

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Машины и технологии литейного производства»

А. Н. Крутилин
В. Ф. Одиночко
Ю. А. Николайчик

ТЕПЛООБМЕН В ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССАХ

Учебно-методическое пособие
для студентов дневного и заочного отделения
по специальности 1-36 02 01 «Машины и технология
литейного производства»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
в сфере высшего образования Республики Беларусь по образованию
в области металлургического оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2013

УДК 621.74.011:536.24(075.8)

ББК 34.61.7я7

К84

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры

«Промышленная теплоэнергетика» *Р. И. Есьман;*

кандидат технических наук, доцент, заместитель директора РУП

«Институт БЕЛНИИЛИТ» *М. А. Садоха*

Крутилин, А. Н.

К84 Теплообмен в литейных процессах : учебно-методическое пособие для студентов дневного и заочного отделения по специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства» / А. Н. Крутилин, В. Ф. Одиночко, Ю. А. Николайчик. – Минск : БНТУ, 2013. – 103 с.

ISBN 978-985-550-109-2.

В учебно-методическом пособии кратко изложены положения теории по основным явлениям переноса теплоты. Рассмотрены вопросы теплообмена при изменении агрегатного состояния в процессах сушки материалов, горения различных видов топлива.

УДК 621.74.011:536.24(075.8)

ББК 34.61.7я7

ISBN 978-985-550-109-2

© Крутилин А. Н., Одиночко В. Ф.,
Николайчик Ю. В., 2013

© Белорусский национальный
технический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Стационарная теплопроводность	5
<i>Лабораторная работа № 1</i>	
Определение коэффициента теплопроводности огнеупорных материалов методом пластины	12
<i>Лабораторная работа № 2</i>	
Определение коэффициента теплопроводности материала методом трубы	14
<i>Лабораторная работа № 3</i>	
Определение коэффициента теплопроводности материала методом шара	16
Конвективный теплообмен.....	20
<i>Лабораторная работа № 4</i>	
Исследование процесса теплоотдачи при свободной конвекции.....	39
<i>Лабораторная работа № 5</i>	
Определение коэффициента теплоотдачи от охлаждающегося тонкого тела	42
Теплообмен при излучении	47
<i>Лабораторная работа № 6</i>	
Исследование процесса теплового излучения тела.....	54
Сложный теплообмен и теплопередача.....	58
Теплопроводность при нестационарном режиме	60
<i>Лабораторная работа № 7</i>	
Исследование нестационарного теплового процесса и определение теплофизических характеристик материала	63
Теплообмен при изменении агрегатного состояния	73
<i>Лабораторная работа № 8</i>	
Исследование процесса теплоотдачи при фазовом переходе.....	80
Теплообмен в процессах сушки материалов	84
Теплообмен при горении	89
Теплообменные аппараты.....	93
Список использованных источников.....	96
Приложение.....	97

Введение

«Теплообмен в литейных процессах» является одной из основных дисциплин, необходимых для профессиональной деятельности специалистов в области металлургии и литейного производства.

Целью преподавания дисциплины является подготовка специалистов, владеющих навыками грамотной эксплуатации современного литейного и металлургического оборудования. Знание закономерностей процессов теплообмена позволяет инженеру квалифицированно решать задачи интенсификации и оптимизации технологических процессов, экономии топливно-энергетических ресурсов.

Преподавание дисциплины предусматривает не только изложение в ходе лекций информационного материала, но и изучение на лабораторных занятиях особенностей теплообмена при получении отливок различными способами литья, путей регулирования процессов теплообмена с целью оптимизации технологических процессов, рекомендаций для практических расчетов.

СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

В соответствии с *первым законом термодинамики* энергия не исчезает и не возникает вновь – она лишь переходит из одной формы в другую. Повышение температуры, а следовательно, и внутренней энергии тела, свидетельствует об увеличении кинетической энергии поступательного, вращательного и колебательного движения частиц, потенциальной энергии сил взаимодействия между молекулами. Энергия электронных оболочек атомов и внутриядерная энергия для большинства теплоэнергетических процессов остаются неизменными.

Передача теплоты – сложный процесс, связанный с разнообразными физическими явлениями. Перенос теплоты может происходить вследствие неоднородности полей физических величин, таких, например, как диффузионный перенос теплоты за счет разности концентраций компонентов и т. д. Любая форма энергии – механическая, электрическая, химическая и т. д. – может частично или полностью трансформироваться в теплоту.

Согласно *второму закону термодинамики* самопроизвольный процесс переноса теплоты в пространстве возможен только при наличии разности температур. Существуют три основных вида передачи теплоты: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение.

Теплопроводностью называется молекулярный процесс переноса теплоты в теле или между телами, происходящий вследствие неоднородности температур в рассматриваемом пространстве. Теплопроводность не связана с макродвижением тел и осуществляется передачей энергии при взаимодействии одних микрочастиц тела с другими.

Тепловое состояние термодинамической системы (тела) характеризуется *температурным полем*, под которым понимается совокупность мгновенных значений температур для всех точек тела в данный момент времени. Различают одномерное, двумерное и трехмерное температурное поле. Процесс, характеризующийся постоянством температуры во времени, называется установившимся или стационарным. Совокупность точек тела с одинаковыми значениями температуры образует изотермические линии и поверхности. Поток теплоты вдоль изотермической поверхности отсутствует, максимальное изменение температуры имеет место в направлении нормали к изотермической поверхности.

Градиентом температуры называется предел отношения приращения температуры ΔT к расстоянию между изотермами по нормали Δn :

$$\text{grad}T = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta T}{\Delta n} \right) = \frac{\partial T}{\partial n} = \nabla T.$$

Это величина векторная, направленная в сторону увеличения температуры по нормали к изотерме.

Количество теплоты Q , проходящее в единицу времени через изотермическую поверхность площадью F , называется *тепловым потоком*.

Тепловой поток, отнесенный к единице площади изотермической поверхности, называется *плотностью теплового потока* q , Вт/м².

Интенсивность процесса переноса теплоты теплопроводностью определяется *законом Фурье*. Количество переданной теплоты пропорционально падению температуры, времени и площади сечения, перпендикулярного направлению распространения теплоты:

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dn} dF d\tau.$$

Если отнести количество переданной теплоты к единице площади сечения и единице времени можно записать:

$$q = -\lambda \text{grad}T.$$

Плотность теплового потока величина векторная: знак « \leftarrow » показывает, что направление вектора градиента температуры и теплового потока противоположны. *Коэффициент теплопроводности* λ , Вт/(м \cdot °С), характеризует способность вещества проводить теплоту и определяется как количество теплоты, которое проходит в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности при температурном градиенте между двумя изотермическими поверхностями, расстояние между которыми один метр, равно единице.

Механизм переноса теплоты в металлах связывают с упругими колебаниями атомов (ионов) в решетке, а также с наличием и движением свободных электронов. На долю коротких длин волн приходится максимальная доля передачи тепловой энергии, однако их

скорость приблизительно на 40 % меньше, чем у длинных волн, распространяющихся со скоростью звука. Вследствие тепловых флуктуаций, наличия различного рода несовершенств реальных кристаллических структур при движении происходит рассеивание тепловых волн, снижается эффективная скорость их распространения. Наиболее сильное рассеивание испытывают короткие волны. Электронная составляющая в общей теплопроводности у металлов, связанная с большим количеством свободных электронов, составляет основную часть. Для других твердых тел электронная составляющая намного меньше теплопроводности через решетку.

Самым теплопроводным металлом является Ag: его коэффициент теплопроводности $\lambda = 410 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. Теплопроводность Cu равна $395 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, Au – $300 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, Al – $210 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Для большинства материалов *зависимость коэффициента теплопроводности от температуры* может быть выражена следующим образом:

$$\lambda = \lambda_0 (1 \pm b (T - T_0)),$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности при температуре T_0 ;

b – постоянная, определяемая опытным путем.

С увеличением температуры для большинства металлов теплопроводность падает. При плавлении металлов теплопроводность снижается скачкообразно, что связано с нарушением кристаллического строения при переходе от дальнего порядка к ближнему.

На величину коэффициента теплопроводности оказывает влияние не только температура, но и давление, пористость, влажность, химический состав, структура материала и т. д.

Количественные закономерности изменения коэффициента теплопроводности от концентрации компонентов не установлены. Однако известно, что добавление к металлу с высокой теплопроводностью небольших количеств металла с меньшей теплопроводностью приводит к резкому снижению теплопроводности сплава.

Изменение структуры металла также приводит к изменению теплопроводности. Так, например, в чугунах теплопроводность аустенита $\lambda \sim 41,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, феррита $\lambda \sim 76,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, перлита $\lambda \sim 51,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, цементита $\lambda \sim 7,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, а графита $\lambda \sim 155 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Процесс теплопроводности в жидкостях происходит не только за счет обмена энергией при соударениях, но и путем переноса энергии диффундирующими молекулами. В отличие от твердых тел, постоянного положения равновесия, вокруг которого колеблются атомы в жидкости, не существует. Траектория движения атома в жидкости представляет собой ломаную линию с задержками около положения равновесия. Изменение положения атома может происходить не за счет увеличения энергии атома, а вследствие того, что совокупность атомов, примыкающих к определенному атому, получает избыточную энергию и раздвигается, образуя полость, в которую внедряется атом.

Коэффициент теплопроводности капельных жидкостей колеблется от 0,08 до 0,70 Вт/(м·°С). Теплопроводность воды составляет 0,6 Вт/(м·°С). С увеличением температуры коэффициент теплопроводности жидкостей убывает, за исключением воды и глицерина.

В газах, согласно молекулярно-кинетической теории, процесс теплопроводности осуществляется за счет диффузии молекул и атомов при их взаимном обмене и соударениях между собой. Атомы в газообразном состоянии обладают большой кинетической энергией, их движение хаотично. Длина свободного пробега и частота столкновений атомов зависят от их количества. При столкновении молекул и атомов происходит обмен кинетической энергией, в результате чего происходит передача теплоты от нагретой части к холодной. Коэффициент теплопроводности газов находится в пределах от 0,005 до 0,2 Вт/(м·°С). Скорость движения молекул возрастает с увеличением температуры и уменьшением молекулярной массы, в связи с этим теплопроводность гелия и водорода в 5–10 раз больше, по сравнению с другими газами. Наибольшей теплопроводностью обладает водород – $\lambda \approx 0,2$ Вт/(м·°С), у воздуха $\lambda \approx 0,025$ Вт/(м·°С). Зависимость коэффициента теплопроводности газов от температуры описывается формулой

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

От давления коэффициент теплопроводности газов практически не зависит, за исключением очень высоких (более $2 \cdot 10^8$ Па) и очень низких (менее $2 \cdot 10^3$ Па) давлений.

Явление чистой теплопроводности в газах наблюдается в очень тонких слоях. С увеличением толщины слоя газа обычно возникает конвекция, вследствие чего общая передача тепла через слой возрастает.

Теплопроводность пористых материалов зависит от влажности. Так, например, для сухого кирпича теплопроводность составляет $0,35 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, а для влажного – $1,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Материалы с теплопроводностью менее $0,25 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ называют *теплоизоляционными*. Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов зависит не только от температуры, но и от структуры материала, его пористости и влажности. Если поры и капилляры материала заполнены водой, коэффициент теплопроводности которой значительно выше теплопроводности воздуха, коэффициент теплопроводности материала возрастает, так как вода перемещается внутри пор за счет капиллярных явлений.

В последнее время широкое распространение получили искусственно вспученные материалы, изготовленные из волокнистых и порошковых материалов, обладающие хорошими теплоизоляционными свойствами благодаря большой пористости.

В вакуумно-многослойных и вакуумно-порошковых теплоизоляционных материалах перенос теплоты теплопроводностью через поры уменьшают путем создания глубокого вакуума, а для уменьшения переноса теплоты излучением служит либо порошок, либо несколько слоев фольги с малой степенью черноты, выполняющих роль экранов.

При выполнении теплотехнических расчетов все тела можно разделить на *тела простой и сложной формы*. Тела простой формы делят на три класса. К первому классу относят тела, у которых два измерения значительно больше третьего (стенка). Второй класс у тех тел, у которых два измерения значительно меньше третьего (цилиндр). Тела, у которых три измерения одного порядка (шар), относятся к третьему классу.

Для процесса теплопроводности через неограниченную плоскую однослойную стенку толщиной δ и коэффициентом теплопроводности материала λ . При температурах на наружной и внутренней поверхностях T_1 и T_2 согласно закону Фурье плотность теплового потока можно рассчитать по формуле

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2).$$

Отношение λ/δ называют *тепловой проводимостью*, а величину, обратную ей, – *термическим сопротивлением*.

При постоянном значении коэффициента теплопроводности температура по толщине однородной стенки изменяется по линейному закону. В действительности теплопроводность зависит от температуры, и закон распределения температуры по толщине стенки является параболическим.

Для многослойной стенки с разными коэффициентами теплопроводности распределение температур по толщине характеризуется ломаной линией, причем чем меньше значение λ , тем круче угол наклона прямой.

Для однородной цилиндрической стенки заданной длины, внутренним радиусом r_1 и внешним r_2 плотность теплового потока по сечению стенки изменяется, так как площади внутренней и внешней поверхностей различны. Обычно плотность теплового потока относят к единице площади внутренней или наружной поверхности:

$$q_1 = \frac{(T_{1п} - T_{2п})}{\frac{1}{2\lambda} d_1 \ln \frac{d_2}{d_1}};$$

$$q_2 = \frac{(T_{1п} - T_{2п})}{\frac{1}{2\lambda} d_2 \ln \frac{d_2}{d_1}}.$$

Кроме того, для цилиндрической стенки существует понятие линейного потока теплоты, которое соответствует количеству теплоты, проходящему за единицу времени через цилиндрическую стенку длиной в один метр:

$$q_1 = \frac{\pi(T_{1п} - T_{2п})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}.$$

Термическое сопротивление цилиндрической стенки составляет $(1/2\pi\lambda)/\ln(r_2/r_1)$.

Расчет теплопроводности тел простейшей конфигурации можно описать одной формулой:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F_x \Delta T.$$

где F_x – расчетная поверхность тела.

Расчет теплопроводности сложных по конфигурации тел можно проводить, расчлняя тело плоскостями, параллельными или перпендикулярными направлению теплового потока, на элементы простой формы.

Известен и метод решения, который основан на электротепловой аналогии. Закон Ома в дифференциальной форме аналогичен закону Фурье, поэтому для тел одинаковой формы аналогичными получаются и решения задач теплопроводности и электропроводности. Каждому тепловому параметру соответствует электрический аналог: плотности теплового потока q – плотность тока j ; тепловому потоку Q – сила тока I ; температуре T – электрический потенциал E ; теплопроводности λ – электропроводность σ . Таким образом, по имеющимся численным значениям электрических величин можно рассчитать соответствующие тепловые, и наоборот.

При использовании современной вычислительной техники достаточно точные решения можно получить, используя современные системы моделирования литейных процессов, в основе которых лежит решение системы дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных (Навье–Стокса, Фурье–Кирхгофа, уравнение неразрывности или сплошности).

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПЛАСТИНЫ

Цели работы: ознакомиться с теоретическими основами стационарного теплового режима; экспериментально определить коэффициент теплопроводности огнеупорных материалов методом пластины.

Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 1.

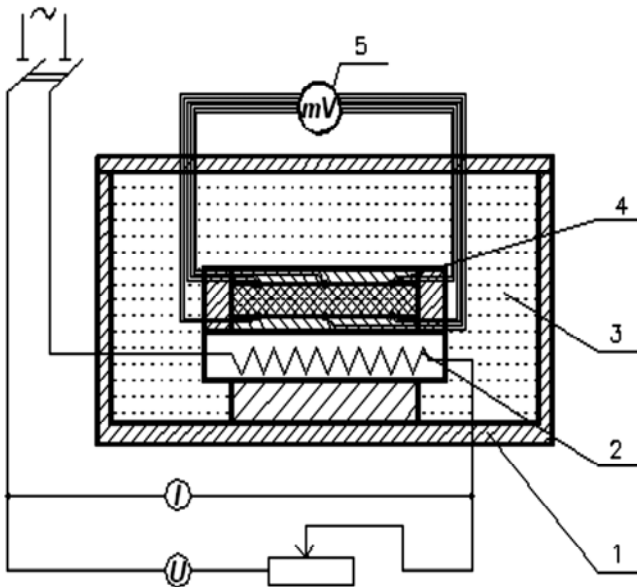


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки:

1 – керамический корпус; 2 – нагреватель; 3 – теплоизоляционный наполнитель;
4 – образец; 5 – милливольтметр

Лабораторная установка состоит из керамического корпуса 1 с асбестовым наполнителем 3 и нагревателем 2. Образец 4 в виде круга диаметром 110 мм и толщиной 10 мм расположен над нагревателем. В испытуемый образец установлены шесть хромель-алюмелевых термопар, по три с каждой стороны образца. Регистрация

показаний термопар осуществляется с помощью прибора 5. Амперметр и вольтметр предназначены для определения количества тепла, выделяемого нагревателем. Подводимое к нагревателю напряжение регулируется лабораторным трансформатором.

Проведение экспериментов и обработка результатов измерений

Для создания направленного теплового потока на нагреватель подается электрический ток. Через каждые 15 мин, в течение часа, снимают показания термопар, силу тока и напряжение в цепи нагревателя. Полученные значения температур сверху и снизу образца усредняют и записывают в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований

Время τ , мин	Температура T , °C		Сила тока I , А	Напряжение U , В
	T_{1cp}	T_{2cp}		
15				
30				
45				
60				

Измерение коэффициента теплопроводности производят при установившемся тепловом режиме. Наступление стационарного режима происходит через 30–40 мин, о чем свидетельствует постоянство температур с обеих сторон образца. Эксперименты проводят при трех температурах для различных материалов (шамот, дианас, магнезит). По полученным экспериментальным данным рассчитывают коэффициент теплопроводности λ из уравнения

$$IU = \frac{\lambda F(T_{1cp} - T_{2cp})}{\delta},$$

где IU – тепловой поток, проходящий через образец;

F – площадь поверхности, через которую происходит теплопередача, м²;

δ – толщина испытуемого образца, м.

Полученное значение коэффициента теплопроводности сравнивают с расчетными данными (таблица П1).

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ТРУБЫ

Цель работы: ознакомиться с методикой экспериментального определения коэффициента теплопроводности материала методом трубы.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка схематически изображена на рисунке 2.

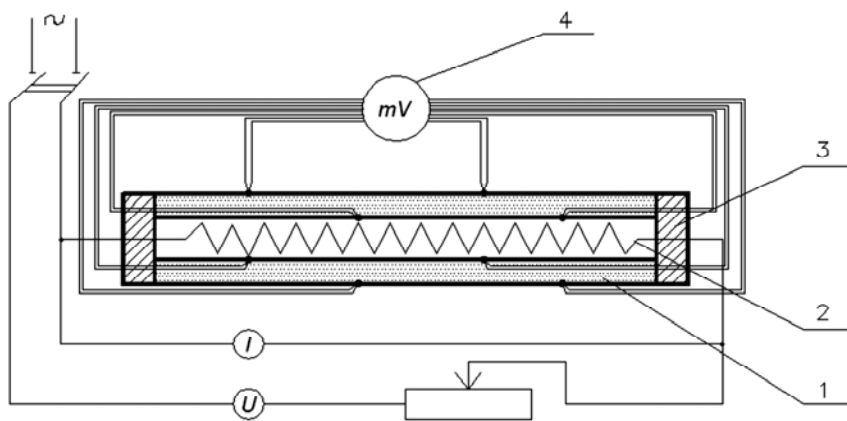


Рисунок 2 – Принципиальная схема установки:

1 – образец в виде трубы; 2 – нагреватель; 3 – пробка; 4 – милливольтметр

Внутри трубы, изготовленной из испытуемого материала 1 с наружным диаметром 38 мм и длиной 0,5 м соосно вставлена кварцевая трубка наружным диаметром 12 мм, внутри которой установлен электронагреватель 2 в виде нихромовой спирали. Для устранения осевых утечек тепла торцы трубы закрыты пробками, изготовленными из теплоизоляционного ультралегковесного шамота 3. Перепад температуры по толщине образца измеряется хромель-алюмелевыми термопарами и фиксируется прибором 4. По показаниям амперметра и вольтметра определяют количество тепла, проходящего через образец. Подводимое к нагревателю напряжение регулируется лабораторным трансформатором.

