



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Металлургические технологии»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛООТДАЧИ
ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ МЕТАЛЛА
В СЛУЧАЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ
КОНВЕКЦИИ**

Методические указания

Минск 2007

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Металлургические технологии»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ
ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ МЕТАЛЛА
В СЛУЧАЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

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 7

УДК 669.045
ББК 34.3я7
О 62

Составители:

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

Рецензенты:

Б.М. Немененок, П.С. Гринчук

Методические указания к выполнению лабораторной работы предназначены 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: определить значение коэффициента теплоотдачи и зависимость коэффициента теплоотдачи при охлаждении металлической заготовки от температуры $\alpha = f(t)$, а также сравнить значение теплоотдачи конвекцией и излучением.

Теоретическая часть

Основным процессом, происходящим при охлаждении металла, является процесс передачи теплоты с поверхности охлаждаемого тела в окружающее пространство. Такая передача теплоты может происходить с помощью конвекции и лучеиспускания.

Если перенос теплоты осуществляется в движущейся жидкости или газе за счет перемещения макрообъемов среды, то такой процесс называют *конвективным переносом*. Сущность процесса конвективного теплообмена состоит в том, что теплота переносится вследствие движения частиц среды, т.е. молекулы движущейся среды, соприкасаясь с телом, передают либо отнимают от его поверхности теплоту в зависимости от температур среды и тела. То есть передача теплоты конвекцией тесно связана с характером движения этих частиц и совершается между поверхностью твердого тела и окружающей средой (жидкостью или газом).

Чтобы привести жидкость в движение, к ней необходимо приложить силу. Силы, действующие на какой-либо элемент жидкости, можно разделить на массовые и поверхностные.

Массовыми называют силы, приложенные ко всем частям жидкости и обусловленные внешними силовыми полями (например, гравитационным или электрическим). *Поверхностные* силы возникают вследствие действия окружающей жидкости или твердых тел, они приложены к поверхности контрольного объема жидкости. Такими силами являются силы внешнего давления и силы трения.

В зависимости от причины, которой обусловлено движение жидкости или газа, различают вынужденную и свободную (естественную) конвекцию.

Вынужденная конвекция происходит под действием внешних поверхностных сил, за счет предварительно сообщенной кинетической энергии, например, действием вентилятора, насоса, компрессора и т.д.

Свободная конвекция обусловлена самим процессом тепло- или массообмена, а именно за счет неоднородности в нем массовых сил. Если в жидкости имеется неоднородное распределение температур, следовательно, имеет место неоднородность поля плотности, то возникает свободное гравитационное движение. Вынужденное движение в общем случае может сопровождаться свободным. Относительное влияние последнего тем больше, чем больше разность температур отдельных частиц среды и чем меньше скорость вынужденного движения.

Плотность теплового потока на поверхности при конвективном теплообмене существенно зависит от скорости и направления движения жидкости или газа, а также от режима давления. Кроме того, плотность теплового потока зависит от температур поверхности и жидкости, от физических свойств жидкости (прежде всего от коэффициента теплопроводности жидкости), от формы и качества поверхности твердого тела. Процесс конвективной теплоотдачи и величина плотности потока массы определяются, помимо указанных факторов, концентрациями (или парциальными плотностями) переносимой примеси на поверхности и в жидкости.

Для описания процессов конвективной тепло- и массоотдачи используют формулу Ньютона (для теплоотдачи):

$$q = \alpha(t_{\text{ср}} - t_{\text{пов}}), \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, зависящий от конкретных условий процесса теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи есть плотность теплового потока на границе жидкости (газа) и соприкасающегося тела, отнесенная к разности температур поверхности и окружающей среды. Численное его значение равно тепловому потоку, Вт, от единичной поверхности теплообмена, м², при разности температур поверхности и жидкости в 1 К в единицу времени $[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}]$.

Коэффициент теплоотдачи зависит от большого количества факторов. В общем случае α является функцией формы и размеров тела, режима движения и скорости жидкости, температуры жидкости и тела, физических параметров жидкости и др.

