  $m^2$ , за единицу времени по всем направлениям полусферы, Вт.

**Плотностью потока энергии излучения  $q$**  называется количество теплоты, которое переносится через единицу поверхности  $F$ ,  $m^2$ , в единицу времени по всем направлениям полусферы, Вт/ $m^2$ .

Излучение, которое определяется температурой тела, называется **собственным излучением  $Q_{\text{соб}}$** .

Обычно тело участвует в лучистом теплообмене с другими телами. Энергия излучения других тел, попадая на поверхность данного тела извне, частично поглощается, частично отражается, а часть ее проходит сквозь тело.

Часть падающей энергии излучения, поглощенной данным телом, называется **потоком поглощенного излучения  $Q_{\text{погл}}$** . При поглощении лучистая энергия вновь превращается во внутреннюю энергию тела (рис. 1).

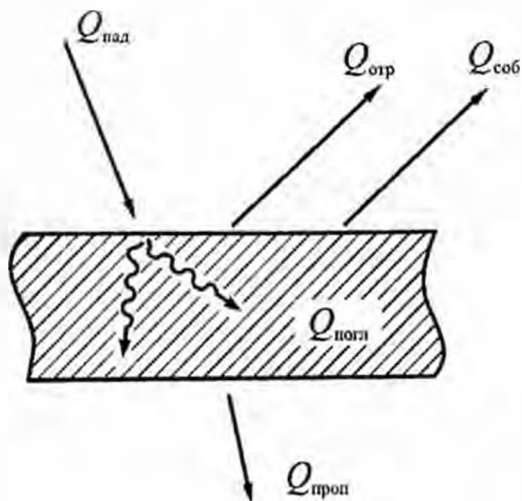


Рис. 1. Потoki энергии излучения:

$Q_{\text{пад}}$  – падающий;  $Q_{\text{отр}}$  – отраженный;  $Q_{\text{соб}}$  – собственный;  
 $Q_{\text{погл}}$  – поглощенный;  $Q_{\text{проп}}$  – пропущенный

Часть падающей энергии, которую поверхность данного тела отражает обратно окружающим его телам, называется **потоком отраженного излучения**  $Q_{\text{отр}}$

Часть падающей энергии излучения, проходящей сквозь тело, называется **плотностью потока пропускаемого излучения**  $Q_{\text{проп}}$

Если на тело падает тепловой поток  $Q_{\text{пад}}$ , то имеем

$$Q_{\text{пад}} = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{проп}} + Q_{\text{отр}}.$$

Тело, поглощающее все падающее на него излучение, называется **абсолютно черным телом**. Тело, которое отражает все падающее на него излучение, – **абсолютно белым**. Абсолютно черных и белых тел в природе не существует, однако эти понятия играют чрезвычайно важную роль в теории теплового излучения. Наиболее близки к абсолютно черному те-



лу сажа, снег, бархат ( $A = 0,97 \dots 0,98$ ); к абсолютно белому телу – полированные металлы ( $R = 0,97$ ) (прил. 1). Тела, которые пропускают всю падающую на них энергию, ничего не отражая и не поглощая, называются *прозрачными*.

Для реальных тел характерны частичное поглощение и частичное отражение тепловой лучистой энергии. В теории теплового излучения их называют *серыми телами*.

Суммарная плотность потоков собственного и отраженного излучения, испускаемого поверхностью данного тела, называется *плотностью эффективного излучения*

$$Q_{\text{эф}} = Q_{\text{соб}} + Q_{\text{отр}}.$$

Эффективное излучение зависит не только от физических свойств и температуры данного тела, но и от физических свойств и температуры окружающих его тел.

*Результирующее излучение* представляет собой разность между лучистым потоком, получаемым данным телом, и лучистым потоком, который оно посылает в окружающее пространство:

$$Q_{\text{рез}} = Q_{\text{эф}} - Q_{\text{пад}}.$$

**Закон Стефана–Больцмана.** Закон устанавливает зависимость поверхностной интегральной плотности потока энергии собственного полусферического излучения абсолютно черного тела от температуры

$$q_0 = \sigma_0 T^4,$$

где  $q_0$  – плотность теплового потока абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>;

$\sigma_0$  – постоянная Стефана–Больцмана, равная  $5,6686 \times 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Согласно закону величина поверхностной интегральной плотности потока энергии собственного излучения абсолютно черного тела определяется только температурой тела и изменяется пропорционально температуре в четвертой степени.