Проведение экспериментов и обработка результатов измерений

При наступлении стационарного теплового режима на внутренней поверхности стенки цилиндра диаметром d_1 устанавливается постоянная температура T_1 , а на внешней диаметром d_2 – температура T_2 . Зная тепловой поток от внутренней поверхности цилиндра к наружной на участке длиной l и перепад температуры по толщине образца, можно определить коэффициент теплопроводности испытуемого материала

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{IU \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l (T_1 - T_2)}.$$

Отсчет показаний термомпар производят четыре раза с интервалом 15 мин при установившемся тепловом режиме. Показания прибора заносят в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований

Время τ , мин	Температура T , °С		Сила тока I , А	Напряжение U , В
	$T_{1\text{ср}}$	$T_{2\text{ср}}$		
15				
30				
45				
60				

Полученное значение λ относят к средней температуре материала:

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_1 + T_2}{2},$$

где T_1 и T_2 – температуры соответственно на внутренней и внешней поверхностях образца.

Произведя несколько замеров при разных температурах, необходимо построить график зависимости коэффициента теплопроводности от температуры материала и сопоставить данные с расчетными (таблица П1).

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ШАРА

Цель работы: экспериментально определить коэффициент теплопроводности материала методом шара.

Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 3.

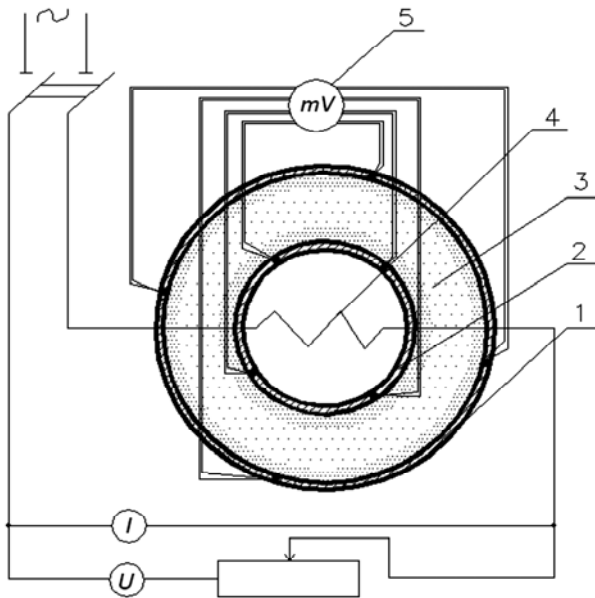


Рисунок 3 – Схема лабораторной установки:
1, 2 – концентрические сферы; 3 – образец для испытаний;
4 – нагреватель; 5 – регистрирующий прибор

В пространство между двумя концентрическими сферами 1 и 2 с внутренним диаметром 60 мм и наружным диаметром 100 мм помещают испытуемый материал 3. Внутри сферы 1 расположен электронагреватель 4. Подводимое напряжение регулируется лаборатор-

ным трансформатором. Отличительная особенность метода заключается в том, что вся теплота, выделяемая электронагревателем, проходит через исследуемый материал, т. е. отсутствуют утечки тепла, которые имеют место при определении коэффициента теплопроводности методом пластины и цилиндра. Показания термопар, расположенных на внутренней и наружной поверхностях испытуемого материала, регистрирует прибором 5.

Проведение экспериментов и обработка результатов измерений

Аналогично экспериментальному определению коэффициента теплопроводности методом пластины и цилиндра производят нагрев образца в течение одного часа. Показания термопар регистрируют через каждые 15 мин. При наступлении стационарного режима находят средние значения полученных экспериментальных данных в каждый промежуток времени. Одновременно регистрируют показания амперметра и вольтметра. Результаты измерений заносят в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований

Время τ , мин	Температура T , °С		Сила тока I , А	Напряжение U , В
	T_{1cp}	T_{2cp}		
15				
30				
45				
60				

Определение коэффициента теплопроводности производят при наступлении стационарного теплового режима

$$\lambda_{cp} = \frac{IU\delta}{\pi d_1 d_2 (T_1 - T_2)},$$

где T_1 – средняя температура поверхности внутренней сферы, °С;

T_2 – средняя температура поверхности внешней сферы, °С;

$\delta = \frac{d_2 - d_1}{2}$ – толщина образца, м.

Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ср}}$ относится к средней температуре стенки.

Контрольные задачи

Задача 1. Определить коэффициент теплопроводности материала λ стенки из огнеупорного кирпича толщиной $\delta = 60$ мм, если плотность теплового потока через нее $q = 500$ Вт/м², а разность температур на поверхности $\Delta t = 100$ °С.

Решение

$$\lambda = q \cdot \delta / (t_{c1} - t_{c2}) = 500 \cdot 0,06 / 100 = 0,3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С}).$$

Задача 2. Определить значение эквивалентного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$ многослойной плоской стенки, составленной из шести металлических листов толщиной $\delta_1 = 0,5$ мм, между которыми проложен изоляционный материал толщиной $\delta_2 = 5$ мм. Значения коэффициентов теплопроводности $\lambda_1 = 50$ Вт/(м·°С) для металла и $\lambda_2 = 0,12$ Вт/(м·°С) для теплоизоляционного материала.

Решение

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{экв}} &= \sum_{i=1}^n \delta_i / \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = (6 \cdot 0,0005 + 5 \cdot 0,005) / (6 \cdot \frac{0,0005}{50} + 5 \frac{0,005}{0,12}) = \\ &= 0,135 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С}). \end{aligned}$$

Задача 3. Определить тепловой поток через стенку толщиной 230 мм, высотой и длиной по 2 м, если температуры на ее поверхности $t_{c1} = 40$ °С, $t_{c2} = 10$ °С, а коэффициент теплопроводности $\lambda = 1$ Вт/(м·°С).

Решение

$$Q = (t_{c1} - t_{c2}) \lambda F / \delta = (40 - 10) 1 \cdot 2 \cdot 2 / 0,23 = 522 \text{ Вт}.$$

Задача 4. Стальная стенка со средней температурой $t = 60$ °С изолирована от тепловых потерь двумя слоями теплоизоляционного материала – плитами толщиной соответственно $\delta_1 = 20$ мм, $\delta_2 = 20$ мм,

с коэффициентами теплопроводности материала $\lambda_1 = 0,25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$, $\lambda_2 = 0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$. Определить, какой слой изоляции толщиной δ_x с коэффициентом теплопроводности $\lambda_3 = 0,12 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ может заменить оба слоя так, чтобы теплоизоляционные свойства системы остались без изменения.

Решение

Для того чтобы термические свойства системы остались неизменными, необходимо применить равенство термических сопротивлений:

$$\delta_1/\lambda_1 = \delta_2/\lambda_2 = \delta_x/\lambda_3,$$

отсюда

$$\delta_x = \lambda_3 (\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2);$$

$$\delta_x = 0,12 \cdot (0,02/0,25 + 0,02/0,05) = 0,058 \text{ м}.$$

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под явлением теплопроводности?
2. Что такое температурное поле? Какие виды температурного поля вы знаете?
3. Что такое температурный градиент, тепловой поток, плотность теплового потока, в каких единицах они измеряются?
4. Сформулируйте основной закон теплопроводности.
5. Что такое коэффициент теплопроводности, его физический смысл?
6. Законы распределения температур по толщине плоской, цилиндрической и шаровой стенок.
7. В каких пределах изменяется коэффициент теплопроводности в металлах, жидкостях и газах?
8. Какое влияние оказывает температура на величину коэффициента теплопроводности материалов?
9. Что такое тепловая проводимость и термическое сопротивление?
10. От чего зависит теплопроводность материала?

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Конвекция представляет собой процесс переноса теплоты в жидкостях и газах, обусловленный перемещением вещества в пространстве. Конвекция возможна только в движущейся среде, при этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды. Процесс конвективного теплообмена между теплоносителем и поверхностью твердого тела (теплоотдача) всегда сопровождается процессом переноса теплопроводностью, так как при движении теплоносителя неизбежно происходит соприкосновение его отдельных частиц. Независимо от направления теплового потока Q – от стенки к жидкости или наоборот – значение его принято считать положительным, поэтому разность температур берут по абсолютной величине.

Для определения количества тепла, передаваемого конвекцией, обычно используют уравнение Ньютона–Рихмана

$$Q = \alpha(T_{\text{п}} - T_{\text{с}})F\tau,$$

где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·°С);

$T_{\text{п}}$ и $T_{\text{с}}$ – температуры поверхности и среды, °С;

F – площадь поверхности, м²;

τ – время, с.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α характеризует интенсивность теплообмена и представляет собой количество теплоты, отдаваемое в единицу времени единицей поверхности при разности температур между поверхностью и жидкостью, равной одному градусу. Обычно α определяют экспериментально, измеряя тепловой поток и разность температур стенки и жидкости в процессе теплоотдачи от поверхности известной площади F . Необходимо отметить, что коэффициент теплоотдачи может изменяться вдоль поверхности теплообмена, поэтому различают *средний по поверхности* и *местный (локальный)* коэффициент теплоотдачи.

На тепловой поток между стенкой и теплоносителем влияют физические свойства теплоносителя, режим его движения, размеры и положение тела в пространстве и т. д. Из теплофизических свойств наибольшее влияние на теплообмен оказывают плотность ρ (кг/м³), теплопроводность λ (Вт/(м·°С)) и теплоемкость c (Дж/(кг·°С)) теплоносителя. Кроме того, необходимо учитывать сопротивление пе-

ремещению одной части теплоносителя относительно другой, т. е. вязкость ν ($\text{м}^2/\text{с}$), которая зависит от температуры и давления. Сила вязкого трения зависит от динамического коэффициента вязкости μ . В технических расчетах чаще используют кинематический коэффициент вязкости $\nu = \mu/\rho$ ($\text{м}^2/\text{с}$).

Различают два *вида движения среды: свободное и вынужденное*. Свободным называется движение, происходящее вследствие разности температур и плотностей теплоносителя в гравитационном поле. Возникновение и интенсивность свободного движения определяются тепловыми условиями процесса и зависят от рода теплоносителя, разности температур, объема пространства в котором протекает процесс. Вынужденное движение возникает под действием посторонних возбудителей, в общем случае оно развивается совместно со свободным. Относительное влияние свободного движения тем больше, чем больше разность температур и чем меньше скорость вынужденного движения.

Процесс теплоотдачи неразрывно связан с *характером движения теплоносителя*. Различают *ламинарное* и *турбулентное* движение теплоносителя. При ламинарном режиме движение частиц жидкости происходит по плавным, непересекающимся траекториям. Турбулентное движение характеризуется хаотичным движением частиц, траектории их движения быстро изменяются во времени и в пространстве. Скорость, давление и другие параметры изменяются беспорядочно.

Режим движения теплоносителя определяется безразмерным комплексом, включающим в себя скорость движения ω , кинематический коэффициент вязкости ν теплоносителя и характерный размер l . Такой комплекс называется *числом Рейнольдса* ($Re = \omega l/\nu$).

При любом режиме движения теплоносителя в тонком слое у поверхности из-за сил вязкого трения скорость течения жидкости замедляется и падает до нуля. Этот слой принято называть *гидродинамическим пограничным слоем* или *слоем Прандтля*. В гидромеханике вязкой жидкости известна гипотеза о том, что частицы жидкости, непосредственно соприкасающиеся с твердой поверхностью, адсорбируются на ней и имеют скорость, равную нулю, это справедливо до тех пор, пока газ можно считать сплошной средой. За толщину гидродинамического пограничного слоя, непосредственно прилегающую к поверхности твердого тела, условно принимают

расстояние, на котором скорость движения отличается от скорости невозмущенного потока на 1 %.

Пограничный слой представляет собой область течения вязкой жидкости с малой толщиной и большим градиентом скорости, температуры и концентрации, поэтому различают *гидродинамический*, *тепловой* и *диффузионный пограничные слои*. Тепловой и диффузионный пограничные слои характеризуются наибольшими градиентами температуры и концентрации компонентов смеси. В пределах теплового пограничного слоя температура изменяется от температуры поверхности до температуры в невозмущенном потоке. В пограничном слое движение может быть как ламинарным, так и турбулентным, но всегда существует ламинарный подслой, термическое сопротивление которого оказывает существенное влияние на интенсивность теплообмена.

В основе ламинарного или турбулентного режима движения лежит физический механизм переноса количества движения, теплоты и массы. Перенос теплоты в направлении нормали к поверхности при ламинарном режиме движения осуществляется теплопроводностью, при турбулентном – теплопроводностью и конвекцией.

На интенсивность теплообмена конвекцией оказывает влияние толщина пограничного слоя, которая зависит от скорости движения среды, формы и состояния поверхности (шероховатости и ее ориентации по отношению к потоку), вязкости, плотности, теплоемкости, теплопроводности среды, которые являются функциями параметров состояния (в основном температуры и давления) и др.

Интенсивность переноса теплоты при турбулентном режиме движения теплоносителя значительно выше, чем при ламинарном режиме. Для того чтобы интенсифицировать процесс теплообмена, необходимо уменьшить толщину пограничного слоя путем увеличения скорости движения теплоносителя или за счет искусственной турбулизации пограничного слоя струями направленными перпендикулярно к поверхности.

При обычном продольном обтекании протяженных поверхностей, с небольшими скоростями движения воздуха, коэффициент теплоотдачи обычно ниже $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. В воздушных струях со скоростями истечения более 60 м/с удается достигать значений $\alpha = 200\text{--}300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

В процессах конвективного теплообмена гидродинамические и тепловые явления тесно взаимосвязаны. Температурное поле движущейся жидкости во многом определяется динамикой течения, а теплофизические свойства жидкости существенно зависят от температуры, что, в свою очередь, оказывает влияние на изменение полей скоростей. Теоретическое изучение конвективного теплообмена сводится в основном к определению зависимостей полей скоростей, давлений, температур в зависимости от теплофизических свойств теплоносителя.

Совокупность этих явлений описывается системой дифференциальных уравнений, полученных из основных законов сохранения массы, количества движения и энергии.

Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье–Кирхгофа, выведенное на основе закона сохранения энергии, устанавливает связь между временными и пространственными изменениями температуры в любой точке движущейся среды.

Применительно к твердым телам уравнение имеет следующий вид:

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

где a – коэффициент температуропроводности; характеризует теплоинерционные свойства тела, $\text{м}^2/\text{с}$:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}.$$

При изучении процесса теплопроводности в движущихся средах уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{DT}{d\tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial T}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial T}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial T}{\partial z},$$

где $\omega_x \frac{\partial T}{\partial x}$, $\omega_y \frac{\partial T}{\partial y}$, $\omega_z \frac{\partial T}{\partial z}$ – слагаемые, учитывающие перенос теплоты перемещающимися объемами среды;

ω_x , ω_y , ω_z – проекции скорости потока среды на оси координат.

Так как в движущейся жидкости температурное поле зависит также от распределения скоростей, то для анализа происходящих процессов необходимо рассматривать и уравнение движения жидкости. *Дифференциальное уравнение движения Навье–Стокса* устанавливает взаимосвязь между всеми силами, действующими на элемент движущейся жидкости.

Уравнение Навье–Стокса для проекции равнодействующих сил на ось x для несжимаемой вязкой жидкости, имеет вид

$$p \frac{\partial \omega_x}{\partial \tau} + p \left(\omega_x \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial \omega_x}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial \omega_x}{\partial z} \right) \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial z^2} \right),$$

где g – ускорение свободного падения;

μ – динамический коэффициент вязкости;

ρ – плотность.

Аналогичные уравнения могут быть записаны и для проекций равнодействующих сил на оси y и z .

Уравнение Навье–Стокса справедливо как для ламинарного, так и турбулентного режима движения.

Учитывая, что в уравнении движения появилась неизвестная величина p , для того чтобы система дифференциальных уравнений была замкнутой, к имеющимся уравнениям добавляют *уравнение сплошности или неразрывности*. Данное уравнение выводится на основе закона сохранения массы и имеет вид

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial(p\omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial(p\omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial(p\omega_z)}{\partial z} = 0.$$

Для несжимаемых жидкостей плотность постоянна и уравнение принимает более простой вид:

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} = 0.$$

Для процессов конвективного теплообмена система дифференциальных уравнений охватывает множество различных процессов

теплоотдачи. Чтобы ограничить задачу, необходимо математически описать специфические особенности процесса – *условиями однозначности*, которые подразделяют на *геометрические, физические и краевые*. *Краевые условия* – это совокупность начальных и граничных условий. *Начальные условия* состоят в задании распределения температуры в теле в начальный момент времени (необходимы при рассмотрении нестационарных задач).

Условия однозначности включают в себя:

- геометрические условия – характеризуют форму и размеры системы, в которой протекает процесс;
- физические условия – задают теплофизические параметры среды (теплопроводность, плотность, удельную теплоемкость, объемную плотность теплового потока);
- особенности протекания процесса на границе тела (граничные условия);
- особенности протекания процесса во времени.

Граничные условия могут быть заданы различными способами:

- первого рода – задается распределение температуры по поверхности тела в любой момент времени;
- второго рода – задается плотность теплового потока на поверхности тела как функция координат точек поверхности и времени;
- третьего рода – задается закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой;
- четвертого рода – задается теплообмен соприкасающихся твердых тел, при равенстве температур их поверхностей.

Контакт на границе двух тел не является идеальным: как правило, между ними присутствует газовая фаза или соприкасающиеся поверхности покрыты оксидными пленками и т. д. Теплофизические свойства покрытий и газовых прослоек сильно отличаются от свойств самих тел, что приводит к скачку температур на границе раздела. В таких случаях граничные условия четвертого рода записывают с учетом термического сопротивления контакта.

Существуют и другие виды граничных условий, которые используются при решении задач с фазовыми переходами при изучении процессов кристаллизации, плавления, горения и пр.

Исходя из формы, в которой получают результаты решения, существующие методы решения краевых задач можно разделить на аналитические и численные. *Аналитические методы* позволяют по-

лучать более наглядные решения, удобные для проведения анализа влияния различных параметров на результаты, однако они получены для ограниченного числа простейших задач. *Численные методы* основаны на замене исходных дифференциальных уравнений алгебраическими, они всегда приближенные.

Для решения системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы гидродинамики, теплообмена, кристаллизации, усадки и т. д. в специфических краевых условиях, присущих процессам литья, в настоящее время наиболее часто используют численные методы: *метод конечных элементов (МКЭ)* и *конечных разностей (МКР)*.

Расчетная конечно-элементная сетка в МКЭ – это набор многоугольных пирамид, непрерывно, без пересечений заполняющих расчетную область моделируемого объекта. При использовании МКР расчетная геометрия – это набор относительно мелких параллелепипедов, полученных наложением непрерывной прямоугольной ортогональной сетки на прямоугольную расчетную область, в которую вписана геометрия отливки и формы.

Основная разница между этими методами заключается в том, что МКЭ предполагает некоторое распределение искомой функции внутри элемента, а МКР – ее постоянное значение внутри ячейки.

Выделяют два вида задач. *Прямая задача* – известно дифференциальное уравнение процесса, заданы условия, определяющие краевую задачу и необходимо определить температурное поле; *обратная задача* – необходимо определить граничные условия или коэффициенты, входящие в основное дифференциальное уравнение, если известны математическое описание процесса и температурное поле.

При изучении процессов теплообмена большое внимание уделяют экспериментальным методам исследования, которые позволяют получать более достоверные данные. Исследования на реальном объекте часто бывают затруднительными, а полученные результаты можно использовать только для условий проведенного эксперимента.

Теория подобия объединяет достоинства аналитического и экспериментального методов и допускает проведение опытов на модели натурального объекта. На основании анализа дифференциальных уравнений и краевых условий находят связь между отдельными группами физических величин, которые объединяют в комплексы определенного вида. Таким образом осуществляется переход от обычных

физических параметров к величинам комплексного типа, которые являются новыми переменными в поставленной задаче.

В теории подобия различают *класс*, *группу* и *единичное явление*. При рассмотрении задач с новыми переменными исследуют не единичное явление, а множество явлений, объединенных некоторой общностью свойств. Такие множества образуют группы подобных явлений. В класс объединены все физические явления, характеризуемые общим физическим механизмом процессов, математической моделью которых являются одинаковые по физическому содержанию и форме записи дифференциальные уравнения. Группой явлений называют совокупность физических процессов, описываемых одинаковыми как по форме, так и по содержанию дифференциальными уравнениями и условиями однозначности. В пределах группы различные явления можно рассматривать как одно и то же явление, но представленное в различных масштабах. Значение каждой физической величины умножают на некоторый постоянный, выбранный для этой величины, числовой множитель. Придавая множителям различные значения, получают множество решений, которыми определяется группа подобных явлений. Выбор числового множителя для различных величин подчиняется специальным требованиям, которые обоснованы теорией подобия. Единственное и необходимое для подобия явлений количественное требование состоит в равенстве значений одноименных комплексов, составленных из заданных по условию задачи величин. Все явления, входящие в группу, подобны между собой. Такие безразмерные комплексы, содержащие существенные для данного процесса величины, называют *числами* или *критериями подобия*. Комплексы обычно не являются точным отношением каких-либо сил, они качественно характеризуют их соотношение.