Так как сложный процесс конвективного теплообмена описывается простым уравнением (1), то основной задачей является определение коэффициента теплоотдачи α . Как правило, коэффициент теплоотдачи определяется из критериальных уравнений, полученных в результате анализа и обработки большого числа экспериментальных данных.

Для определения коэффициента теплоотдачи используют **критерий Нуссельта**:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda} = \frac{\alpha}{\lambda / l},$$

где l – характерный размер тела, омываемого конвективным потоком.

Критерий Нуссельта представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи и характеризует связь между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем вблизи нагреваемой (охлаждаемой) поверхности, т.е. характеризует передачу теплоты от окружающей среды к поверхности тел.

Поскольку конвекция обязательно связана с движением жидкости (газа), которое может быть вынужденным или свободным, в случае свободного движения используется **критерий Грасгофа**:

$$Gr = \beta \frac{g l^3}{\nu^2} \Delta t,$$

где $\beta = \frac{\rho - \rho_0}{\rho}$ – коэффициент объемного расширения;

g – ускорение силы тяжести;

Δt – температурный напор:

$$\Delta t = t_n - t_c;$$

ν – коэффициент кинематической вязкости;

l – линейный масштаб.

Критерий Грасгофа характеризует меру отношения подъемной силы, возникающей вследствие разности плотностей, к силе вязкого трения при свободном движении.

В математическом описании процесса свободной конвекции должны учитываться следующие факторы:

1. Взаимное перемещение объемов жидкости неодинаковой плотности вызывается действием силы тяжести, поэтому необходимо учитывать действие этой силы.

2. Плотность является функцией температуры и определяется

$$\rho = \frac{\rho_n}{1 + \beta(t - t_n)},$$

где β – коэффициент линейного расширения;

t_n – параметрическое значение температуры, т.е. на значительном удалении от стенки;

ρ_n – плотность при параметрической температуре.

3. При свободной конвекции границей системы считают поверхность теплообмена и неподвижную жидкость на таком удалении от этой поверхности, где ее действие не сказывается

(т.е. теоретически на бесконечном удалении). В этом случае скорость жидкости на границе равна нулю.

Расчетная формула для определения коэффициента теплоотдачи при расположении нагреваемого или охлаждаемого тела в неограниченном объеме в критериальном виде записывается так:

$$Nu_m = C(Gr \cdot Pr)_m^n, \quad (2)$$

где Gr – критерий Грасгофа;

Pr – критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a};$$

ν – кинематический коэффициент вязкости;

a – коэффициент температуропроводности;

C и n – постоянные, связанные с величиной произведения $(Gr \cdot Pr)$ и формой поверхности.

Критерий Прандтля Pr является мерой подобия скоростных и температурных полей. Он состоит из величин, характеризующих теплофизические свойства вещества, и является теплофизической константой вещества. Его значения даны в справочниках.

Значения указанных коэффициентов приведены в табл. 1.

Gr·Pr	$1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2} \dots 2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^{13}$
C	1,18	0,54	0,135
n	1/8	1/4	1/3

Результаты многочисленных опытов с телами различной формы и различными газами и жидкостями отражены на графике, приведенном на рис. 1. Полученную кривую можно разделить на три участка: участок 1 соответствует случаю, когда на поверхности теплообмена образуется почти неподвижная пленка; участок 2 соответствует ламинарному режиму движения среды и участок 3 – турбулентному.

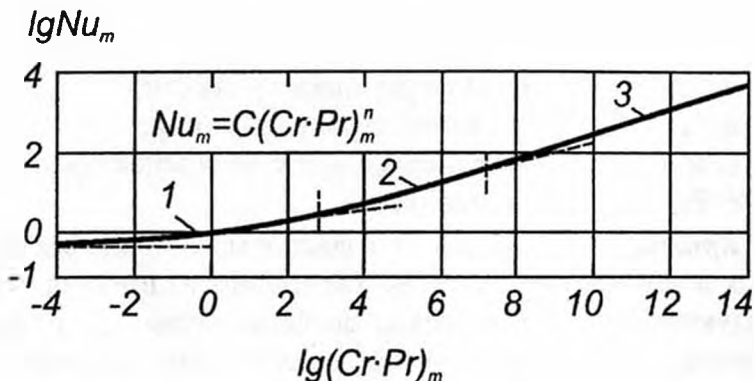


Рис. 1. Теплоотдача различных тел при свободном движении жидкости в неограниченном пространстве