Закон Стефана–Больцмана записывают также в виде

$$q_0 = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4,$$

где  $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Поскольку излучение серого, т.е. реального, тела характеризуется тем, что его интенсивность составляет некоторую долю от интенсивности излучения абсолютно черного тела, используют понятие степени черноты. *Степень черноты* – это отношение поверхностной плотности потока собственного излучения серого тела к поверхностной плотности потока интегрального излучения абсолютно черного тела при одной и той же температуре. Степень черноты определяют так же, как отношение излучательной способности серого тела к излучательной способности черного тела:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_0}$$

С учетом этого закон Стефана–Больцмана для серого тела имеет вид

$$q = \varepsilon C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 = \varepsilon \sigma_0 T^4 = C \left( \frac{T}{100} \right)^4,$$

где  $C = \varepsilon C_0$  – коэффициент излучения реального тела.

Степень черноты относится к важнейшим радиационным характеристикам и характеризует способность тел поглощать и испускать энергию излучения. Степень черноты зависит от природы тела, температуры, состояния поверхности тела, а для металлов – и от степени окисления поверхности и может изменяться от 0 до значений, близких, но меньших единицы. Величина этого коэффициента в большинстве случаев определяется экспериментальным путем.

Связь между излучательной и поглощательной способностями устанавливает **закон Кирхгофа**: отношение излучательной способности серого тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел, находящихся при одинаковой температуре, и равно излучательной способности абсолютно черного тела при той же температуре:

$$\frac{q}{A} = \frac{q_1}{A_1} = \frac{q_2}{A_2} = \dots = q_0 = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4.$$

Из закона следует, что

$$q = AC_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4.$$

**Поглощательная способность  $A$**  численно равна степени черноты тела, т.е. степень черноты характеризует как излучательную, так и поглощательную способность.

Из закона Кирхгофа следует важный вывод: если тело мало поглощает, то оно мало излучает. Для абсолютно черного тела  $A = 1$ , поэтому абсолютно черное тело не только поглощает всю падающую на него энергию, но и максимально излучает.

Для учета формы, размеров и взаимного расположения поверхностей, составляющих систему теплообмена, используется понятие углового коэффициента излучения. Угловой коэф-

коэффициент безразмерен, по абсолютной величине изменяется от 0 до 1. В системе из  $n$  поверхностей обозначается как  $\varphi_{ik}$  или  $\varphi_{ki}$ , где  $i = 1, 2, 3, \dots, k, \dots, n$ .

**Угловой коэффициент** показывает, какая часть полусферического лучистого потока, уходящего, например, с поверхности 1, попадает на произвольно расположенную поверхность 2.

$$\varphi_{12} = \frac{Q_{\text{пад}}^{12}}{Q^1} = \frac{1}{F_1} \int \int_{F_1 F_2} \frac{1}{\pi l^2} \cos \beta_1 \cos \beta_2 dF_1 dF_2,$$

где  $Q_{\text{пад}}^{12}$  – тепловой поток, падающий с поверхности 1 на поверхность 2;

$Q^1$  – тепловой поток, излучаемый поверхностью 1 в полусферу;

$F_1, F_2$  – площади поверхностей;

$l$  – расстояние между поверхностями;

$\beta_1, \beta_2$  – углы между направлением потока и нормалью к площадке.

Аналогично записывается угловой коэффициент, определяющий долю излучения с поверхности 2 на 1:

$$\varphi_{21} = \frac{1}{F_2} \int \int_{F_1 F_2} \frac{1}{\pi l^2} \cos \beta_1 \cos \beta_2 dF_1 dF_2.$$

Угловые коэффициенты связаны между собой определенными соотношениями.

**Свойство взаимности.** Это свойство вытекает из определения средних угловых коэффициентов. Если в теплообмене участвуют две поверхности  $F_1$  и  $F_2$ , то выполняется равенство

$$F_1\varphi_{12} = F_2\varphi_{21}.$$

**Свойство невогнутости.** Свойство справедливо только для невогнутых, т.е. плоских,  $F_1$  и выпуклых поверхностей  $F_2$  (рис. 2).