Из дифференциальных уравнений, описывающих процесс конвективного теплообмена, получены критерии.

Критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\omega l}{\nu},$$

где ω – действительная скорость движения среды, м/с;

l – определяющий размер, м;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

По физическому смыслу критерий Re представляет собой меру отношения сил инерции $F_{и} = \rho\omega^2/2$ к силам вязкого трения $F_{\mu} = \mu\omega^2/l$.

Если преобладают силы вязкого трения, оказывающие тормозящее воздействие на движение жидкости, течение носит ламинарный, упорядоченный характер. В противном случае, если большее влияние оказывают инерционные силы, возникают местные пульсации скорости, приводящие к пульсациям температуры, давления и других параметров процесса, течение становится неупорядоченным, турбулентным.

Критерий Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha},$$

где α – коэффициент температуропроводности, м/с.

Критерий Pr является комбинацией физических параметров жидкости. Изменение критерия Прандтля в зависимости от температуры определяется в первую очередь зависимостью от температуры вязкости жидкости, так как теплопроводность и другие параметры зависят от температуры в гораздо меньшей степени. При течении в безградиентном пограничном слое критерий Прандтля можно рассматривать как меру подобия полей температур и скоростей.

Для расплавленных металлов $Pr \ll 1$, газы и неметаллические капельные жидкости при больших температурах имеют $Pr \sim 1$, для неметаллических капельных жидкостей $Pr \gg 1$. Критерий Прандтля для газов является величиной практически постоянной, так как слабо зависит от температуры.

Критерий Грасгофа

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

где β – коэффициент термического расширения; для газов – величина, обратная температуре, К;

l – определяющий размер, м;

ΔT – разность температур поверхности и среды;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

g – ускорение силы тяжести.

Физический смысл критерия Gr – мера отношения подъемной силы, возникающей в жидкости или газе вследствие различия плотностей объемов среды к силе молекулярного трения.

Критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha_k l}{\lambda},$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К);

λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К);

l – характерный или определяющий размер тела, м.

Критерий Nu характеризует интенсивность теплообмена на границе твердого тела, его можно рассматривать как отношение коэффициента теплоотдачи к термической проводимости слоя жидкости толщиной l .

Известны и другие критерии: критерии No, Fr, Eu, Re называют критериями гидродинамического подобия, а Ki, Bi, Nu, Pe, Fo, Gr, Os, E – критериями теплового подобия.

Критерий Кирпичева Ki характеризует отношение теплового потока подводимого (или отводимого) к телу, к тепловому потоку, переданному через тело за счет теплопроводности.

Критерий Био Bi является безразмерной характеристикой теплообмена на поверхности и представляет собой отношение внутреннего и внешнего термических сопротивлений тела: $Bi = (l/\lambda)/(1/\alpha)$, где λ – коэффициент теплопроводности стенки; α – коэффициент теплоотдачи.

Критерий Пекле Pe – мера относительной роли теплоты, переносимой конвекцией, и теплоты, передаваемой теплопроводностью.

Критерий Остроградского Os – представляет собой отношение количества теплоты выделившегося в теле, к количеству теплоты, прошедшему через тело за счет теплопроводности.

Критерий Фурье Fo – отношение количества теплоты, прошедшего через тело за счет теплопроводности в течение времени τ , к количеству теплоты, пошедшему на изменение температуры тела, т. е. является мерой скорости изменения температуры тела при установленном тепловом состоянии.

Критерий Эккерта E – устанавливает связь между кинетической энергией движущегося потока и тепловой энергией, в которую переходит механическая энергия, вызывая нагревание жидкости.

Критерий гомохронности (временной однородности) Но (или *критерий Струхаля*) – представляет собой отношение времени протекания процесса к времени перемещения рассматриваемого элемента жидкости со скоростью ω на расстояние l , является определяющим критерием при исследовании нестационарных или периодических процессов гидродинамики.

Критерий Эйлера Eu – мера отношения перепада статических давлений в потоке к его динамическому напору.

Критерий Фруда Fr – представляет собой отношение кинетической энергии потока к работе силы тяжести.

Кроме чисел подобия, представляющих безразмерные комплексы физических величин, существуют *критерии параметрического типа*. Например, безразмерная температура или геометрический критерий, представляющий собой отношение координаты к характерному размеру тела.

В общем случае температура является функцией координат и времени. В технических расчетах при определении коэффициента теплоотдачи за температуру жидкости принимают ее среднее значение по сечению потока, омывающего тела.

В качестве определяющего или характерного размера выбирают размер, который оказывает наибольшее влияние на развитие физического процесса. При течении жидкости в круглой трубе – внутренний диаметр, для каналов некруглого сечения, эквивалентный диаметр $4F/P$, где F – площадь сечения, а P – периметр. В случае поперечного обтекания трубы за определяющий размер принимают наружный диаметр, при движении вдоль пластины – ее длина по направлению движения потока.

По физическому смыслу критерии неравнозначны и делятся на *определяющие* и *определяемые*. Критерии, в которые не входят величины определяющие развитие физического процесса, называют определяемыми. Так, например, критерий Нуссельта является определяемым, из него определяют коэффициент теплоотдачи α .

Числа подобия могут быть получены из уравнений связи между величинами, характеризующими явление, или, если исследуемое явление изучено недостаточно, на основе анализа размерностей.

Анализ различных процессов конвективного теплообмена существенно облегчает использование теоремы подобия, с помощью которых уменьшается число определяющих критериев, а также опре-

деляются условия подобия различных явлений теплообмена. Основу теории подобия физических явлений составляют три теоремы.

Первая теорема подобия: для подобных явлений, критерии подобия имеют одинаковые величины. Данная теорема определяет условия, при которых результаты, полученные при исследовании на модели, могут быть перенесены на натурный образец.

Функциональная зависимость между критериями подобия называется критериальным уравнением или уравнением подобия.

Вторая теорема подобия утверждает возможность представления дифференциальных уравнений, описывающих физический процесс, в виде функциональной связи между критериями подобия. Теорема указывает путь получения чисел подобия, например, из дифференциальных уравнений, описывающих исследуемое явление.

Третья теорема подобия устанавливает правила моделирования физических процессов и отвечает на вопрос: какие условия необходимы и достаточны, для того чтобы процессы теплообмена были подобны?

Общее решение системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена в виде функции критериев подобия может быть записано в виде

$$\text{Nu} = A \text{Re}^n \text{Pr}^m \text{Gr}^v \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25},$$

где A , n , m , v – коэффициенты, определяемые экспериментальным путем.

Множитель $\left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25}$ – поправка, учитывающая влияние изме-

нения физических параметров теплоносителя с изменением температуры на теплоотдачу. Можно сказать, что он характеризует зависимость теплоотдачи от направления и величины теплового потока.

При свободной конвекции общее критериальное уравнение упрощается, так как критерий $\text{Re} \rightarrow 1$:

$$\text{Nu} = A_1 \text{Gr}^{v_1} \text{Pr}^{m_1} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25}.$$

При вынужденном движении жидкости критерий $Gr \rightarrow 1$ критерильное уравнение имеет вид

$$Nu = A_2 Re^{n_2} Pr^{m_2} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25}.$$

Связь между числами подобия получают экспериментальным путем, затем находят значение определяемого критерия Nu , а из него – значение коэффициента теплоотдачи α . Далее можно перейти к расчету теплового потока или количества теплоты, участвующего в процессе теплообмена.

Таким образом, на основании теории подобия и экспериментальных исследований, можно получить необходимые для инженерных расчетов данные.

Иногда, вследствие ряда технических трудностей, проведение непосредственных экспериментальных исследований на объекте трудноосуществимо. Метод моделирования позволяет изучать физическое явление на уменьшенной модели, для того чтобы процессы в модели и образце были подобны, необходимо выполнить определенные условия подобия.

Моделировать можно процессы, имеющие одинаковую физическую природу и описываемые одинаковыми дифференциальными уравнениями.

Условия однозначности должны быть одинаковы, кроме численных значений постоянных, содержащихся в этих условиях. Необходимо соблюдать:

- геометрическое подобие условий движения жидкости во входных сечениях образца и модели;
- подобие физических параметров (ρ , λ , μ , c_p), отношение их в сходственных точках образца и модели должно быть постоянным;
- подобие температурных полей на границах жидкой среды.

Полное подобие процесса в образце и модели осуществить трудно. В основе приближенного моделирования лежит принцип автомодельности и стабильности. Согласно *принципу автомодельности* изменение какого-либо критерия в определенных пределах не оказывает влияния на протекание процесса. В этом случае отпадает необходимость соблюдения равенства этого критерия для модели

и образца. Одним из признаков наступления автомодельности является постоянство значения коэффициента гидравлического сопротивления в системе. *Явление стабильности* – свойство вязкой жидкости принимать вполне определенное распределение скоростей.

При изучении процесса теплообмена, в первую очередь, необходимо обратить внимание на гидродинамику процесса движения жидкости. В условиях течения жидкости вдоль плоской поверхности переход от ламинарного режима движения в пограничном слое к турбулентному происходит на некотором участке при критическом значении числа Рейнольдса, равным $5 \cdot 10^5$.

Для ламинарного режима движения теплоносителя в пограничном слое местный коэффициент теплоотдачи определяют из соотношения

$$Nu_{x,ж} = 0,33 Re_{x,ж}^{0,5} Pr^{0,33} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25}.$$

Средний коэффициент теплоотдачи

$$Nu_{l,ж} = 0,66 Re_{l,ж}^{0,5} Pr^{0,33} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25}.$$

Местный коэффициент теплоотдачи при турбулентном режиме движения теплоносителя в пограничном слое

$$Nu_{x,ж} = 0,03 Re_{x,ж}^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25}.$$

Средний коэффициент теплоотдачи:

$$Nu_{l,ж} = 0,037 Re_{l,ж}^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25}.$$

Учитывая, что для газов критерий $Pr = 0,71$, расчетные формулы для газов упрощаются.

При ламинарном режиме течения теплоносителя

$$Nu_{l,ж} = 0,57 Re_{l,ж}^{0,5}.$$

Для турбулентного режима движения теплоносителя в пограничном слое, местный коэффициент теплоотдачи определяется по формуле

$$\text{Nu}_{x,\text{ж}} = 0,0225\text{Re}_{x,\text{ж}}^{0,8}.$$

Средний коэффициент теплоотдачи

$$\text{Nu}_{l,\text{ж}} = 0,032\text{Re}_{l,\text{ж}}^{0,8}.$$

Формулы можно использовать, если температура пластины не изменяется по длине.

При течении жидкости в трубах переходный режим движения соответствует значению критерия $\text{Re} = 2 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4$. Для ламинарного режима движения теплоносителя $\text{Re} < 2 \cdot 10^3$ характерно параболическое распределение скоростей по сечению, при турбулентном режиме – усеченная парабола. Гидродинамически стабилизированный режим движения наступает на некотором расстоянии от входа в трубу. В случае ламинарного режима движения $l_{\text{н}} = 0,05d \cdot \text{Re}$, при турбулентном режиме движения длина стабилизированного участка практически не зависит от Re : $l_{\text{н}} \sim 15d$.

Средний коэффициент теплоотдачи при ламинарном режиме течения жидкости в трубах можно определить по формуле

$$\text{Nu}_{d,\text{ж}} = 1,4 \left(\text{Re}_{d,\text{ж}} \frac{d}{l} \right)^{0,4} \text{Pr}_f^{0,33} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25}.$$

Соотношение справедливо для значений $0,06 < \text{Pr}_f / \text{Pr}_s < 10$ при

$$\text{Re}_{d,\text{ж}} \frac{d}{l} \text{Pr}_f^{\frac{5}{6}} > 15.$$

Для труб большой длины

$$\frac{l}{d} > 0,067\text{Re}_{d,\text{ж}}\text{Pr}_f^{\frac{5}{6}}.$$

Для расчета средней теплоотдачи при турбулентном режиме движения теплоносителя в пограничном слое можно воспользоваться следующей формулой:

$$\text{Nu}_{d,\text{ж}} = 0,021 \text{Re}_{d,\text{ж}}^{0,8} \text{Pr}_f^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25} \varepsilon_1.$$

Коэффициент $\varepsilon_1 = 1$ при $l/d > 50$; если $l/d < 50$, учитывают влияние теплового начального участка. Соотношение справедливо при $\text{Re}_{d,\text{ж}} = 1 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$ и $\text{Pr}_f = 0,6 - 2500$.

Для воздуха $\text{Pr} \approx 0,71$ и $(\text{Pr}_f / \text{Pr}_s) \approx 1$ – соотношение упрощается:

$$\text{Nu}_{d,\text{ж}} = 0,018 \text{Re}_{d,\text{ж}}^{0,8}.$$

В изогнутых трубах возникает центробежный эффект, расчет теплоотдачи проводят по формулам для прямой трубы с введением поправочного коэффициента $\varepsilon_r = 1 + 1,77(d/r)$, где r – радиус змеевика; d – диаметр трубы.

При свободном движении теплоносителя в неограниченном пространстве большое значение имеет протяженность и положение поверхности в пространстве, вдоль которой происходит движение.

Чтобы определить средний коэффициент теплоотдачи необходимо рассчитать произведение критериев $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$.

Для горизонтальных труб диаметром d при $10^3 < \text{Gr}_{d,\text{ж}} \text{Pr}_f < 10^8$

$$\text{Nu}_{d,\text{ж}} = 0,5 (\text{Gr}_{d,\text{ж}} \text{Pr}_f)^{0,25} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25}.$$

Для вертикальных поверхностей (трубы и пластины):

– при ламинарном режиме $10^3 < \text{Gr}_{h,\text{ж}} \text{Pr}_f < 10^9$

$$\text{Nu}_{h,\text{ж}} = 0,76 (\text{Gr}_{h,\text{ж}} \text{Pr}_f)^{0,25} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25}.$$

– при турбулентном режиме $\text{Gr}_{h,\text{ж}} \text{Pr}_f > 10^9$

$$\text{Nu}_{h,\text{ж}} = 0,15 (\text{Gr}_{h,\text{ж}} \text{Pr}_f)^{0,33} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25}.$$

Для воздуха формулы упрощаются:

$$\text{Nu}_{d,\text{ж}} = 0,46\text{Gr}_{d,\text{ж}}^{0,25}; \quad \text{Nu}_{h,\text{ж}} = 0,695\text{Gr}_{h,\text{ж}}^{0,25}; \quad \text{Nu}_{h,\text{ж}} = 0,133\text{Gr}_{h,\text{ж}}^{0,33}.$$

В качестве определяющей температуры следует принимать температуру окружающей среды, для горизонтальных труб определяющий размер – диаметр, для вертикальных поверхностей – высота.

В ограниченном пространстве, вследствие наличия восходящих и нисходящих потоков, условия движения усложняются: они зависят от формы и геометрических размеров, рода жидкости, температурного напора, расположения поверхностей и расстояния между ними и т. д. Явления нагревания и охлаждения теплоносителя протекают одновременно, поэтому разделить их невозможно.

С целью облегчения расчетов в этом случае вводят понятие коэффициента конвекции

$$\varepsilon_{\text{к}} = \lambda_{\text{экв}} / \lambda,$$

где

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

При $\text{Gr}_{\text{ж}}\text{Pr}_{\text{ж}} < 1000$

$$\varepsilon_{\text{к}} = 1.$$

При $10^3 < \text{Gr}_{\text{ж}}\text{Pr}_{\text{ж}} < 10^6$

$$\varepsilon_{\text{к}} = 0,105(\text{Gr}_{\text{ж}}\text{Pr}_{\text{ж}})^{0,3}.$$

При $10^6 < \text{Gr}_{\text{ж}}\text{Pr}_{\text{ж}} < 10^{10}$

$$\varepsilon_{\text{к}} = 0,4(\text{Gr}_{\text{ж}}\text{Pr}_{\text{ж}})^{0,2}.$$

При поперечном обтекании одиночных труб характер движения потока носит плавный, безотрывный характер, критерий $\text{Re} < 5$. Интенсивность теплоотдачи по периметру трубы различается и определяется толщиной пограничного слоя. В лобовой точке интенсивность теплоотдачи максимальная. В кормовой части происходит отрыв потока и образование вихревой зоны, турбулентность потока увеличивается, коэффициент теплоотдачи снова возрастает. Коэф-

коэффициент теплоотдачи зависит от скорости потока, температуры теплоносителя, температурного напора и направления теплового потока. Влияние теплофизических параметров различное, плотность и теплопроводность теплоносителя оказывают большее воздействие на коэффициент теплоотдачи, чем теплоемкость и вязкость.

Расчет среднего коэффициента теплоотдачи можно проводить по нижеприведенным формулам.

При $Re_{d,ж} < 10^3$

$$Nu_{d,ж} = 0,56 Re_{d,ж}^{0,5} Pr_{ж}^{0,36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25} ;$$

при $Re_{d,ж} > 10^3$

$$Nu_{d,ж} = 0,28 Re_{d,ж}^{0,6} Pr_{ж}^{0,36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25} .$$

Для воздуха при $Re_{d,ж} < 10^3$

$$Nu_{d,ж} = 0,49 Re_{d,ж}^{0,5} .$$

при $Re_{d,ж} > 10^3$

$$Nu_{d,ж} = 0,245 Re_{d,ж}^{0,6} .$$

Зависимости справедливы при условии, что угол атаки, составленный направлением движения и осью трубы, равен 90° .

Для пучков труб процесс теплоотдачи зависит от характеристик (диаметра труб, расстояния между осями труб по ширине и глубине пучка) и схемы компоновки пучка (шахматный и коридорный). Теплоотдача первого ряда пучков определяется начальной турбулентностью потока. Теплоотдача второго и третьего пучков возрастает вследствие увеличения турбулентности потока. Для шахматного расположения труб характерно лучшее перемешивание потока, поэтому теплоотдача при этой компоновке выше, чем при коридорном расположении труб.

Расчет среднего коэффициента теплоотдачи можно проводить по нижеприведенным формулам.

Для коридорных пучков труб
при $Re_{d,ж} < 10^3$

$$Nu_{d,ж} = 0,56 Re_{d,ж}^{0,5} Pr_{ж}^{0,36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25} ;$$

при $Re_{d,ж} > 10^3$

$$Nu_{d,ж} = 0,22 Re_{d,ж}^{0,65} Pr_{ж}^{0,36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25} .$$

При шахматной компоновке труб:
при $Re_{d,ж} < 10^3$

$$Nu_{d,ж} = 0,56 Re_{d,ж}^{0,5} Pr_{ж}^{0,36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25} ;$$

при $Re_{d,ж} > 10^3$

$$Nu_{d,ж} = 0,4 Re_{d,ж}^{0,6} Pr_{ж}^{0,36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25} .$$

Для воздуха при коридорной компоновке
при $Re_{d,ж} < 10^3$

$$Nu_{d,ж} = 0,49 Re_{d,ж}^{0,5} ;$$

при $Re_{d,ж} > 10^3$

$$Nu_{d,ж} = 0,194 Re_{d,ж}^{0,6} .$$

При шахматной компоновке пучков труб:
при $Re_{d,ж} < 10^3$

$$Nu_{d,ж} = 0,49 Re_{d,ж}^{0,5} ;$$

при $Re_{d,ж} > 10^3$

$$Nu_{d,ж} = 0,35 Re_{d,ж}^{0,6} .$$

Соотношения применимы для расчета среднего коэффициента теплоотдачи третьего и последующих рядов труб в пучках при условии, что поток жидкости перпендикулярен оси пучка. В случае, если угол атаки меньше, вводится поправочный коэффициент.

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Цель работы: определить коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции.

Основные положения теории

Известно, что любое тело, помещенное в газовую или жидкую среду, при наличии разности температур будет обмениваться с ней теплотой.