Индекс m означает, что физические параметры или критерии берутся при температуре пограничного слоя, находимой как среднеарифметическое от температуры поверхности тела и окружающей среды, т.е.

$$t_m = \frac{t_n + t_c}{2}.$$

В качестве линейного масштаба l для труб и шаров берут их диаметр d , а для вертикальных плоскостей – их высоту. Для горизонтальных плоских поверхностей в качестве линейного масштаба берут меньший размер поверхности. Если теплоотдающая поверхность обращена вверх, то полученное расчетное значение α увеличивают на 30 %, если теплоотдающая поверхность обращена вниз – уменьшают на 30 %.

Необходимо отметить, что для газов (воздуха) $Pr = \text{const}$, $\frac{Pr_c}{Pr_n} \approx 1$, поэтому критериальные уравнения упрощаются.

При расчете теплоотдачи от наружных поверхностей стенок печей, поверхности охлаждаемого металла к воздуху можно использовать следующую приближенную формулу:

$$\alpha_k = k^4 \sqrt{t_n - t_c},$$

где k – коэффициент, равный для вертикальной поверхности 2,2; для горизонтальной поверхности, обращенной теплоотдающей поверхностью вверх, – 2,8; для горизонтальной поверхности, обращенной теплоотдающей поверхностью вниз, – 1,4.

Если объем жидкости невелик, то свободное движение, возникающее у других тел или частей данного тела, расположенных в этом объеме, может сказываться на рассматриваемом движении жидкости (рис. 2).

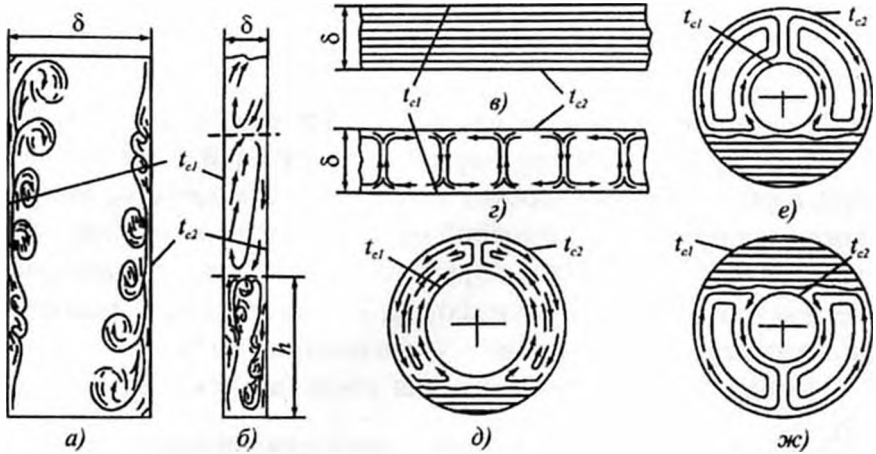


Рис. 2. Свободное движение жидкости в ограниченном объеме:
 а, б – вертикальные щели; в, г – горизонтальные щели; д, ж – шаровые
 и цилиндрические прослойки

При практических расчетах обычно необходимо определить тепловой поток через слой жидкости. В этом случае процесс теплообмена рассматривают как элементарное явление передачи теплоты теплопроводностью, вводя понятие эквивалентного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$, значение которого находят опытным путем.

Средняя плотность теплового потока

$$q = \frac{\Delta \lambda_{\text{экв}}}{\delta} \Delta T.$$

Если эквивалентный коэффициент теплопроводности разделить на действительный коэффициент теплопроводности той же среды при ее средней температуре, то получаем новый коэффициент, который характеризует влияние конвекции и называется *коэффициентом конвекции*.

$$\epsilon_k = \frac{\lambda_{\text{экв}}}{\lambda}$$

Коэффициент ϵ_k является функцией произведения ($Gr \cdot Pr$), т.е. $\epsilon_k = f(Gr \cdot Pr)$. При значениях произведения $Gr \cdot Pr < 1000$ величина $\epsilon_k = 1$. При значениях $Gr \cdot Pr > 1000$ величина $\epsilon_k = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}$.