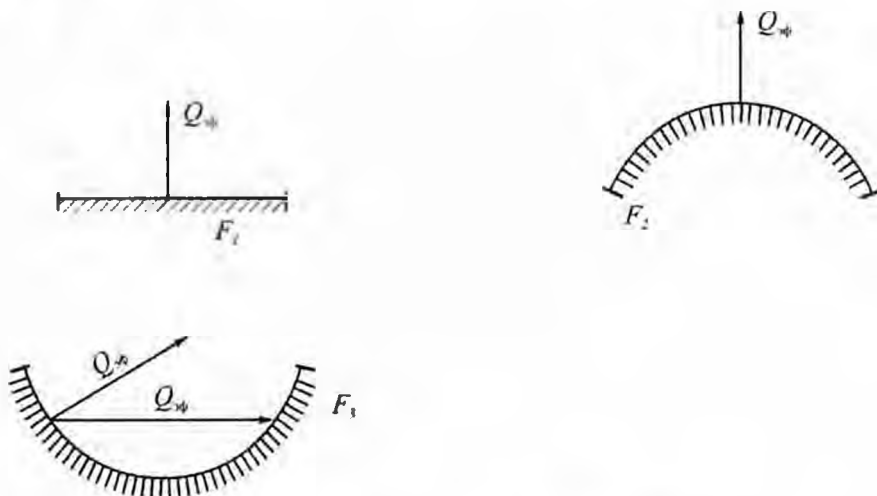


Рис. 2. Виды излучающих поверхностей:  
 $F_1$  – плоская;  $F_2$  – выпуклая;  $F_3$  – вогнутая;  
 $Q_\phi$  – эффективный поток энергии

Данное свойство означает, что плоское или выпуклое тело не может излучать само на себя, т.е. эффективный поток, уходящий с поверхностей  $F_1$  и  $F_2$  прямым образом (в отсутствии других поверхностей, от которых он мог бы отразиться) не может попасть на эти же поверхности:

$$\varphi_{ii} = 0.$$

**Свойство замыкаемости.** Это свойство справедливо только для замкнутых систем, т.е. таких систем, из которых энергия не выходит в окружающую среду и в систему из окружающей среды не поступает (рис. 3).

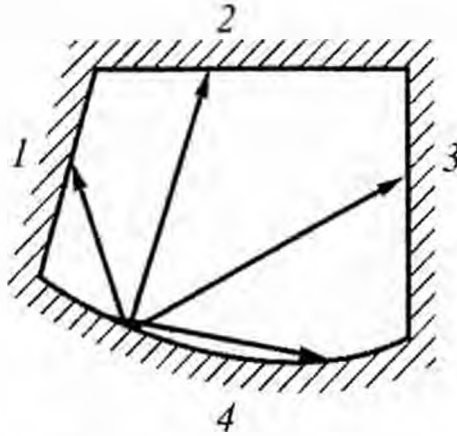


Рис. 3. Схема излучения поверхности в замкнутой системе:  
1, 2, 3, 4 – поверхности

Сумма угловых коэффициентов для замкнутой системы равна единице. В общем случае для системы из  $n$  поверхностей

$$\sum_{k=1}^n \varphi_{ik} = 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, k, \dots, n.$$

Например, для замкнутой системы, приведенной на рис. 3:

$$\varphi_{12} + \varphi_{13} + \varphi_{14} = 1 \quad \text{или} \quad \varphi_{41} + \varphi_{42} + \varphi_{43} + \varphi_{44} = 1.$$

**Свойство заменяемости.** Если между двумя поверхностями  $F_1$  и  $F_3$  расположить третье непрозрачное тело с поверхностью  $F_2$ , которое полностью препятствует прямому обмену энергией между  $F_1$  и  $F_3$ , то

$$\varphi_{13} = 0; \quad \varphi_{31} = 0.$$

**Свойство аддитивности.** Если рассматривается теплообмен излучением между поверхностью  $F_1$  и поверхностью  $F_4$ , которая является суммой поверхностей  $F_2$  и  $F_3$ , то выполняется условие

$$\varphi_{14} = \varphi_{12} + \varphi_{13}.$$

Значения угловых коэффициентов для простейших систем (рис. 4):

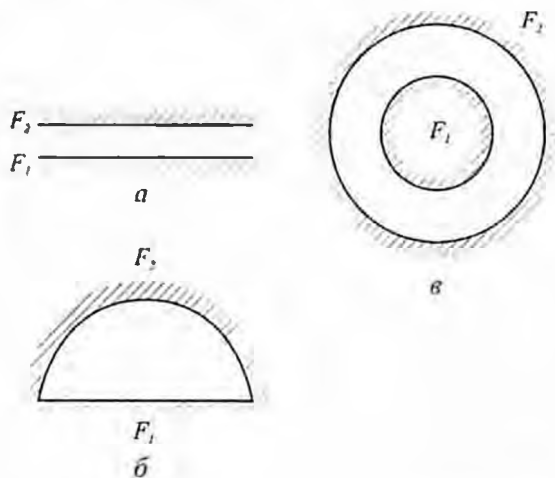


Рис. 4. Примеры простейших замкнутых систем с радиационным теплообменом:

*a* – две бесконечно плоские поверхности; *б* – плоская  $F_1$  и выпуклая  $F_2$  поверхности; *в* – выпуклая  $F_1$  и вогнутая  $F_2$  поверхности