Нагретое тело будет отдавать в окружающую среду тепло конвекцией и излучением:

$$q_0 = q_k + q_l.$$

Конвективная составляющая потока может быть определена из соотношения

$$q_k = \alpha_k(T_n - T_c),$$

а лучистая составляющая (закон Стефана–Больцмана) –

$$q_l = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left(\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right).$$

В практике инженерных расчетов обычно рассчитывают общий поток тепла q_0 не отдельно, а через общий коэффициент теплоотдачи α_0 по выражению

$$q_0 = \alpha_0(T_n - T_c).$$

Общий коэффициент теплоотдачи включает конвективную и лучистую составляющие процесса теплоотдачи. Строго говоря, такое действие некорректно, так как, допуская существование понятия

«коэффициента теплоотдачи излучением», искажается физическая сущность теплового излучения. Величину $\alpha_{л}$ можно выразить как

$$\alpha_{л} = \frac{\varepsilon_{пр} c_0 \left(\left(\frac{T_{п}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{с}}{100} \right)^4 \right)}{T_{п} - T_{с}}. \quad (4.1)$$

При известных значениях величин, входящих в уравнение, можно определить $\alpha_{л}$. Коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_{к}$ можно найти из критериального уравнения свободной конвекции:

$$Nu = c(GrPr)^n, \quad (4.2)$$

где c и n – коэффициенты, принимаемые в зависимости от величины произведения $Gr \cdot Pr$ (таблица П2).

Описание лабораторной установки

На рисунке 4 представлена схема лабораторной установки.

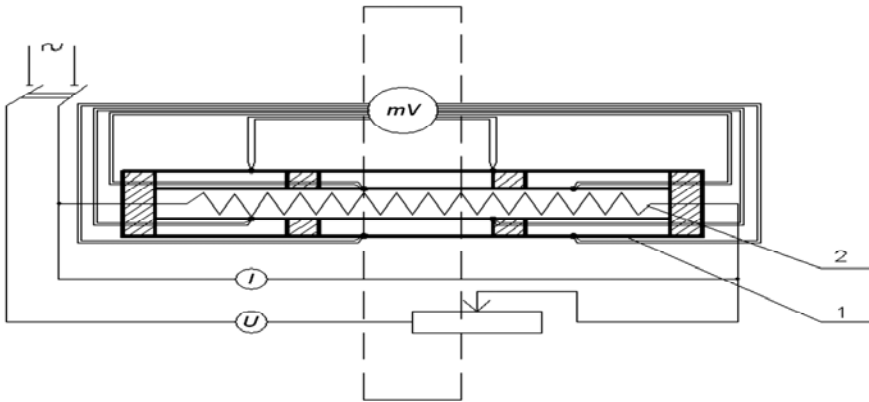


Рисунок 4 – Принципиальная схема лабораторной установки:
1 – труба; 2 – нагреватель

Основу установки представляет собой труба l наружным диаметром $d = 38$ мм и длиной $l = 500$ мм, внутри которой установлен электрический нагреватель 2. По истечении некоторого времени после включения нагревателя в сеть устанавливается стационарный режим, и все тепло от нагревателя передается через боковую поверхность в окружающую среду.

О стационарности режима судят по показаниям термомпар. Количество тепла, выделяемое нагревателем, регулируют лабораторным автотрансформатором и определяют по показаниям амперметра и вольтметра.

Проведение эксперимента и обработка результатов измерений

После осмотра и проверки экспериментальной установки включают электрический нагреватель. По достижении стационарного режима теплообмена (постоянства температур между телом и средой во времени) фиксируют показания термомпар, температуру поверхности трубы, амперметра и вольтметра.

Величину общего коэффициента теплоотдачи α_0 определяют из уравнения

$$\alpha_0 = \frac{IU}{F(T_{\text{п}} - T_{\text{с}})}.$$

Далее переходят к определению величины $\alpha_{\text{л}}$ по уравнению (4.1), при этом принимают $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,8$ (сталь, окисленная при температуре 600 °С), $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К).

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяют из уравнения (4.2). Для этого вычисляем значение произведения критериев Gr и Pr и по данным таблицы П2, определяют значения коэффициентов c и n . После вычисления значения критерия Nu определяют величину $\alpha_{\text{к}}$:

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{\text{Nu}\lambda}{l}.$$

Суммируя рассчитанные величины α_k и α_n , определяют значение α_0 и сравнивают его с рассчитанным.

Экспериментальное исследование и расчет коэффициентов теплоотдачи необходимо провести для двух положений трубы: горизонтального и вертикального. Результаты экспериментов свести в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты экспериментальных исследований

№ п/п	Температура поверхности				Температура среды	Параметры нагревателя	
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_c	I, A	U, B
1							
2							

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ОТ ОХЛАЖДАЮЩЕГОСЯ ТОНКОГО ТЕЛА

Цель работы: экспериментально определить и рассчитать теплоотдачу конвекцией и излучением.

Основные положения теории

Количество теплоты, теряемое телом в окружающую среду, с одной стороны, определяется как теряемое телом массой m и теплоемкостью c при понижении температуры от T_1 до T_2 , с другой стороны, по закону Ньютона–Рихмана – как отдаваемое поверхностью этого тела в среду за время τ при среднем коэффициенте теплоотдачи α_0 :

$$cm(T_1 - T_2) = \alpha_0(T_n - T_c)F\tau,$$

где T_n – температура поверхности тела;

T_c – температура окружающей среды;

F – площадь поверхности тела;

α_0 – средний коэффициент теплоотдачи;

c – удельная теплоемкость тела;

m – масса тела.

Температура теплоотдающей поверхности $T_{\text{п}}$ принимается средней за расчетный период τ . Температура среды принимается постоянной: $T_c = 20$ °С.

Значение коэффициента теплоотдачи можно определить из уравнения

$$\alpha_0 = \frac{cm(T_1 - T_2)}{F(T_{\text{п}} - T_{\text{ср}})}.$$

Полученная величина коэффициента теплоотдачи включает конвективную и лучистую составляющие:

$$\alpha_0 = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}.$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_{\text{к}}$ можно рассчитать, используя критериальную зависимость

$$\text{Nu} = c(\text{GrPr})^n,$$

где c и n – коэффициенты, принимаемые в зависимости от величины комплекса Gr·Pr (таблица П2).

Определив величину критерия Nu, определяют значение $\alpha_{\text{к}}$:

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{\text{Nu}\lambda}{l}.$$

Лучистую составляющую определяют из соотношения

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{\varepsilon_{\text{пр}}c_0 \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]}{T_{\text{п}} - T_c}.$$

Описание лабораторной установки

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рисунке 5.

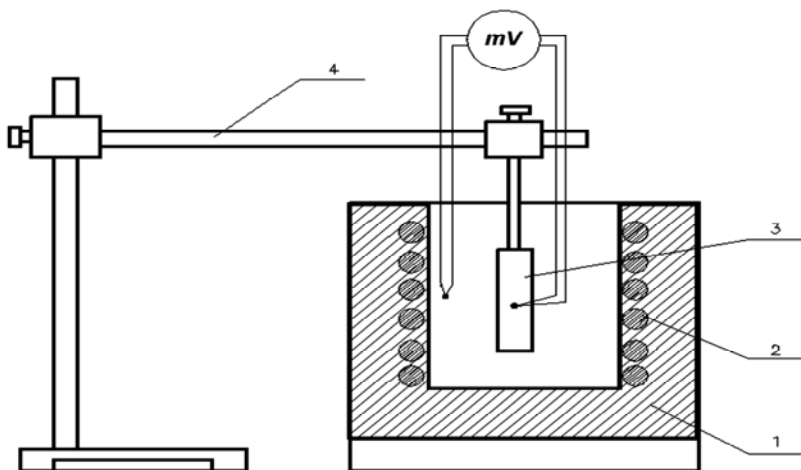


Рисунок 5 – Принципиальная схема лабораторной установки

Установка состоит из лабораторной шахтной печи 1 с нагревателем 2, штатива 4 и медного цилиндра 3, диаметром 13 мм и высотой 200 мм. На поверхности цилиндра установлена хромель-алюмелевая термопара, соединенная с прибором 5 для регистрации температуры.

Проведение эксперимента и обработка результатов измерений

Цилиндр подвешивают на штатив и нагревают в печи до температуры 800–850 °С. Нагретый цилиндр извлекают из печи и производят запись температуры тела при охлаждении через определенные промежутки времени.

Полученные в процессе эксперимента данные используют для построения графика $T_{\text{п}} = f(\tau)$. По указанию преподавателя рассчитывают общий коэффициент теплоотдачи для трех–четырех промежутков времени. Для тех же интервалов определяют $\alpha_{\text{к}}$ и $\alpha_{\text{л}}$. По полученным данным строят зависимости: $\alpha_0 = f(T)$, $\alpha_{\text{к}} = f(T)$, $\alpha_{\text{л}} = f(T)$.

Контрольные задачи

Задача 1. Рассчитать коэффициент теплоотдачи и тепловой поток от стенки трубы длиной $l = 2$ м; внутренний диаметр трубы $d = 16$ мм, скорость течения воды в трубе $\omega_{\text{ж}} = 0,995$ м/с, средняя

температура воды $t_{\text{ж}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, а стенки трубы $t_{\text{с}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Теплофизические свойства воды при $t_{\text{ж}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$: $\lambda_{\text{ж}} = 0,634 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\nu_{\text{ж}} = 0,659 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\text{Pr}_{\text{ж}} = 4,3$. При $t_{\text{с}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Pr}_{\text{с}} = 1,75$.

Решение

Рассчитаем критерий Re :

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \omega_{\text{ж}} d / \nu_{\text{ж}} = 0,995 \cdot 0,016 / (0,659 \cdot 10^{-6}) = 2,42 \cdot 10^4.$$

Полученное значение $\text{Re}_{\text{ж}} > 10^4$ режим течения турбулентный. Для расчета критерия Nu воспользуемся формулой

$$\begin{aligned} \text{Nu}_{\text{ж}} &= 0,021 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,8} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,43} (\text{Pr}_{\text{ж}}/\text{Pr}_{\text{с}})^{0,25} = \\ &= 0,021 (2,42 \cdot 10^4)^{0,8} \cdot 4,3^{0,43} \cdot (4,3/1,75)^{0,25} = 158. \end{aligned}$$

Коэффициент теплоотдачи на участке стабилизированного течения будет равен

$$\alpha_{\text{ст}} = \text{Nu}_{\text{ж}} \lambda_{\text{ж}} / d = 158 \cdot 0,634 / 0,016 = 6260 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Отношение $l/d > 50$, следовательно, $\alpha = \alpha_{\text{ст}}$, тепловой поток равен

$$Q = \alpha \pi d l (t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}) = 6260 \cdot 3,14 \cdot 0,016 \cdot 2(100 - 40) = 37,8 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

Задача 2. Для отопления помещения используют трубу, в которой протекает горячая вода. Рассчитать конвективный коэффициент теплоотдачи и конвективный тепловой поток, если размеры трубы – $d_{\text{н}} = 0,1 \text{ м}$, $l = 10 \text{ м}$, а температура стенки трубы $t_{\text{с}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$, воздуха – $t_{\text{ж}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Теплофизические свойства воздуха при $t_{\text{ж}}$ и $t_{\text{с}}$: $\lambda_{\text{ж}} = 2,59 \times 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$; $\nu_{\text{ж}} = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\text{Pr}_{\text{ж}} = 0,703$; $\text{Pr}_{\text{с}} = 0,691$; $\beta_{\text{ж}} = 1/T = 1/(273 + 20) = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$.

Решение

Рассчитаем критерий Грасгофа ($\lambda_{\text{ж}} = 0,634 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$; $\nu_{\text{ж}} = 0,659 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\text{Pr}_{\text{ж}} = 4,3$; при $t_{\text{с}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Pr}_{\text{с}} = 1,75$):

$$\text{Gr}_{\text{ж}} = \frac{g \beta_{\text{ж}} (t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}) d_{\text{н}}^3}{\nu_{\text{ж}}^2} = \frac{9,81 \cdot 3,4 \cdot 10^{-3} (85 - 20) \cdot 0,1^3}{(15,06 \cdot 10^{-6})^2} = 9,56 \cdot 10^6.$$

Вычислим значение произведения Gr·Pr:

$$\text{Gr} \cdot \text{Pr} = 9,56 \cdot 10^6 \cdot 0,703 = 6,7 \cdot 10^6.$$

По таблице П2 определим значения коэффициентов c и n .

Далее вычислим критерий Nu:

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,5(\text{Gr}_{\text{ж}} \text{Pr}_{\text{ж}})^{0,25} = 0,5(9,56 \cdot 10^6 \cdot 0,703)^{0,25} \cdot (0,703/0,691)^{0,25} = 25,6.$$

и определим значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\text{Nu}_{\text{ж}} \lambda_{\text{ж}}}{d_{\text{H}}} = \frac{25,6 \cdot 2,59 \cdot 10^{-2}}{0,1} = 6,63 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

Конвективный поток

$$Q = \alpha \pi d_{\text{H}} l (t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}) = 6,63 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot 10 (85 - 20) = 1353 \text{ Вт}.$$

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под конвективным теплообменом?
2. Что такое свободная и вынужденная конвекция?
3. Сформулируйте закон теплоотдачи конвекцией.
4. Какие факторы влияют на величину коэффициента теплоотдачи и в каких единицах он выражается?
5. Сформулируйте основные теоремы подобия.
6. Какие критерии характеризуют свободную и вынужденную конвекцию?
7. Объясните физический смысл критериев Re, Gr, Pr, Nu.
8. Объясните разницу между определяющими и неопределяющими критериями подобия.
9. Какие уравнения входят в систему дифференциальных уравнений теплообмена? Что такое граничные условия и какого рода они бывают?
10. В чем разница между коэффициентами теплоотдачи и теплопередачи и какова связь между ними? Почему теплоотдача соприкосновением при турбулентном движении происходит интенсивнее, чем при ламинарном?
11. Какие факторы и в каком направлении влияют на величину коэффициента теплоотдачи в пучках труб при поперечном обтекании труб потоком?

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ИЗЛУЧЕНИИ

Поверхность любого материала, температура которого отличается от абсолютного нуля, непрерывно излучает энергию и получает ее от окружающих его тел.

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии излучающего тела электромагнитными волнами, имеющими определенную частоту ν и длину λ . Возбудителями электромагнитных волн являются заряженные электроны и ионы, входящие в состав вещества. Колебания ионов соответствуют излучению низкой частоты. Если электроны входят в состав атомов и молекул и удерживаются около своего положения равновесия значительными силами, излучение, обусловленное движением электронов, может иметь высокую частоту. В этом процессе внутренняя энергия тела превращается в энергию электромагнитного поля, при поглощении электромагнитных волн другим телом она вновь превращается в энергию теплового движения молекул. В нагретых металлах достаточно большое количество электронов являются свободными, электроны движутся и испытывают нерегулярное торможение, вследствие этого излучение металлов приобретает характер импульсов, причем в спектре металлов имеют место волны различной частоты.

С точки зрения квантовой теории лучистая энергия испускается и поглощается веществами не непрерывно, а отдельными дискретными порциями – квантами света или фотонами. Фотон обладает энергией, количеством движения и электромагнитной массой, поэтому тепловое излучение можно рассматривать как фотонный газ.

Таким образом, излучение имеет двойственный характер: помимо *волновых свойств* излучение обладает и *корпускулярными свойствами*. Соответственно этому излучение характеризуется длиной волны и частотой колебаний. Квантовые свойства проявляются наиболее отчетливо в коротковолновом излучении, а характерные волновые свойства имеются у радиоволн. Все виды электромагнитного излучения имеют одинаковую природу и различаются лишь длиной волны.

Процесс передачи тепла излучением можно разделить на три последовательных этапа: превращение внутренней энергии вещества в энергию электромагнитного излучения, перенос энергии в пространстве и поглощение излучения веществом. Лучистая энергия возникает главным образом за счет тепловой энергии и является ре-

зультатом сложных внутриатомных процессов. В тонком поверхностном слое материала происходит превращение внутренней энергии вещества в энергию электромагнитного излучения. Согласно квантовой теории вокруг положительного ядра атомной системы на определенных энергетических уровнях двигаются электроны. Возникновение электромагнитных волн происходит в результате изменения внутренней энергии вещества при перемещении электронов в силовом поле атома. Поглощение электрона атомом приводит к обратному электронному переходу.

Изоляторы и полупроводники электричества, металлы с окисленной, шероховатой поверхностью имеют сплошной (непрерывный) спектр излучения; металлы с полированной поверхностью, газы и пары характеризуются селективным (прерывистым) спектром излучения. В процессах лучистого теплообмена участвуют тонкие поверхностные слои, для непроводников теплоты они составляют около 1 мм, для проводников теплоты – 1 мкм. Полупрозрачные тела, пары и газы характеризуются объемным характером излучения. Интенсивность излучения тела зависит от его природы, температуры, длины волны, состояния поверхности; для газов – от толщины слоя и давления.

С увеличением температуры внутренняя энергия и энергия излучения увеличиваются, повышается интенсивность коротковолнового излучения и уменьшается интенсивность длинноволнового излучения.

Тепловое излучение обусловлено температурой и оптическими свойствами излучающего тела, поэтому оно подчиняется основным законам отражения, преломления и поглощения света. В чистом виде лучистый теплообмен имеет место в условиях глубокого вакуума.

В теплотехнике изучают электромагнитное излучение, возникновение которого определяется температурой и оптическими свойствами излучающего тела, т. е. световые и инфракрасные лучи с длиной волны от 0,5 до 800 мкм.

Энергия излучения, испускаемая произвольной поверхностью в единицу времени по всем направлениям полупространства, соответствующая узкому интервалу длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, называется *поток спектрального* или *однородного (монохроматического) излучения*. Суммарное излучение с поверхности по всем длинам волн спектра называется *интегральным* или *полным потоком излучения* Q .

Интегральный поток, испускаемый с единицы поверхности, носит название поверхностной плотности потока интегрального излучения:

$$E = \frac{dQ}{dF}.$$

Энергия, падающая на поверхность любого тела Q_0 , частично поглощается $Q_{\text{п}}$, отражается $Q_{\text{отр}}$, и частично проходит через тело $Q_{\text{пр}}$.

На основании закона сохранения энергии

$$Q_{\text{п}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{пр}} = Q_0.$$

Разделив правую и левую части уравнения на Q_0 , получим

$$\frac{Q_{\text{п}}}{Q_0} + \frac{Q_{\text{отр}}}{Q_0} + \frac{Q_{\text{пр}}}{Q_0} = 1$$

или

$$A + R + D = 1,$$

где A – коэффициент поглощения лучистой энергии телом;

R – коэффициент отражения лучистой энергии;

D – коэффициент тепловой прозрачности.

Если вся лучистая энергия, падающая на тело, поглощается, то такие тела называются *абсолютно черными*, для них $A = 1$, а $R + D = 0$. *Абсолютно белым* называется тело, отражающее всю падающую на его поверхность энергию. *Прозрачными*, или *диатермичными*, называются тела, пропускающие через себя все тепловые лучи. Абсолютно черных, белых и прозрачных тел в природе не существует. Большинство твердых тел в природе относятся к категории *серых*, т. е. к телам, имеющим те или иные значения коэффициентов поглощения и отражения, коэффициент теплопрозрачности для них $D = 0$.

Для поглощения и отражения тепловых лучей большое значение имеет не цвет, а шероховатость поверхности.

Газообразные вещества в большей или меньшей степени теплопрозрачны, т. е. для них $A + D = 1$, а $R = 0$.

Совместные процессы взаимного обмена излучением в системах различных тел называется *лучистым теплообменом*. *Результирующий поток* излучения, представляет собой разность между лучистым потоком, полученным данным телом, и лучистым потоком, который тело посылает в окружающее его пространство.

Основным вопросом при исследовании теплообмена излучением является определение количественного соотношения между отраженной, поглощенной и пропущенной через тело энергией электромагнитного излучения. В спектре излучения нагретого тела представлены лучи всех длин тепловых волн.

Законы теплового излучения получены применительно к идеальному абсолютно черному телу и термодинамическому равновесию (все тела, входящие в систему, имеют одинаковую температуру).

Испускание энергии по длинам волн происходит неравномерно и зависит от температуры.

Зависимость спектральной плотности потока излучения от длины волны и температуры для абсолютно черного тела устанавливается законом Планка:

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(\exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right)},$$

где λ – длина волны;

T – абсолютная температура тела;

$c_1 = 0,374 \cdot 10^{-15}$ Вт/м² и $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ м·К;

$E_{0\lambda}$ – спектральная плотность потока излучения; представляет собой отношение плотности потока излучения, испускаемого в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ к рассматриваемому интервалу длин волн $E_\lambda = dE/d\lambda$. Каждой длине волны соответствует свое значение $E_{0\lambda}$.

Согласно закону смещения Вина максимальное значение спектральной плотности потока излучения с повышением температуры сдвигается в сторону коротких длин волн. На основании закона Вина энергия светового излучения в диапазоне применяемых в технике температур пренебрежимо мала по сравнению с энергией инфракрасного излучения.