Теплота, отдаваемая поверхностью твердого тела окружающей среде за время $d\tau$, определяется по формуле

$$dQ = C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right] F d\tau + \alpha_k (t_{\text{п}} - t_{\text{с}}) F d\tau,$$

где $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения:

$$C_{\text{пр}} = \epsilon C_0;$$

ϵ – степень черноты тела;

$C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ – коэффициент излучения;

F – поверхность тела;

$d\tau$ – продолжительность теплоотдачи.

Первый член этого уравнения выражает количество теплоты, отдаваемое поверхностью тела лучеиспусканием, а второй – конвекцией.

Введя обозначение

$$\alpha_{\text{л+к}} = \frac{C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right]}{(t_{\text{п}} - t_{\text{с}})} + \alpha_k, \quad (3)$$

получим

$$dQ = \alpha_{л+к}(t_n - t_c)Fdt. \quad (4)$$

С другой стороны, количество теплоты, отдаваемое поверхностью тела окружающей среде, можно определить по изменению энтальпии:

$$dQ = cGd\bar{t}, \quad (5)$$

где c – удельная теплоемкость при данной температуре;

G – масса образца;

$d\bar{t}$ – изменение средней по массе температуры образца.

Если нагреваемое тело имеет высокий коэффициент теплопроводности и небольшую толщину, т.е. является термически тонким, приравняв уравнения (4) и (5), получим

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\alpha_{л+к}(t_n - t_c)}{cG}. \quad (6)$$

Из выражения (6), зная скорость охлаждения и температуры тела и среды, можно определить величину суммарного коэффициента $\alpha_{л+к}$.

Порядок выполнения работы

1. Поместить образец в заранее разогретую печь до $T = 900$ °С.
2. Нагреть образец до $T = 800$ °С и извлечь из печи.
3. Произвести замер температуры поверхности образца каждые 30 секунд. Измеренные значения занести в табл. 2.
4. Построить график зависимости $t = f(\tau)$.

Таблица 2

№	τ , с	t_c , °С	t_n , °С	$\frac{dt}{dt}$, °С/с	$\alpha_{к+л}$,	α_k ,	α_l ,	$C_{пр}$,
					$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$

5. Вычислить для пяти значений температур (указанных преподавателем) величину скорости охлаждения $\frac{dt}{dt}$, которая равна тангенсу угла наклона соответствующей касательной к оси абсцисс.

6. Определить суммарный коэффициент теплоотдачи с помощью формулы (6) для заданных значений температуры.

7. Определить коэффициент теплоотдачи конвекцией по уравнению (2).

8. Определить коэффициент теплоотдачи излучением, используя формулу (3).

9. Определить приведенный коэффициент излучения данного образца.

10. Результаты опытов и вычислений записать в табл. 2.

11. Построить графики зависимости $\alpha_{к+л} = f(t)$, $\alpha_k = f(t)$, $\alpha_l = f(t)$ (в одном координатном поле) и зависимость $C = f(t)$.

Содержание отчета

Общие сведения о конвективном теплообмене. Описание методики проведения эксперимента. 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., 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. Теплотехника: учебник для вузов / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высшая школа, 2005.
6. Прибытков, И.А., Левицкий, И.А. Теоретические основы теплотехники. – М.: Издательский центр «Академия», 2004.
7. 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.
8. Промышленные теплотехнологии: Машиностроительное и металлургическое производство: учебник В 2 ч. / Под общ. ред. В.И. Тимошпольского. – Минск: Вышэйшая школа, 1995.
9. Промышленные теплотехнологии: методики и инженерные расчеты оборудования высокотемпературных теплотехнологий машиностроительного и металлургического производства: учебник / Под общ. ред. В.И. Тимошпольского. – Минск: Вышэйшая школа, 1998.

Учебное издание

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ
ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ МЕТАЛЛА
В СЛУЧАЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ**

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
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. 0,93. Уч.-изд. л. 0,73. Тираж 100. Заказ 157.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Независимости, 65.