1. Две большие, близко расположенные друг к другу бесконечно параллельные плоскости (рис. 4, *a*):

$$\varphi_{11} = \varphi_{22} = 0; \quad \varphi_{12} = \varphi_{21} = 1.$$

2. Плоская поверхность  $F_1$  замкнута вогнутой поверхностью  $F_2$  (рис. 4, б). Для такой системы  $\varphi_{11} = 0$ ;  $\varphi_{12} = 1$ ;  $F_1\varphi_{12} = F_2\varphi_{21}$ , следовательно

$$\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}; \quad \varphi_{22} = 1 - \frac{F_1}{F_2}.$$

3. Выпуклая поверхность  $F_1$  замкнута вогнутой поверхностью  $F_2$ . Для такой системы получим

$$\varphi_{11} = 0; \quad \varphi_{12} = 1; \quad \varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}; \quad \varphi_{22} = 1 - \frac{F_1}{F_2}.$$

Для простейших систем в случаях, когда плоская поверхность  $F_1$  замкнута вогнутой поверхностью  $F_2$  (рис. 4, б) и выпуклая поверхность  $F_1$  замкнута вогнутой поверхностью  $F_2$  (рис. 4, в), а значения угловых коэффициентов соответственно равны  $\varphi_{12} = 1$ ,  $\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}$ , приведенный коэффициент излучения определяется

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right)} \quad \text{или} \quad \varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \frac{F_1}{F_2}}.$$

### Порядок выполнения работы

1. Включить лабораторную печь и загрузить в печь образец.
2. Измерить силу тока, напряжение, температуру печи.



3. После стабилизации температуры печи произвести измерение температуры поверхности образца каждую минуту, занести результаты измерений в табл. 1.

Таблица 1

$\tau, \text{с}$									
$T_{\text{пов}}, \text{°C}$									

4. Построить график зависимости  $T = f(\tau)$ .

5. Определить приведенный коэффициент излучения образца.

6. По формуле

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \frac{F_1}{F_2}}$$

определить степень черноты образца.

7. Построить график зависимости  $\varepsilon = f(T_{\text{пов}})$ .

### Содержание отчета

Общие сведения о лучистом теплообмене. Описание методики проведения эксперимента. Эскиз лабораторной установки с размерами. Результаты опытов в виде таблиц, расчетов, графиков. Выводы.

## Литература

1. Теплотехника металлургического производства: учебник для вузов. В 2 т. / В.А. Кривандин [и др.]. – М.: МИСиС, 2002.
2. Арутюнов, В.А., Миткалинский, В.И., Старк, С.Б. Металлургическая теплотехника. В 2 т. – М.: Metallurgia, 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.: Metallurgia, 1977.
5. Теплотехника: учебник для вузов / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высшая школа, 2005.
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. – Минск: Вышэйшая школа, 1992.
7. Прибытков, И.А., Левицкий, И.А. Теоретические основы теплотехники. – М.: Издательский центр «Академия», 2004.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Коэффициент теплового излучения различных материалов

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\epsilon$
Алюминий		
полированный	225-575	0,039-0,057
шероховатый	26	0,055
окисленный при 600 °С	200-600	0,11-0,19
Вольфрам	230-2230	0,053-0,31
Железо		
полированное	425-1020	0,14-0,377
литое необработанное	925-1115	0,87-0,95
Сталь		
листовая шлифованная	940-1100	0,52-0,61
окисленная при 600 °С	200-600	0,79
окисленная шероховатая	40-370	0,94-0,97
Чугун		
полированный	200	0,21
окисленный при 600 °С	200-600	0,64-0,78
шероховатый, сильно окисленный	40-250	0,96
Золото полированное	225-625	0,018-0,035
Латунь		
полированная	245-355	0,028-0,031
прокатанная	22	0,06
окисленная при 600 °С	200-600	0,61
Медь		
полированная	115	0,023
окисленная при 600 °С	200-600	0,57
Асбестовый картон	24	0,96
Динасовый кирпич шероховатый		
неглазурованный	1000	0,8
глазурованный	1100	0,85
Шамотный кирпич глазурованный	1100	0,75
Фарфор глазурованный	22	0,92
Сажа, слой 0,075 мм и толще	40-370	0,95

Учебное издание

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ И СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ТВЕРДОГО ТЕЛА

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 материалообработка»,

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

Составители:

ТИМОШПОЛЬСКИЙ Владимир Исаакович

ТРУСОВА Ирина Александровна

КЛИМОВИЧ Галина Анатольевна и др.

Редактор Н.В. Артюшевская

Компьютерная верстка А.Г. Гармазы

---

Подписано в печать 29.05.2007.

Формат 60 x 84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,10. Уч.-изд. л. 0,86. Тираж 100. Заказ 158.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Независимости, 65.