Для определения длины волны, на которую приходится максимум излучаемой энергии, необходимо найти первую производную уравнения Планка и приравнять ее равной нулю, тогда

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9 \cdot 10^{-6}}{T}.$$

Длина волны, на которую падает максимальная плотность излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре.

Закон Стефана–Больцмана устанавливает зависимость плотности потока интегрального полусферического излучения абсолютно черного тела от температуры поверхности этого тела:

$$E_0 = \sigma_0 T^4,$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная излучения абсолютно черного тела.

Для инженерных расчетов эту формулу чаще используют в виде

$$E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где $c_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Закон Стефана–Больцмана для серых тел:

$$E = c \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где $c = \varepsilon \cdot c_0$; здесь ε – степень черноты серого тела, характеризуется отношением интенсивности излучения серого тела и излучения абсолютно черного тела при одной и той же температуре.

Для серого тела этот закон является строгим в той мере, в какой постоянным, независящим от температуры, остается коэффициент теплового излучения. В действительности коэффициент теплового излучения зависит не только от температуры, но и от природы материала тела и его состояния поверхности (шероховатости):

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{c}{c_0} \leq 1.$$

Закон Стефана–Больцмана определяет количество энергии, излучаемое телом по всем направлениям.

Изменение излучения в зависимости от направления определяется *законом Ламберта*. Поток излучения в данном направлении пропорционален потоку излучения в направлении нормали к поверхности и косинусу угла между ними:

$$d^2 Q_\varphi = E_n d\Omega \cos\varphi dF_1.$$

Максимальное количество энергии поверхностью излучается в направлении нормали при $\varphi = 0$. Закон Ламберта строго справедлив для абсолютно черного тела, для серых тел опытами подтверждается только для $\varphi = 0-60^\circ\text{C}$.

Многие тела не подчиняются этому закону. Так, например, полированные металлы имеют яркость излучения при $60-80^\circ\text{C}$, превышающую яркость в направлении нормали к поверхности, с увеличением угла яркость падает до нуля.

Закон Кирхгофа устанавливает связь между собственным излучением тела и его поглощательной способностью. При термодинамическом равновесии отношение собственного излучения к поглощательной способности для всех тел одинаково и равно собственному излучению абсолютно черного тела при той же температуре:

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = E_0 = f(T).$$

Возможны и другие формы записи:

$$\frac{c_1}{A_1} = \frac{c_2}{A_2} = \dots = c_0;$$

$$A_1 = \varepsilon_1; A_2 = \varepsilon_2.$$

Т. е. при термодинамическом равновесии поглощательная способность и степень черноты тела численно равны.

В общем случае интенсивность теплообмена излучением между телами зависит от физических свойств их поверхностей и их взаимного расположения в пространстве.

Закон теплообмена излучением между плоскопараллельными поверхностями описывается уравнением

$$q = c_{\text{пр}} \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right), \quad (3)$$

где $c_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{пр}} c_0$.

В общем случае приведенная степень черноты определяется из выражения

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

При сопоставимых площадях, например, если одно тело находится внутри другого, отношение F_1/F_2 существенно влияет на величину $c_{\text{пр}}$. Так, при $F_1 \approx F_2$, значение $\varepsilon_{\text{пр}}$ вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1},$$

при $F_1 \ll F_2$ величина $\varepsilon_{\text{пр}} \approx \varepsilon_1$.

Газы также обладают способностью испускать и поглощать лучистую энергию. Однако одно- и двухатомные газы (O_2 , H_2 , Ar, N_2) для излучения практически прозрачны (диатермичны). Трехатомные газы и пары воды (CO_2 , SO_2 , CH_4 , H_2O и др.) обладают большой способностью излучать и поглощать энергию.

Излучение газов носит объемный (их поглощательная способность с увеличением плотности и толщины слоя газа увеличивается) и селективный характер (они излучают и поглощают энергию в определенных интервалах длин волн). Способностью отражать лучистую энергию газы не обладают.

Если в газе протекают реакции горения, то такую массу газов называют пламенем или факелом. Свечение и излучение пламени происходит за счет частиц углерода, образующихся в пламени, взвешенных частиц золы, сажи, шлака. Такие газы называют светящимися, их степень черноты находится в пределах 0,4–0,8, для несветя-

щихся газов $\varepsilon = 0,1-0,4$. Излучение этих частиц при значительной толщине пламени приближается к излучению абсолютно черного тела.

Для интенсификации процесса лучистого теплообмена необходимо повысить температуру излучающего тела или увеличить степень черноты системы тел. Снижение интенсивности достигается путем использования экранов.

Интенсивность излучения газа определяется его температурой, составом и эффективной толщиной слоя газа, зависящей от формы и размеров газового потока. С увеличением температуры ширина полос излучения увеличивается, а поглощательная способность уменьшается, так как уменьшается плотность газа.

Для защиты от теплового излучения устанавливают экраны, изготовленные из полированных металлических листов, фольги, других материалов, имеющих малую степень черноты. Установка одного экрана со степенью черноты $\varepsilon_3 = 0,1$ между поверхностями с $\varepsilon = 0,8$ дает снижение лучистого теплообмена приблизительно в 14 раз.

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕЛА

Цель работы: определить степень черноты серого тела.

Основные положения теории

В общем случае энергия нагретого тела будет передаваться теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

Представим себе, что имеются три тела, имеющих одинаковую геометрическую форму, размеры и температуру, но разные показатели степени черноты. Процессы теплопроводности и конвекции этих тел при постоянных условиях окружающей среды будут происходить с одинаковой интенсивностью. Разница в теплообмене тел с окружающей средой будет обусловлена только за счет теплового излучения. Таким образом будет исключено влияние теплопроводности и конвекции на общий теплообмен.

Используя тела небольших размеров по сравнению с помещением, можно записать уравнение Стефана–Больцмана с учетом соотношения $\varepsilon_{\text{пр}} \approx \varepsilon_1$:

$$q_a = \varepsilon_a c_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) F;$$

$$q_b = \varepsilon_b c_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) F;$$

$$q_c = \varepsilon_c c_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) F,$$

где T_1 – абсолютная температура тел, К;

T_2 – абсолютная температура помещения, К;

F – боковая поверхность тел;

$\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ – степень черноты первого, второго и третьего тела соответственно.

Величина излучательной способности первого тела считается известной. Величина ε_b или $c_b = \varepsilon_b c_0$ будет определяться в процессе эксперимента. Для поддержания постоянства температуры тел T_1 к ним необходимо подводить разное количество энергии. Если $\varepsilon_a > \varepsilon_b$, то

$$\Delta q = q_a - q_b = (\varepsilon_a - \varepsilon_b) c_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right),$$

$$\varepsilon_b = \varepsilon_a - \frac{\Delta q}{c_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)}.$$

Откуда можно определить ε_b .

Таким образом, задачами эксперимента будут являться:

– создание стационарных условий нагревания тел (a, b и c) с одинаковой поверхностью F и температурой T_1 ;

– определение плотности тепловых потоков q_a, q_b и q_c или Δq , необходимых для создания указанного выше условия.

Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 6.

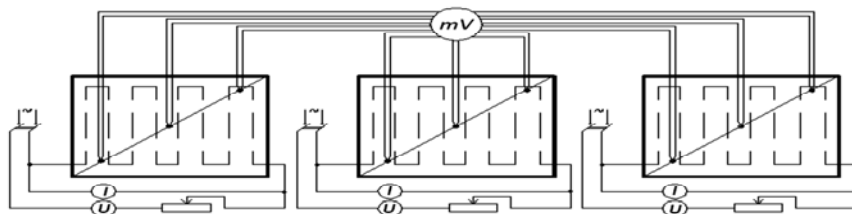


Рисунок 6 – Принципиальная схема лабораторной установки

Установка состоит из трех теплоизлучающих образцов. Каждый из теплоизлучающих элементов из двух одинаковых по размеру металлических пластин, между которыми смонтирован плоский электрический нагреватель. Поверхность одного образца покрыта слоем сажи ($\varepsilon \approx 0,95$) – это эталон. Поверхность двух других образцов отполирована. Степень черноты этих образцов необходимо определить.

Для определения мощности, потребляемой нагревателями, установлены вольтметры и амперметры. Температуры излучающих поверхностей измеряются с помощью термопар, зачеканенных в пластины и регистрируются с помощью милливольтметра. Для регулирования напряжения на нагревателях служат лабораторные трансформаторы.

Порядок проведения и обработка результатов экспериментов

Перед началом проведения эксперимента необходимо убедиться в исправности электрической цепи. После подключения установки к электрической сети с помощью автотрансформаторов устанавливается одинаковая температура на образцах. Периодический контроль температуры образцов производят при помощи милливольтметра. При достижении стационарного теплового режима на излучателях и одинаковой средней температуры на них фиксируют показания амперметров и вольтметров, полученные значения заносят в таблицу 6.

Таблица 6 – Результаты экспериментальных исследований

№ п/п	Образец 1					Образец 2					Образец 3					$T_B, \text{ }^\circ\text{C}$	
	$T_{\text{п}}, \text{ }^\circ\text{C}$			$I_1,$	$U_1,$	$T_{\text{п}}, \text{ }^\circ\text{C}$			$I_1,$	$U_1,$	$T_{\text{п}}, \text{ }^\circ\text{C}$			$I_1,$	$U_1,$		
	1	2	3			1	2	3			1	2	3				A

Обработка экспериментальных данных сводится к определению средней температуры образцов $T_{\text{изл}}$ и подстановке необходимых величин в выражение, которое в конечной форме может быть записано

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 - \frac{I_1 U_1 - I_2 U_2}{c_0 F \left(\left(\frac{T_{\text{изл}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_B}{100} \right)^4 \right)}.$$

Аналогично определяется степень черноты третьего образца. Размеры образцов 160×160 мм.

Контрольная задача

Рассчитать тепловой поток излучением от стальной окисленной трубы наружным диаметром $d = 0,1$ м, общей длиной 10 м, используемых для отопления помещения с температурой стен $t_2 = 20$ °С. Температура стенки трубы $t_1 = 80$ °С.

Решение

Учитывая, что площадь поверхности трубы F_1 много меньше площади стен помещения F_2 , имеем $\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_1$. Для окисленной стали $\varepsilon_1 = 0,8$. Тогда при площади трубы

$$\begin{aligned} F &= \pi dl = 3,14 \cdot 0,1 \cdot 10 = 3,14 \text{ м}^2, \\ Q_{1,2} &= \varepsilon_1 c_0 F_1 \left(\left(T_1/100 \right)^4 - \left(T_2/100 \right)^4 \right) = \\ &= 0,8 \cdot 5,67 \cdot 3,14 \left((353/100)^4 - (293/100)^4 \right) = 1162 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Вопросы для самопроверки

1. Объясните физическую сущность теплового излучения.
2. Что является источником излучения тепловой энергии?

3. Какие длины волн характерны для теплового излучения?
4. Что такое абсолютно черное, белое и диатермичное тело?
5. Какие зависимости устанавливаются законами Стефана–Больцмана и Вина?
6. Объясните смысл закона Кирхгофа.
7. Как определяют лучистый поток между параллельными плоскими поверхностями, чему равен приведенный коэффициент излучения для этого случая?
8. Как определяют лучистый поток при расположении одного тела внутри другого?
9. Для чего нужны экраны и какими свойствами они должны обладать?
10. В чем состоит различие между излучением газа и поверхностью твердого тела?
11. Какие газы излучают и поглощают энергию излучения?
12. Почему с увеличением содержания углекислого газа в атмосфере Земли при сжигании больших количеств органического топлива возможно потепление климата?
13. В чем отличие газового излучения от излучения твердых тел.

СЛОЖНЫЙ ТЕПЛООБМЕН И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

В технологических процессах литейного производства теплообмен включает в себя одновременно протекающие процессы теплопроводности, конвекции и излучения. С целью упрощения расчетов обычно результат совокупного действия процессов приписывают главному из них.

В случае, если наряду с конвективным теплообменом происходит процесс теплового излучения, а роль теплопроводности незначительна, количественной характеристикой интенсивности процесса теплообмена является суммарный коэффициент теплоотдачи $\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_l$, где α_l – коэффициент теплоотдачи излучением.

Если в качестве основного принимают конвективную составляющую процесса, расчетная формула имеет следующий вид:

$$q_0 = (\alpha_k + \alpha_l)(T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}) = \alpha_0(T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}).$$

Если преобладает процесс теплового излучения, суммарную теплоотдачу рассчитывают по формуле

$$q_0 = (\varepsilon_k + \varepsilon) c_0 \left(\left(\frac{T_{\text{ж}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right).$$

Конвективная составляющая процесса учитывается увеличением приведенной степени черноты системы:

$$\varepsilon_k = \frac{\alpha_k (T_{\text{ж}} - T_{\text{с}})}{c_0 \left(\left(\frac{T_{\text{ж}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right)}.$$

При теплообмене поверхности твердого тела с потоком капельной жидкости в качестве основного принимают процесс конвекции, при этом α_k учитывает совместное действие конвекции и теплопроводности.

В капиллярно пористых телах в качестве основного принимают теплопроводность, а значение коэффициента теплопроводности включает влияние конвекции и излучения в порах и капиллярах.

Для того чтобы интенсифицировать процесс теплопередачи необходимо установить вклад отдельных составляющих термических сопротивлений, существенное влияние будет иметь уменьшение наибольшего из слагаемых. Так, например, в процессе передачи теплоты от капельной жидкости через металлическую стенку к газу наибольшее термическое сопротивление имеет место в процессе теплоотдачи от газа к стенке. Интенсифицировать процесс можно за счет увеличения скорости движения теплоносителя или путем оребрения поверхности стенки, теплоотдача от которой наименее интенсивна. Искусственная шероховатость оказывает влияние на гидродинамику турбулентного потока за счет улучшения перемешивания. При увеличении площади поверхности стенки термическое сопротивление теплоотдачи $R = 1/\alpha F$ уменьшается, и соответственно уменьшается значение термического сопротивления теплопередачи. Для цилиндрической стенки термическое сопротивление теплоотдачи определяется как $R = 1/\alpha d$, сферической – $R = 1/\alpha d^2$.

Уменьшить термическое сопротивление стенки δ/λ , возможно за счет уменьшения ее толщины или использования более теплопроводного материала. Интенсифицировать процесс теплообмена при тепловом излучении можно за счет повышения степени черноты и температуры излучающей поверхности.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Тепловые процессы, характеризующиеся изменением температурного поля во времени, называются *нестационарными*. Нестационарные процессы теплопроводности являются составной частью процессов тепло- и массопереноса. Так, например, процесс передачи тепла в песчано-глинистой форме, представляющей собой капиллярно-пористое тело, осуществляется теплопроводностью, конвекцией и излучением. На процесс теплопроводности оказывают влияние свойства самого материала (частиц) и термическое сопротивление зон контактов отдельных зерен песка друг с другом. Связующие материалы за счет увеличения зон контактов между частицами могут значительно уменьшить термическое сопротивление всей формы. С повышением температуры, несмотря на то что теплопроводность материала формы уменьшается, эффективная теплопроводность может увеличиваться, так как увеличивается количество тепла, передаваемого излучением. Большое количество тепла переносится посредством конвекции при кипении и конденсации влаги в нагревающейся (охлаждающейся) форме. Переход влаги из жидкого в газообразное состояние сопровождается поглощением теплоты и повышением давления в капиллярной структуре тела. Фильтрация влаги и газов, вызываемая градиентом температур, концентраций и давлений, оказывает значительное влияние на формирование температурного поля. Каждый из видов переноса имеет сложную физическую природу и в различные периоды времени может изменять в общем балансе количество передаваемой теплоты.

Система уравнений, описывающая процессы тепло- и массопереноса во влажных телах, должна учитывать все действующие потенциалы (температуру, концентрацию и давление) и дополнительные внутренние источники (стоки) этих потенциалов. Однако решение системы уравнений в общем виде весьма затруднительно.

Основной целью решения задач нестационарной теплопроводности является определение зависимости изменения температуры и количества переданной теплоты во времени для любой точки тела.

Процесс нагрева или охлаждения тела можно условно разделить на три периода. В первый период скорость изменения температуры в отдельных точках различна, температурное поле существенно зависит от начального теплового состояния тела. С течением времени относительная скорость изменения температур во всех точках тела становится постоянной, наступает упорядоченный или регулярный тепловой режим. В течение этого времени температура изменяется по экспоненциальному закону. При достижении постоянства распределения температур наступает третий период – стационарного режима.

Недостатком аналитического метода является громоздкость полученных решений, даже для тел простой формы, так как его целью является получение общей зависимости сразу для всех трех периодов.

При расчете температурного поля необходимо получить решение, которое было бы справедливо для конкретных условий задачи. Для этого необходимы дополнительные данные, называемые условиями однозначности, и заданные граничные условия. Температурное поле тела зависит от большого числа параметров. Анализ решений показывает, что эти параметры можно сгруппировать в две безразмерные величины, рассчитываемые по формулам, приведенным ниже.

Критерий Био характеризует относительную интенсивность теплообмена между телом и средой:

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

где α – коэффициент теплоотдачи;

l – характерный размер тела;

λ – коэффициент теплопроводности тела.

Критерий Фурье (критерий гомохронности) характеризует одинаковость протекания процессов во времени:

$$Fo = \frac{at}{\delta^2},$$

где a – коэффициент температуропроводности тела;

t – текущее время;

δ – характерный размер тела; при двухстороннем нагреве δ – половина толщины пластины для цилиндра; для шара – $\delta = r$.

Искомая функция в виде безразмерной температуры v/v' в различных сходственных точках $L = x/l$ может быть представлена в виде

$$\frac{v}{v'} = f(\text{Bi}, \text{Fo}, L).$$

Решения дифференциального уравнения теплопроводности в безразмерном виде, полученные для тел простой формы, табулированы, по ним построены номограммы. Аналогичные графики построены и для количества теплоты, участвующего в процессе:

$$\frac{Q}{Q_0} = f(\text{Bi}, \text{Fo}),$$

где Q – количество теплоты, полученное или отданное телом в данный момент времени;

Q_0 – начальное теплосодержание тела при $T = T_0$:

$$Q_0 = c\rho V(T_0 - T_c) = c\rho V\theta_0,$$

где $\theta_0 = T_0 - T_c$.

Для плоской стенки

$$Q_0 = c\rho 2F\delta\theta_0,$$

для цилиндрической

$$Q_0 = c\rho\pi r^2 l\theta_0,$$

для шара

$$Q_0 = \frac{4}{3}c\rho\pi r^3\theta_0.$$

Наиболее часто на практике встречаются два типа задач. По заданному моменту времени необходимо определить температуру тела при нагревании или охлаждении либо по заданной температуре установить время выхода тела на эту температуру.

Для первого варианта вначале определяем значение критерия Bi . По графику находим полученное значение, проводим вертикальную

черту. Вычисляем критерий F_0 , подставляем время и все остальные параметры. Находим точку пересечения кривой критерия F_0 с вертикальной чертой – получаем температуру $\theta_{ц}$. Подставляя значения T_c и T_0 , находим температуру центра $T_{ц}(t)$. Далее определяем количество приобретенной или потерянной теплоты в данный момент времени. Подставляем Q_0 и определяем Q .

Во втором варианте необходимо определить время выдержки заготовки в печи до выхода ее на температуру соответствующую температуре обработки. Первоначально рассчитываем значение критерия Vi и безразмерную температуру. Из графика находим критерий F_0 , а из него время t .

В настоящее время для решения технических задач нестационарной теплопроводности наиболее часто используют методы конечных разностей и конечных элементов. Известны экспериментальные методы, основанные на гидротепловой и электротепловой аналогии распространения теплоты при ламинарном движении жидкости и электрическими процессами.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА

Цель работы: построить нестационарное температурное поле в полуограниченном теле.

Основные положения теории

Строго говоря, стационарных тепловых процессов, сопровождающихся неизменным температурным полем тела, на практике не встречается. Тепловые источники (стоки) существуют повсюду.

Нестационарные тепловые режимы наиболее характерно проявляются при нагреве и охлаждении тел, плавлении шихты, затвердевании отливок. Исследуя тот или иной тепловой режим, мы неизбежно встречаемся с необходимостью изучения температурного поля, изменяющегося во времени.

При отсутствии внутренних источников (стоков) теплоты и массопереноса в исследуемом материале нестационарное температурное поле описывается уравнением

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

Решение этого уравнения в общем виде не существует, и в литературе приводятся лишь частные случаи таких решений для ограниченного числа тел и граничных условий переноса теплоты.

Известны геометрические тела, для которых получены решения – неограниченное тело, полуограниченное тело, бесконечная пластина, бесконечный цилиндр и шар.

При исследовании процессов в телах другой формы последние либо преобразуют (упрощают) к вышеперечисленным формам, либо делят на элементы простейших тел, получая при этом приближенные результаты.

В настоящей работе изучается одномерное температурное поле материала при создании известного (определяемого) теплового потока.

Граничные и начальные условия для поставленной задачи записываются следующим образом:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x_{x=0}} = q = \text{const};$$

$$T_{\tau=0} = T_0;$$

$$T_{x=\infty} = T_0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_{x=\infty}} = 0.$$

Решение уравнения может быть представлено в виде

$$T - T_0 = 1,128 \frac{q\sqrt{t}}{\sqrt{\lambda c \rho}},$$

что дает при постоянных значениях λ , c , ρ линейную зависимость между избыточной температурой $T - T_0$ и $\sqrt{\tau}$. Из этого соотношения можно определить тепловую активность материала:

$$b = \sqrt{\lambda c \rho}.$$

Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 7.1.

Исследуемый стержень 1, изготовленный из жидкостекольной смеси, помещается в форму, имеющую вид параллелепипеда, в центре которой установлен плоский электрический нагреватель 2. Боковые поверхности формы тщательно теплоизолируются. По сечению параллелепипеда установлен ряд термпар с шагом 5 мм. Термодпары подключены к автоматическому регистрирующему прибору 3.

Питание электрического нагревателя осуществляется с помощью лабораторного трансформатора 4, параметры электрического тока фиксируются вольтметром и амперметром.

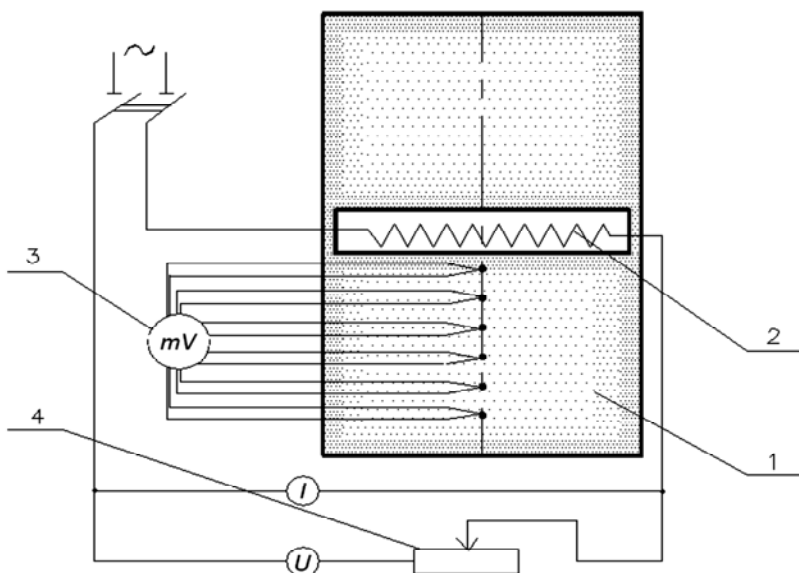


Рисунок 7.1 – Принципиальная схема установки

Проведение эксперимента и обработка результатов измерений

После проверки работоспособности приборов и электрической сети необходимо убедиться в соблюдении начальных условий, т. е. в постоянстве температуры по оси образца материала T_0 и равенстве ее температуре окружающей среды T_c .

При включении нагревателя через равные промежутки времени (например, 3 мин) производят фиксацию температур образца. Количество измерений ограничивается моментом времени, когда последняя термопара будет давать отличную от T_0 температуру.

Мощность нагревателя определяется по показаниям амперметра и вольтметра. Результаты измерений заносят в таблицу 7.

Таблица 7 – Результаты экспериментальных исследований

№ п/п	Время от начала измерений τ , мин	Температура в точках, °C					Параметры нагревателя	
		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	I , А	U , В

На основании полученных результатов строят графики изменения $T = f(x)$ и $\theta = (T - T_c) = f(\tau)$.

По указанию преподавателя для нескольких точек и для разных моментов времени определить коэффициент тепловой активности по формуле

$$b = \sqrt{\lambda c \rho} = \frac{1,128\sqrt{t}}{T - T_c}.$$

Полученные значения b усреднить и сравнить с величиной, полученной с помощью табличных значений λ , c , ρ .

Контрольные задачи

Задача 1. Длинный стальной вал диаметром $d = 2r = 120$ мм, который имел начальную температуру $t_0 = 20$ °C, поместили в печь

с температурой $t_{ж} = 820$ °С. Определить время, необходимое для нагрева вала, нагрев считается законченным, когда температура на оси вала $t_{r=0} = 800$ °С. Определить также температуру на поверхности вала в конце нагрева. Коэффициент теплопроводности стали $\lambda = 21$ Вт/(м·°С), температуропроводности $a = 6,11 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Коэффициент теплоотдачи к поверхности $\alpha = 140$ Вт/(м²·°С).

Решение

Температуры в середине и на поверхности вала при нагревании в среде с постоянной температурой можно определить с помощью графиков, представленных на рисунках 7.2, 7.3.

Искомое время нагрева τ входит в число Фурье. Для его определения воспользуемся графиком, представленным на рисунке 7.2, $\theta_{r=0} = f_1(Bi, Fo)$, где $\theta_{r=0}$ – безразмерная температура для оси цилиндра.

$$\theta_{r=0} = \frac{t_{ж} - t_{r=0}}{t_{ж} - t_0},$$

где $t_{ж}$ – температура в печи;

t_0 – начальная температура цилиндра;

$t_{r=0}$ – температура на оси вала.

$$\theta_{r=0} = \frac{820 - 800}{820 - 20} = 0,025;$$

Число БиО

$$Bi = \frac{\alpha \cdot r_0}{\lambda} = \frac{140 \cdot 0,06}{21} = 0,4;$$

При этих значениях Bi и $\theta_{r=0}$ по графику (рисунок 7.2) находим значение числа Фурье: $Fo = 5,2$.

Зная значение критерия Фурье, находим время:

$$\tau = \frac{Fo \cdot r_0^2}{a} = \frac{5,2 \cdot 0,06^2}{6,11 \cdot 10^{-6}} = 3064 \text{ с} = 51 \text{ мин.}$$

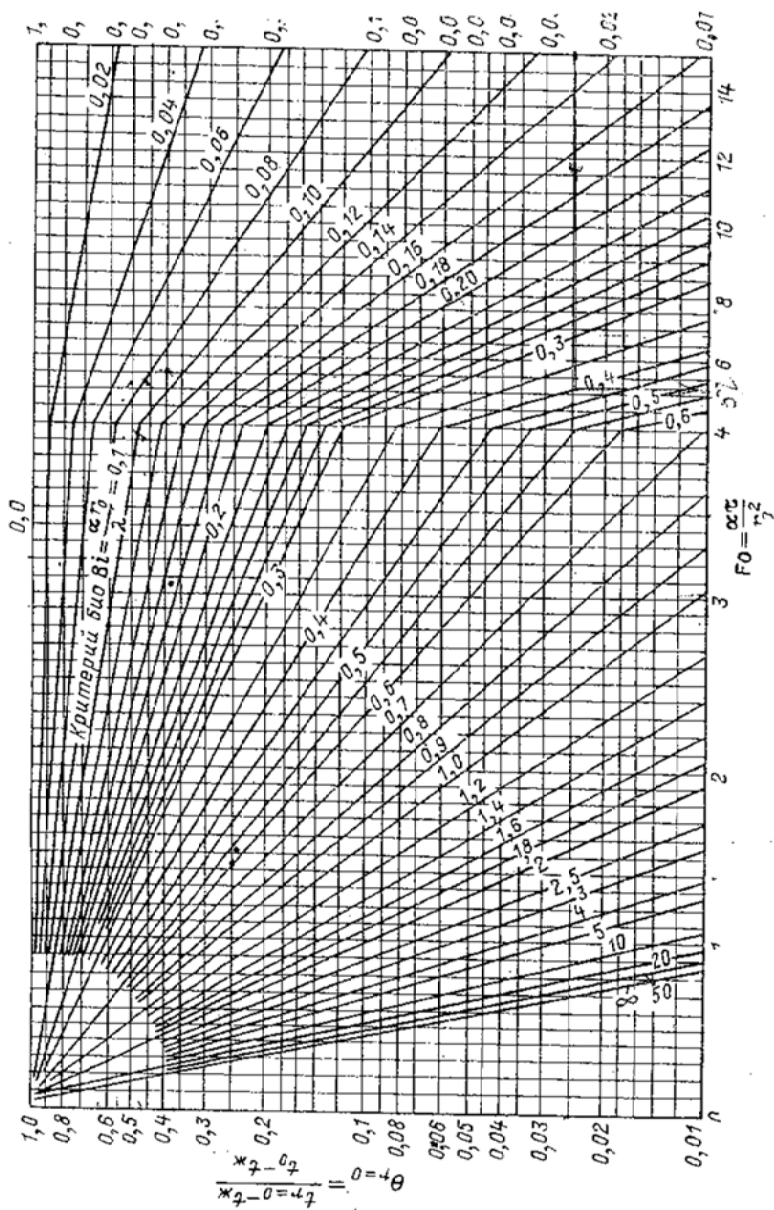


Рисунок 7.2 – Зависимость $\theta = F_1(Fo, Bi)$ для оси цилиндра

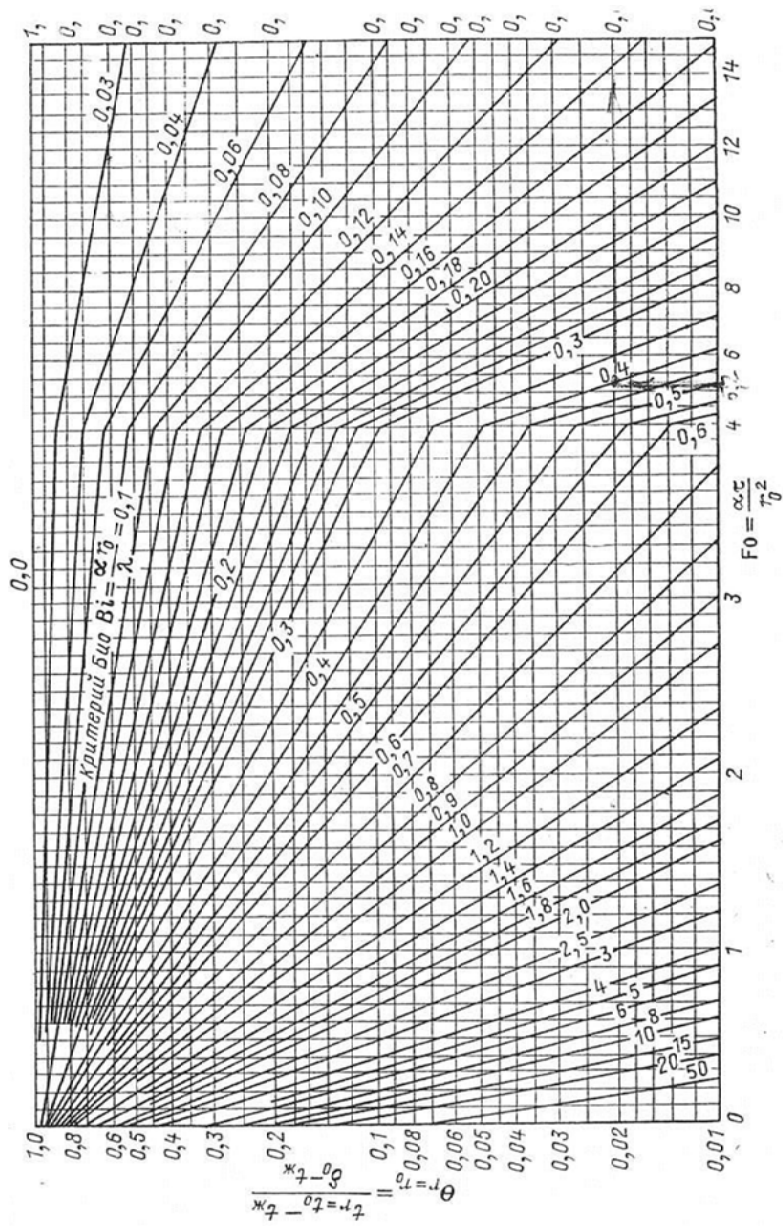


Рисунок 7.3 – Зависимость $\theta = F_2(Fo, Bi)$ для поверхности цилиндра

Для определения температуры на поверхности вала $t_{r=r_0}$ в конце нагрева найдем безразмерную температуру на поверхности при $Bi = 0,4$ и $Fo = 5,2$ по графику (рисунок 7.3):

$$\theta_{r=r_0} = \frac{t_{ж} - t_{r=r_0}}{t_{ж} - t_0} = 0,02.$$

Откуда

$$t_{r=r_0} = t_{ж} - 0,02(t_{ж} - t_0) = 820 - 0,02(820 - 20) = 804 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Задача 2. Пластину толщиной $2\delta = 20$ мм, нагретую до температуры $t_0 = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$, помещают в воздушную среду с температурой $t_{ж} = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$. Определить температуру в середине и на поверхности пластины через $\tau = 20$ мин после начала охлаждения. Коэффициент теплопроводности материала пластины $\lambda = 0,175 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, температуропроводности $a = 0,833 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины в окружающую среду $\alpha = 65 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Решение

Температуры в середине и на поверхности безграничной пластины при охлаждении в среде с постоянной температурой можно определить с помощью графиков $\theta_{x=0} = F_1(Fo, Bi)$ и $\theta_{x=\delta} = F_2(Fo, Bi)$.

В рассматриваемом случае

$$Bi = \frac{\alpha\delta}{\lambda} = \frac{65 \cdot 0,01}{0,175} = 3,73;$$

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2} = \frac{0,833 \cdot 10^{-7} \cdot 1200}{(0,01)^2} = 1,0.$$

При этих значениях критериев Bi и Fo по графику (рисунок 7.4) находим $\theta_{x=0} = 0,26$ и по графику (рисунок 7.5) $\theta_{x=\delta} = 0,083$.

Безразмерная температура

$$\theta = \frac{t - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}},$$

следовательно

$$t_{x=0} = t_{ж} + \theta_{x=0}(t_0 - t_{ж}) = 15 + 0,26(140 - 15) = 47,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

и $t_{x=\delta} = t_{ж} + \theta_{x=\delta}(t_0 - t_{ж}) = 15 + 0,083(140 - 15) = 25,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$

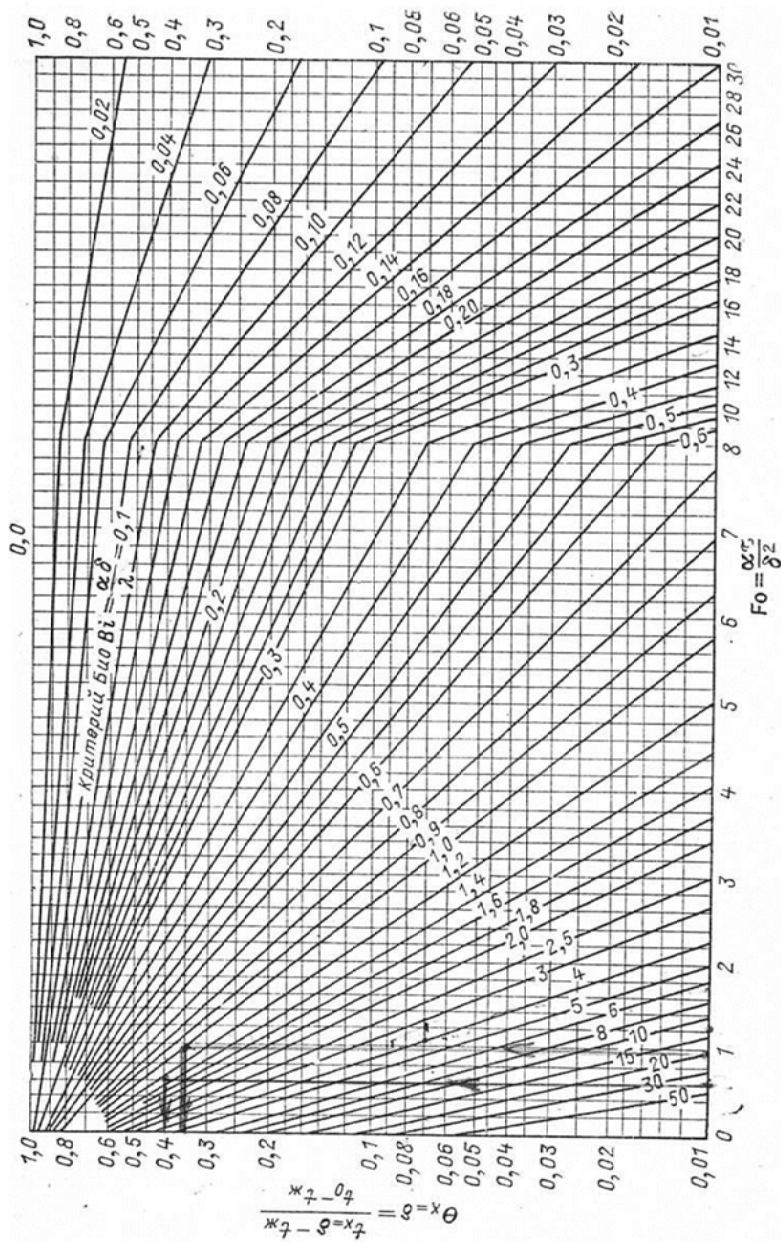


Рисунок 7.4 – Зависимость $\theta = f_1(Fo, Bi)$ для середины тонкой пластины

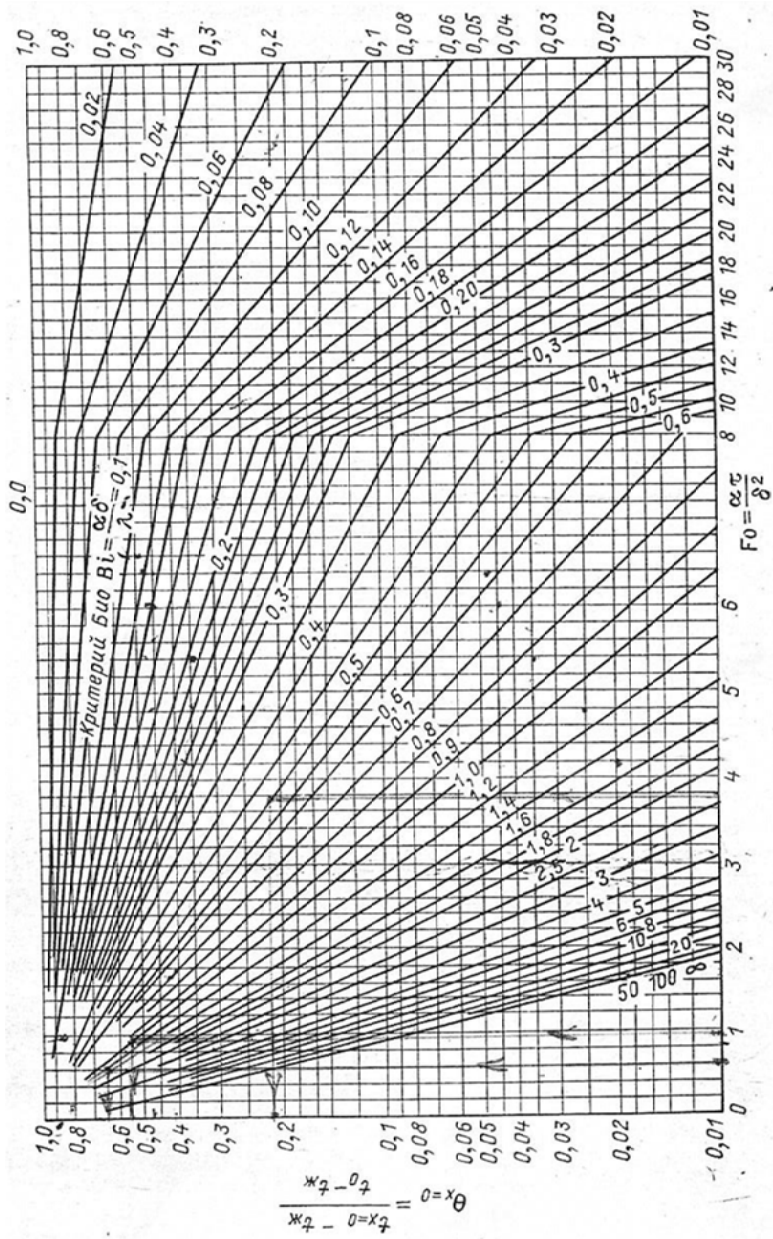


Рисунок 7.5 — Зависимость $\theta = f_2(Fo, Bi)$ для поверхности тонкой пластины

Вопросы для самопроверки

1. Что называется нестационарным температурным полем?
2. Дифференциальное уравнение теплообмена и граничные условия для нестационарного режима.
3. Из каких критериев подобия составляются уравнения температурного поля?
4. Каким образом можно определить температуру поверхности пластины, температуру в середине пластины и количество теплоты отводимое от поверхности при ее охлаждении?
5. Чем характеризуется регулярный тепловой режим?
6. Физический смысл критериев Bi , Fo .

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ

Основные понятия

Если процессы теплообмена между жидкостью и поверхностью тела происходят при температуре, близкой к температуре насыщения, они могут сопровождаться образованием паровой фазы, этот процесс называется кипением. Теплообмен при кипении жидкости сопровождается изменением агрегатного состояния вещества, дополнительным переносом массы вещества и теплоты паровыми пузырями из пограничного слоя в объем кипящей жидкости.

Для возникновения процесса кипения необходимо наличие центров парообразования (неровности поверхности теплообмена, пузырьки воздуха, различного рода включения) и температуры перегрева жидкости, превышающей температуру насыщения. Величина перегрева зависит от свойств жидкости, ее чистоты, давления, а также свойств поверхности.

Теплота, расходуемая на парообразование

$$Q = rG,$$

где Q – количество теплоты, Дж;

r – теплота фазового перехода жидкости, Дж/кг;

G – количество пара, кг.

Различают *кипение жидкости на твердой поверхности теплообмена, кипение в объеме жидкости и смешанное кипение*. Поверхностное кипение происходит при подводе теплоты к кипящей жидкости через поверхность нагрева.

При объемном кипении паровая фаза возникает самопроизвольно в объеме жидкости, например, в перегретой жидкости при быстром снижении ее давления или при наличии в жидкости внутренних источников теплоты. Процесс смешанного кипения происходит как на поверхности нагрева, так и в объеме.

Различают *пузырьковый, переходный и пленочный режим кипения*.

Режим пузырькового кипения наблюдается при превышении температуры поверхности над температурой насыщения на 25–35 °С. Использование вынужденного движения жидкости позволяет увеличить этот предел до 40–50 °С. Если температура основной массы жидкости ниже температуры насыщения, может происходить обратная конденсация паровых пузырей. Интенсивность теплообмена при пузырьковом кипении зависит от скрытой теплоты испарения, теплоемкости, теплопроводности и вязкости жидкости, материала, строения и микрошероховатости поверхности нагрева, наличия на ней неоднородностей состава, адсорбированного поверхностью газа и т. д.

Шероховатость поверхности повышает коэффициент теплоотдачи в несколько раз, так как этот параметр определяет число действующих центров парообразования. Работоспособными центрами являются лишь те впадины и углубления, которые способны адсорбировать растворенный в жидкости пар или газ. Оптимальной границей шероховатости приближенно можно считать чистоту поверхности около шестого–седьмого класса (средняя глубина впадин 5–10 мкм).

Теплообмен с увеличением коэффициента теплопроводности возрастает вследствие уменьшения термического сопротивления микрослоя жидкости под паровыми пузырьками и увеличения скорости их роста.

Кроме того, большое влияние на образование паровых пузырьков оказывает поверхностное натяжение на границе раздела поверхности нагрева и жидкости. С увеличением температуры величина поверхностного натяжения падает.

Интенсивность теплообмена при кипении повышается с увеличением давления, так как уменьшаются размеры пузырька в момент

возникновения и отрыва, увеличивается число центров и частота отрыва пузырей в этих центрах, в результате происходит увеличение турбулентности жидкости.

Эффект является существенным при незначительных перегревах жидкости относительно температуры насыщения. Основная доля теплоты от поверхности нагрева передается жидкости и в незначительной части пару. Высокая интенсивность теплоотдачи при пузырьковом режиме кипения позволяет отводить от поверхности нагрева достаточно большие плотности теплового потока.

Пройдя максимум (первая критическая плотность теплового потока $q_{кр1} = 1,45 \text{ МВт/м}^2$, $\alpha_{кр1} = 58 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{К}$), плотность теплового потока снижается – на смену пузырьковому режиму кипения приходит переходный: на поверхности образуется пленка пара, которая отделяет поверхность от жидкости.

Характерной особенностью второго, переходного режима кипения, является снижение величины коэффициента теплоотдачи. Вследствие слияния пузырьков, образования больших паровых полостей происходит уменьшение эффективной поверхности, участвующей в теплообмене за счет образования «сухих» пятен.

В момент, когда температура поверхности значительно превышает температуру насыщения и поверхность нагрева покрывается сплошной пленкой пара, наступает пленочный режим кипения. Движение паровой пленки при пленочном режиме кипения может быть ламинарным, волновым и турбулентным. Перенос теплоты при пленочном режиме кипения в основном происходит путем конвекции и излучения, причем лучистая составляющая переноса теплоты резко увеличивается по мере увеличения перегрева жидкости. Конвективный теплообмен и излучение оказывают влияние друг на друга, так как пар, образующийся благодаря излучению, приводит к утолщению паровой пленки и соответствующему уменьшению интенсивности переноса теплоты за счет конвекции.

Теплопроводность пара значительно меньше теплопроводности жидкости, поэтому интенсивность теплообмена при пленочном режиме кипения во много раз ниже, чем при пузырьковом. В связи с этим при переходе от пузырькового режима кипения к пленочному происходит значительное увеличение температуры поверхности нагрева. Толщина пленки зависит от условий движения жидкости, размеров, формы поверхности нагрева и ее расположения в простран-

стве. Интенсивность теплообмена низкая: определяется термическим сопротивлением паровой пленки. Минимальное значение тепловой нагрузки при пленочном кипении называется второй критической плотностью теплового потока. Момент начала пленочного кипения характеризуется температурным напором $\Delta T = T_c - T_s \approx 150 \text{ }^\circ\text{C}$. Средний коэффициент теплоотдачи составляет $100 - 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ }^\circ\text{C})$.

Переход из одного режима кипения в другой нельзя характеризовать точными значениями критического теплового потока, так как его величина зависит от физических свойств жидкости, материала и состояния поверхности нагрева.

Процесс перехода пара (газа) в жидкое или твердое состояние называется *конденсацией*. Теплообмен при конденсации представляет собой сложное явление, связанное с фазовым переходом паров в жидкое состояние, одновременным переносом теплоты и массы. Пар, соприкасающийся с жидкостью и находящийся с ней в термодинамическом равновесии, называют насыщенным. В момент испарения последней капли жидкости в ограниченном пространстве без изменения температуры и давления образуется сухой насыщенный пар. Состояние этого пара определяется давлением, удельным объемом и температурой.

Процесс конденсации происходит при докритических состояниях газа (пара), когда при достигнутых значениях температуры и давления, конденсированная фаза термодинамически более устойчива, чем газообразная. Если температура и давление больше их значений, соответствующих тройной точке для данного вещества, образуется жидкая фаза, если меньше – пар переходит в твердое состояние. *Переход вещества из газообразного состояния в твердое (минуя жидкое) называется десублимацией*.

Конденсация происходит как в объеме пара при значительном переохлаждении пара относительно температуры насыщения, так и при введении в пар холодных жидких или твердых частиц, являющихся центрами парообразования.

Количество перенесенной массы определяется количеством сконденсированного пара, а переданная теплота (при условии насыщенного пара) – теплотой парообразования.

В зависимости от состояния поверхности и свойств окружающей среды конденсат образуется на поверхности в виде отдельных ка-

пель (капельная конденсация) или в виде сплошной пленки жидкости (пленочная конденсация). Вид конденсации зависит от чистоты пара, состояния поверхности и свойств окружающей среды, а также от того, смачивается ли жидкостью поверхность тела или нет.

В начальный момент рост капель идет с высокой скоростью. По мере увеличения размера капель скорость их роста постепенно снижается. Общая плотность капель на поверхности конденсации увеличивается по мере возрастания температурного напора. При малых значениях температурного напора капельки конденсата зарождаются на микроуглублениях и других элементах неоднородности поверхности. Из-за очень высокой интенсивности теплоотдачи при капельной конденсации очень чувствительна даже к ничтожным примесям в паре неконденсирующихся газов.

Возможно изменение картины конденсации от капельной к струйной и далее к поточной, сплошь закрывающей поверхность. Интенсивность теплоотдачи при конденсации пара достаточно высока и зависит от содержания примесей в газе, например, воздуха, неконденсирующихся газов, которые накапливаются у поверхности и препятствует поступлению пара к поверхности. Присутствие газа представляет дополнительное термическое сопротивление процессу передачи тепла. Так как при капельной конденсации сохраняется непосредственный контакт пара с охлаждающей поверхностью, интенсивность теплоотдачи в 15–20 раз больше, чем при пленочной конденсации.

В процессе пленочной конденсации перенос теплоты при ламинарном движении жидкости осуществляется теплопроводностью. Толщина пленки может быть намного больше расстояния эффективного действия межмолекулярных сил. Толщина конденсатной пленки зависит от высоты стенки H , вязкости жидкости ν и ускорения силы тяжести g .

Комплекс этих величин представляет критерий Галилея:

$$Ga = \frac{gH^3}{\nu^2}.$$

Теплофизические свойства пленки учитываются критерием Прандтля. Из уравнения теплового баланса, используя теорию подобия, можно получить критерий

$$K = \frac{r}{c\Delta T},$$

где $\Delta T = T_{\text{ж}} - T_{\text{п}}$.

Экспериментальные исследования позволили получить следующие расчетные формулы для определения среднего коэффициента теплоотдачи при конденсации пара:

– вертикальная плоская стенка или труба, высотой H :

$$\text{Nu} = 0,42K^{0,28} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25};$$

– горизонтальная труба диаметром d :

$$\text{Nu} = 0,72K^{0,25} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25}.$$

Одним из распространенных процессов изменения агрегатного состояния веществ является *испарение* – переход среды в газообразное состояние. На практике наиболее часто мы наблюдаем процесс перехода среды из жидкого в газообразное. Причиной испарения жидкости со свободной поверхности является тепловое движение ее молекул. В процессе нагревания жидкости до соответствующей температуры в ней появляются молекулы, обладающие энергией, позволяющей преодолеть им силы сцепления и уйти в окружающую среду. Часть молекул после столкновения возвращается к поверхности испарения, проникает внутрь поверхностного слоя жидкости и остается в ней. Другая часть отражается от поверхности жидкости и уходит в окружающую среду.

Интенсивность процесса характеризуется *коэффициентом испарения* – отношением числа молекул, оставшихся в газе, к общему числу молекул, первоначально покинувших жидкость.

Аналогично с испарением жидкости возможно испарение твердого тела, такой процесс, называется *сублимацией*. Процесс возможен, если температура твердого тела и давление паров материала над поверхностью будут меньше его температуры и давления паров в тройной точке фазовой диаграммы. В качестве сублимирующей

фазы могут выступать различные материалы, в определенных условиях все вещества могут сублимировать. Испарение жидкости происходит как за счет внутренней энергии, так и за счет конвективного потока теплоты, передаваемого от парогазовой среды к жидкости. Температура жидкости падает до температуры парогазовой среды, теплоотдача в этот момент прекращается, однако испарение продолжается, падает и температура жидкости. С увеличением разности температур величина теплового потока возрастает. При достижении равенства теплового потока от парогазовой среды к жидкости и потока, отводимого от поверхности жидкости с паром, температура поверхности жидкости не будет изменяться.

Процессом адиабатного испарения называется процесс, при котором вся теплота, переданная от парогазовой среды к жидкости, затрачивается на ее испарение и возвращается в парогазовую среду с паром. Температуру поверхности жидкости, при которой реализуется процесс адиабатного испарения, называют *температурой мокрого термометра*, ее можно определить из условия теплового баланса.

Вопросы для самопроверки

1. Какие режимы кипения вам известны?
2. Какие факторы оказывают влияние на интенсивность теплообмена при пленочном режиме кипения?
3. Что вы знаете о теплообмене при конденсации водяного пара?
4. Какие виды конденсации существуют и чем они отличаются друг от друга?
5. Почему коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации меньше, чем при капельной?
6. Почему в сауне с температурой более 100 °С человек может находиться довольно долго, а в кипящей воде нет?
7. Каким образом можно интенсифицировать теплоотдачу при конденсации пара на вертикальной трубе?

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ

Цель работы: определить коэффициент теплоотдачи при кипении жидкости.

Основные положения теории

Теплообмен при фазовых переходах, в частности при кипении воды, отличается высокой интенсивностью. Величина коэффициента теплоотдачи α при свободной конвекции зависит от удельного теплового потока, изменяющегося режима кипения и носит весьма сложный характер.

Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи основано на решении уравнения теплового баланса

$$cm\Delta T = Q = \alpha F(T_1 - T_2)\tau.$$

Здесь в левой части – теплота, отдаваемая нагретым телом за время τ , а ΔT представляет собой разность средних температур нагретого тела в начальный момент времени и в конце периода τ ; в правой части – количество теплоты, принятое нагреваемой жидкостью и переданное нагретым телом конвективным путем.

Следует подчеркнуть, что процесс охлаждения погружаемого тела в воду нестационарен, неравномерно и температурное поле в жидкости. В связи с этим необходимо обеспечить точное определение средней температуры тела и жидкости в любой момент времени.

Описание лабораторной установки

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рисунке 8.

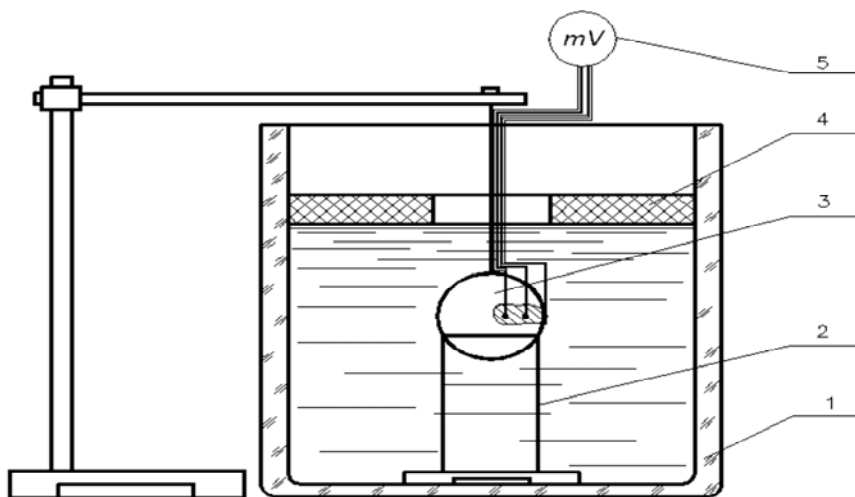


Рисунок 8 – Принципиальная схема лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой сосуд 1, изготовленный из органического стекла. Сосуд заполняется водой заранее, для того чтобы температура воды, стенки сосуда и окружающего воздуха были равны. Внутри сосуда установлена подставка 2, на которую помещается нагретый шар 3, диаметром 60 мм, изготовленный из алюминия. На поверхность воды положена пластина из пенопласта 4, с отверстием 70 мм, позволяющая уменьшить тепловые потери с поверхности воды в окружающую среду.

Термопары установлены в жидкости и в шаре. Фиксация показаний термопар осуществляется с помощью прибора 5.

Проведение эксперимента и обработка результатов измерений

Перед началом проведения эксперимента необходимо проверить работоспособность измерительной аппаратуры и зафиксировать температуры воды и шара. Нагреть тело до температуры 200–250 °С и, зафиксировав температуру, поместить его на подставку в сосуд. Процесс теплообмена нагретого тела с водой сопровождается фазовым переходом воды в парообразное состояние. Эксперимент длит-

ся до того момента, пока не прекратится процесс кипения воды у поверхности шара, после чего фиксируются показания термомпар.

Далее определяют среднюю температуру воды в различных точках сосуда. Результаты эксперимента заносят в таблицу 8.

Таблица 8 – Результаты экспериментальных исследований

№ п/п	Время, с	Температура, °С					
		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6

По формуле определяем среднюю температуру тела:

$$T_{\text{cp}} = \frac{T_1 V_1 + T_2 V_2 + T_3 V_3}{\sum V},$$

где T_1, T_2, T_3 – температуры точек охлаждаемого тела;

V_1, V_2, V_3 – объемы тела, в центре которых определяется температура.

За период времени τ нагретое тело охлаждается от $T_{1\text{cp}}$ до $T_{2\text{cp}}$. При известной массе шара m и теплоемкости c можно определить количество отданной теплоты:

$$Q_m = c_m m_m (T_{1\text{cp}} - T_{2\text{cp}}).$$

За этот период времени вода нагрелась от $T_{1\text{в}}$ до $T_{2\text{в}}$, количество воспринятой теплоты

$$Q_{\text{в}} = c_{\text{в}} m_{\text{в}} (T_{2\text{в}} - T_{1\text{в}}).$$

В принципе, эти величины должны быть равны, но, делая поправку на нестационарность процесса, а также утечки тепла на нагрев сосуда, приближенно можно определить количество теплоты, участвующего в теплообмене:

$$Q = \frac{Q_{\text{т}} + Q_{\text{в}}}{2}.$$

Определим коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Q}{Ft(T_{\text{п}} - T_{\text{ж}})},$$

где F – боковая поверхность тела, м^2 ;

$T_{\text{п}}$ – средняя за период τ температура поверхности тела:

$$T_{\text{п}} = \frac{T_{\text{п1}} + T_{\text{п2}}}{2};$$

$T_{\text{ж}}$ – средняя за период τ температура воды:

$$T_{\text{ж}} = \frac{T_1 + T_2}{2}.$$

Заметим, что таким образом мы определяем среднее значение α за некоторый период τ . Произведя измерения и вычисления за несколько таких периодов, можно проследить за динамикой процесса теплоотдачи.

ТЕПЛООБМЕН В ПРОЦЕССАХ СУШКИ МАТЕРИАЛОВ

Процесс сушки является совокупностью процессов теплообмена, массообмена и изменения агрегатного состояния, которые приводят к изменению теплосодержания и влагосодержания как высушиваемого материала, так и сушильного агента и окружающей среды. В зависимости от способа подвода тепла различают радиационную, конвективную и контактную сушку, а также сушку при генерации тепла в сушимом материале. Газообразный сушильный агент выполняет функции теплоносителя и обеспечивает отвод влаги с поверхности сушеного материала. Концентрация влаги в процессе сушки в высушиваемом материале и в сушильном агенте непрерывно изменяется.

С увеличением температуры нагрева сушеного материала сокращается время сушки, увеличивается производительность установки, однако максимальная температура нагрева ограничена технологическими факторами. Например, при сушке песка верхний уровень температуры не должен превышать температуру, при которой начинают происходить кристаллические превращения в материале. Температура нагрева литейных форм и стержней зависит от температуры деструкции связующих материалов и, как правило, не превышает 200–400 °С.

В процессе сушки концентрация влаги в высушиваемом материале непрерывно изменяется. Процесс движения влаги из мест с большей концентрацией к местам с меньшей концентрацией называют *влагопроводностью*. Для осуществления процесса испарения влаги необходим подвод тепла к форме. В результате нагрева возникает разность температур между поверхностью и центром, влага перемещается из более горячих мест в более холодные. Переход влаги в парообразное состояние ведет к увеличению давления пара внутри материала, что ускоряет перенос влаги из внутренних слоев к наружным. Процесс возникновения разности давлений в капиллярных каналах материала при перепаде температур, получил название *термовлагопроводности*.

При сушке массивных тел роль термовлагопроводности особенно велика в начальный момент. По мере прогрева материала градиент температуры уменьшается, роль термовлагопроводности снижается, решающую роль в процессе сушки начинает играть влагопровод-

ность. В случае подвода тепла к высушиваемому материалу снаружи вектор влагопроводности и термовлагопроводности имеют разные знаки, поэтому термовлагопроводность замедляет процесс сушки.

Процесс сушки можно разделить на три основных периода.

В первый период происходит нагрев материала и испарение влаги, находящейся на поверхности. По мере нагрева материала, при минимальном градиенте температур по сечению материала, скорость удаления влаги достигает наибольшего значения. Интенсивность процесса сушки в этот период невелика.

В течение второго периода все подводимое тепло расходуется на испарение влаги, температура на поверхности материала близка к 100 °С, скорость удаления влаги постоянна, интенсивность сушки определяется влагопроводностью.

В третий период тепло расходуется не только на процесс испарения влаги, но и на повышение температуры материала, которая стремится к температуре сушильного агента. Интенсивность сушки падает, в этот период большую роль оказывает разность давлений пара внутренних и внешних слоев материала, вызывающая поток влаги, направленный к поверхности.

Интенсивность сушки массивных тел в общем случае может быть представлена следующим выражением:

$$m = -k\gamma_0 \left(\frac{\Delta W}{\Delta S} \pm \delta \frac{\Delta T}{\Delta S} \right),$$

где k – коэффициент влагопроводности ($\text{м}^2/\text{ч}$), аналогичен коэффициенту температуропроводности;

γ_0 – объемный вес абсолютно сухого материала;

$\frac{\Delta W}{\Delta S}$ – градиент влажности;

δ – коэффициент термовлагопроводности;

$\frac{\Delta T}{\Delta S}$ – градиент температур.

Коэффициенты влагопроводности и термовлагопроводности зависят от свойств сушеного материала, его температуры и влажности, и в процессе сушки значения этих коэффициентов непрерывно изменяются. В общем случае интенсивность сушки зависит не толь-

ко от скорости внутренней диффузии, но и скорости удаления водяного пара с поверхности сушеного материала. Оптимальный вариант – когда оба процесса протекают с одинаковой скоростью.

Скорость сушки зависит от плотности подводимого теплового потока и способа передачи тепла к поверхности сушеного тела. По способу передачи тепла различают три основных вида сушки:

1. *Контактная сушка* – нагреваемая поверхность соприкасается с поверхностью сырого материала, используется при сушке сыпучих материалов.

2. *Конвективная сушка* – нагретый воздух или дымовые газы, являющиеся сушильным агентом, при своем движении омывают поверхность сырого материала.

Интенсивность процесса конвективной сушки может быть выражена следующей зависимостью:

$$m = \beta (P_{\text{пов}} - P_{\text{газ}}),$$

где β – коэффициент испарения;

$P_{\text{пов}}$ – парциальное давление водяных паров на поверхности испарения;

$P_{\text{газ}}$ – парциальное давление водяных паров сушильного агента.

Коэффициент испарения зависит от характера и скорости движения сушильного агента: он увеличивается при переходе от ламинарного движения к турбулентному. Парциальное давление водяных паров на поверхности материалов зависит от состояния поверхности. При высокой влажности материала испарение с поверхности происходит аналогично испарению со свободной поверхности воды. По мере подсыхания на поверхности материала появляются «сухие пятна», активная поверхность уменьшается и парциальное давление водяных паров на поверхности также уменьшается. В период подсыхания поверхности материала испарение влаги зависит от поступления влаги изнутри к поверхности, т. е. процесс внешней диффузии зависит от процесса внутренней диффузии.

3. *Радиационная сушка* – передача тепла на поверхность сырого материала осуществляется с помощью различных устройств с электрическим или тепловым нагревом путем излучения от нагретой поверхности. Источник тепловой энергии облучает поверхность материала, прогрев по глубине изделия идет по закону теплопроводности.

Кроме перечисленных основных видов сушки, передача тепла материалу может осуществляться от внутреннего источника тепла, в этом случае к материалу подводится электрическая энергия, которая внутри него превращается в тепловую.

Сушка токами высокой частоты (ТВЧ) происходит за счет превращения энергии переменного магнитного поля в тепловую энергию при помещении диэлектрика между электродами колебательного контура генератора высокой частоты. Формовочные и стержневые материалы можно рассматривать как диэлектрики. Нагрев диэлектрика происходит по всему объему. Газообразные вещества, выделяющиеся из связующих, должны удаляться при помощи вентиляционного устройства. Электрические параметры высушиваемого материала непрерывно меняются, режим работы генератора должен соответственно регулироваться. Для успешной сушки ТВЧ она должна быть комбинированной, воздух должен нагреваться до 120–180 °С независимым источником тепла. Скорость сушки в поле ТВЧ увеличивается по сравнению с традиционными видами сушки в 12 раз и уменьшается с увеличением длины волны или с уменьшением частоты. В связи с повышенным расходом электрической энергии применение высокочастотного нагрева требует экономического обоснования в каждом конкретном случае.

Сушка токами сверхвысокой частоты (СВЧ). При обработке потоком СВЧ энергии переход жидкости в пар происходит по всему объему материала со скоростью, пропорциональной плотности тепловыделения. Вода, как дипольная жидкость, обладает аномально высоким поглощением энергии электромагнитного поля в области сантиметровых волн.

Режим сушки подразделяют на мягкий и высокоинтенсивный. Мягкий или испарительный режим не дает существенного преимущества во времени из-за инерционности процессов влагоперемещения, протекающих в условиях, когда рабочая температура меньше температуры кипения жидкой фазы смеси. Режиму высокоинтенсивной сушки соответствует плотность подводимой мощности от 0,2 до 3,0 кВт/кг. При увеличении плотности выше 3 кВт/кг возникают режимы с повышенной нестабильностью, из-за очень высокой скорости образования пара внутри материала возникает большое внутреннее давление, приводящее к разрушению структуры материала.

Практическое использование СВЧ технологии в литейном производстве представляет интерес для сушки древесины для изготовления моделей и стержневой оснастки, получения керамических форм по выплавляемым моделям. Применение СВЧ-излучения для удаления модельного состава и прокаливания керамических форм позволило значительно улучшить качество этих форм, повысить размерную точность и чистоту поверхности отливок. Существенно сокращается время удаления модельных составов и прокаливания этих форм. Обработка СВЧ-излучением позволяет снизить количество связующих материалов и катализаторов, сократить время отверждения стержней в оснастке, следовательно, уменьшить количество выделяемых вредных компонентов,

Экономическая эффективность СВЧ нагрева выше, чем у традиционных методов, прежде всего за счет высокого коэффициента полезного действия передачи энергии от источника (магнетрона) к рабочему объекту. В целом себестоимость СВЧ обработки сильно зависит от конструкции установки, целей ее использования и может колебаться в значительных пределах.

Значительное сокращение расходов электроэнергии в процессе сушки возможно за счет применения комбинированных методов подвода тепла, например, высокочастотного и конвективного или радиационного или воздействием электрических полей в импульсном режиме. В этих случаях энергия высокочастотных электрических полей расходуется главным образом на создание условий, интенсифицирующих перенос влаги из глубинных слоев к поверхности. Испарение влаги с поверхности материала осуществляется за счет использования более дешевых видов энергии, что позволяет значительно сократить расход электроэнергии. Недостаточность знаний по механизму тепло- и массопереноса в процессах сушки, связанных с применением электрических полей высокой частоты объясняет осторожное отношение специалистов к выбору и обоснованию инженерных решений.

Решение задач тепло- и массопереноса численными методами представляет большие трудности, так как коэффициенты влагопроводности, термовлагопроводности и температуропроводности зависят от влажности высушиваемого материала. Для расчета кинетики процесса сушки используют закономерности, характеризующие перенос тепла и влаги в капиллярно-пористых телах. Продолжительность сушки материалов обычно принимают на основе экспериментальных данных.

Расчет процесса сушки осуществляется с целью определения количества сушильного агента и расхода топлива. Тип сушила, характеристики высушиваемого материала и вид топлива обычно заданы.

На практике обычно используют $H-D$ диаграмму, основными параметрами которой, являются энтальпия и влагосодержание. С помощью диаграммы, которая построена для влажного воздуха, можно выполнять расчеты процесса сушки дымовыми газами или смесью дымовых газов и воздуха.

Теоретический расчет не учитывает потери тепла на нагрев высушиваемого материала, транспортирующих устройств, сушильной камеры и другие, которые уменьшают энтальпию сушильного агента.

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ГОРЕНИИ

Горение является химическим превращением, которое сопровождается выделением тепла и одновременным переносом массы и энергии. Физические процессы перемешивания топлива с кислородом и образования горючей смеси, разогрев смеси за счет тепла продуктов сгорания, а также отвод продуктов сгорания из зоны реакции протекают совместно с химическими реакциями.

На практике большинство химических реакций процесса горения являются последовательностью четырех связанных между собой процессов: зарождения, ветвления, продолжения и обрыва цепи. Кинетика реакций изучена недостаточно, что объясняется ее зависимостью от химических, физических и термодинамических свойств пламени.

Кислород и пиролизирующее горючее вступает в контакт внутри пограничного слоя и реагирует со скоростью, гораздо большей, чем скорость диффузии и скорость потока. Зона реакции мала по сравнению с толщиной теплового пограничного слоя. Тепло, выделяющееся при горении, выносится из зоны реакции посредством теплопроводности, конвекции и излучения, часть тепла поглощается горючим для поддержания процесса горения.

В отличие от обычных течений, параметры и их критические значения определяющие переход от ламинарного пламени к турбулентному до настоящего времени не установлены. В случае турбулентного пламени зона реакции в пограничном слое обычно имеет конечную толщину, называемую «кистью пламени» в отличие от пелены

пламени при ламинарном режиме. Благодаря сильному турбулентному перемешиванию при наличии достаточно широкой зоны реакции горючее и реагент стремятся к взаимопроникновению.

В зависимости от агрегатного состояния топлива различают *гомогенное горение* (горение газа, протекающее одновременно во всем объеме) и *гетерогенное горение* твердого или жидкого топлива, протекающего на границе раздела фаз.

Сжигание топлива в пламенных печах осуществляется в факеле. Реакции горения протекают в узкой полосе внутри факела, называемой *фронтом пламени*. Во внутреннюю зону факела подается топливо и окислитель, из фронта пламени туда же диффундирует часть высокотемпературных продуктов сгорания, во внешней зоне находятся продукты сгорания, возможно в смеси с окислителем. Для металлургических печей характерно нормальное горение при неподвижной горючей смеси или ламинарном режиме ее движения, во фронте пламени происходят физико-химические превращения смеси с изменением плотности, температуры и объема газов.

В печной практике большое значение оказывает явление называемое *настильностью пламени*. Струя газа, вытекающая из трубы в пространство с неподвижным газом, увлекает за собой массу газа из окружающего пространства. Если струя газа направлена под небольшим углом к поверхности, она двигается вдоль этой поверхности по пути наименьшего сопротивления, растекаясь по ней на большое расстояние. Дальноточность струи зависит от угла атаки и от свойств поверхности. При угле атаки более 30° струя затухает также, как и свободная струя. Отрыв струи газа возможен при малых скоростях движения, вследствие стремления горячих газов подниматься вверх.

Горение происходит при высоких температурах, распределение температур в пламени изменяется в интервале до 1000°C , образующиеся газообразные CO_2 , H_2O , OH^- , H^+ и некоторые углеводороды способны излучать, поэтому в пламени одновременно протекают процессы горения и излучения.

Для интенсификации процесса сжигания газа необходимо увеличение поверхности фронта пламени и осуществление предварительного подогрева горючей смеси. Удельную поверхность струи можно увеличить за счет оптимизации геометрии выходного отверстия горелки, разделения газового потока на мелкие струйки.

На процессы смесеобразования благоприятное влияние оказывает воздействие низкочастотных пульсаций и акустических колебаний. При наложении пульсаций частотой до 200 Гц скорость реакции горения в факеле резко возрастает. Наложение акустических колебаний частотой до 21 кГц на диффузионный факел способствует улучшению смешения за счет возрастания коэффициента турбулентной диффузии. Температура факела повышается на несколько сотен градусов, а теплоотдача от него увеличивается в два–три раза.

Представляет интерес воздействие на пламя, являющееся слабо ионизированным газом, электрического поля высокого напряжения. Регулируя подводимую электрическую энергию можно оказывать воздействие не только на температуру горения, но и получать окислительную, нейтральную или восстановительную газовую атмосферу с температурой от 1800 до 4000 К.

Процесс сжигания жидкого топлива можно условно разделить на следующие этапы:

- распыление жидкого топлива;
- его испарение и образование горючей смеси;
- воспламенение смеси и ее горение.

При сжигании мазута необходимо в максимальной степени способствовать протеканию окислительных процессов. Однако наличие большого количества кислорода во внутренней области факела с одной стороны облегчает протекание окислительных процессов, с другой – понижает температуру в этой области и тем самым затрудняет образование высокомолекулярных соединений.

В начальный период горения твердого топлива, когда частица попадает в зону горения, происходит ее сушка, затем разложение с выделением летучих, которые у поверхности частички, смешиваются с кислородом и образуют горючую смесь, сгорающую в режиме гомогенного горения.

Через некоторый промежуток времени, при достаточно высокой температуре, происходит воспламенение летучих, сама частица остается темной. Длительность этого периода не превышает 10 % от общего времени горения частицы. Второй период – горение твердого топлива; характеризуется быстрым нагревом массы до высоких температур, этот период определяется скоростью подвода кислорода к горящему топливу. Для воспламенения твердого топлива и начала его устойчивого горения необходимо чтобы температура окружаю-

шей среды достигла определенной величины. Температура воспламенения для древесного угля и торфяного кокса – 300–400 °С, бурого угольного кокса – 350–450 °С, для каменноугольного – 700–750 °С, антрацита и термоантрацита – 700–800 °С.

Наиболее медленной стадией процесса является горение твердого углерода. Для ускорения горения твердое топливо измельчают с целью увеличения поверхности контакта углерода с кислородом.

В шахтных печах, когда в качестве топлива используют кокс, переход от ламинарного режима движения к турбулентному происходит при очень малых значениях числа $Re \sim 100$. Теплопередача в слое кусковых материалов – очень сложное явление. Общие закономерности только приблизительно отражают аэродинамику движения газов в промышленных печах. Большие осложнения вносят наличие в шихте мелочи, большая разбежка кусков кокса по размерам, а также появление жидких фаз. Температура на поверхности кокса определяется не только передачей тепла от газа к слою, но и отводом тепла внутрь куска. Внешний теплообмен в условиях слоя в основном складывается из теплообмена конвекцией и излучением. Роль контактного теплообмена между кусками кокса теплопроводностью в общем балансе незначительна. Внутренняя теплопередача определяется размерами куска, его теплопроводностью и формой. Форма куска реальных материалов различна, различен и характер каналов для движения газов. Основные затруднения при расчетах связаны с изменением теплофизических параметров в зависимости от температуры, с учетом тепла химических реакций, происходящих в шахте печи. В процессе горения кокса протекают реакции окисления углерода $C + O_2 = CO_2$ и $2C + O_2 = 2CO$, гетерогенная реакция $CO_2 + C = 2CO$ и реакция горения оксида углерода $2CO + O_2 = 2CO_2$, причем все реакции протекают одновременно, при этом продолжается выделение остаточного количества летучих и их горение.

Для проведения расчетов по нагреву тел сложной конфигурации используют обобщенную для всех форм тел формулу. Анализ показывает, что получаемая погрешность не имеет существенного практического значения.

ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

Теплообменным аппаратом называется устройство, в котором происходит процесс передачи теплоты от одного теплоносителя к другому. По принципу действия их разделяют на *рекуперативные, регенеративные и смесительные*.

В литейном производстве с целью повышения коэффициента полезного действия вагранок экономически целесообразно тепло отходящих газов возвратить в рабочее пространство печи, с этой целью используют рекуперативные аппараты. В рекуператорах теплота от горячего теплоносителя к холодному происходит через разделительную стенку. Если направление движения теплоносителей совпадает, такую схему движения называют прямотоком, в противоположных направлениях – противотоком. На практике часто используются более сложные схемы движения: совместный прямо- и противоток, многократно перекрестный токи и др. С теплотехнической точки зрения предпочтение следует отдавать противотоку. Однако в этом случае теплообменный аппарат работает в более тяжелых температурных условиях.

В регенеративных аппаратах процесс теплопередачи от горячего теплоносителя к холодному разделяют на два периода. При прохождении горячего теплоносителя через насадок, изготовленный из огнеупорного кирпича, стального листа или алюминиевой фольги, происходит аккумуляция тепла. Во второй период через насадок пропускают холодный воздух, который забирает аккумулированную теплоту. Регенераторы используют в плавильных агрегатах, где температура уходящих газов высокая и требуется высокий подогрев воздуха (мартеновские печи). Эффективность работы регенератора зависит от толщины насадка, его теплоаккумулирующей способности, температуры теплоносителей, степени их засорения и т. д.

В смесительных теплообменных аппаратах процессы теплообмена протекают одновременно с процессами массообмена. Теплопередача между горячим и холодным теплоносителем происходит при непосредственном их соприкосновении между собой. Теплообменные аппараты могут быть использованы для охлаждения и нагревания газов при помощи воды или охлаждения воды при помощи воздуха.

Тепловой расчет теплообменного аппарата основан на совместном решении уравнений теплопередачи

$$Q = kF(T_1 - T^2)$$

и теплового баланса

$$Q_1 = Q_2 + \Delta Q,$$

где $Q_1 = G_1 C_{p1} (T_1' - T_1'')$ – количество теплоты, отданное теплоносителем;

$Q_2 = G_2 C_{p2} (T_2' - T_2'')$ – количество теплоты, принятое холодным теплоносителем;

ΔQ – потери теплоты в окружающую среду;

G_1 и G_2 – массовые расходы теплоносителей;

C_{p1} и C_{p2} – удельные теплоемкости горячего и холодного теплоносителей при постоянном давлении;

$(T_1' - T_1'')$ и $(T_2' - T_2'')$ – температуры горячего и холодного теплоносителей на входе и выходе из теплообменного аппарата.

Целью конструкторского теплового расчета теплообменника является определение площади поверхности теплообмена, поверочного – определение режима работы теплообменника и конечных температур теплоносителей.

Уравнение теплового баланса можно представить и в другом виде:

$$\frac{T_1' - T_1''}{T_2' - T_2''} = \frac{W_2}{W_1},$$

где W – водяной эквивалент:

$$W = GC_p,$$

где

$$G = \rho \omega f,$$

где ρ – плотность теплоносителей;

ω – скорость движения теплоносителей;

f – площадь сечения канала.

Изменение температур горячего и холодного теплоносителей зависит от схемы их движения и соотношения величин их водяных эквивалентов.

При определении коэффициента теплоотдачи k сначала проводят анализ частных термических сопротивлений с целью упрощения расчетной схемы. Далее учитывают влияние изменения температур рабочих жидкостей на коэффициент теплоотдачи.

Для теплоносителя с большим водяным эквивалентом среднюю температуру принимают как среднеарифметическую из крайних значений, с меньшим – среднюю температуру определяют из соотношения

$$T_m = T_6 \pm \Delta T,$$

где ΔT – среднелогарифмический температурный напор.

Знак «минус», если T_6 – температура горячей жидкости, «плюс» – холодной жидкости.

Значение коэффициента теплоотдачи принимают средним, если полученные значения отличаются не очень сильно. Если различия существенны, поверхность нагрева разбивают на отдельные участки, в пределах которых различия незначительны, и для каждого участка расчет теплоотдачи производят отдельно.

При кипении и конденсации водяной эквивалент жидкости бесконечно велик, конечная температура жидкости определяется по формуле:

– при конденсации $W_1 = \infty$, $T_1' - T_1'' = T_1$:

$$T_2'' = T_1 - (T_1 - T_2') \left(1 - e^{-\frac{kF}{W_2}} \right);$$

– при кипении жидкости $W_2 = \infty$, $T_2' - T_2'' = T_2$:

$$T_1'' = T_2 - (T_1' - T_2) e^{-\frac{kF}{W_1}}.$$

Эти формулы справедливы, если потери в окружающую среду равны нулю.

Влияние тепловых потерь учитывают путем изменения водяного эквивалента теплоотдающей жидкости таким образом, чтобы в теплообменном аппарате происходило понижение температуры, как и при потоке с действительным водяным эквивалентом при наличии тепловых потерь:

$$W' = W \left(1 \pm \frac{P}{100} \right),$$

где W – действительное значение водяного эквивалента.

Знак «минус» – для горячей воды, «плюс» – для холодной.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исаченко, В. П. Теплопередача : учеб. / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 417 с.
2. Архаров, А. М. Теплотехника : учеб. / А. М. Архаров. – М. : Энергоиздат, 2004. – 711 с.
3. Беляев, Н. М. Основы теплопередачи : учеб. / Н. М. Беляев. – Киев : Вища школа, 1989. – 342 с.
4. Блох, А. Г. Теплообмен излучением : справочник / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 431 с.
5. Баскаков, А. П. Теплотехника : учеб. / А. П. Баскаков, Б. В. Берг, О. К. Витт. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 223 с.
6. Луканин, В. Н. Теплотехника : учеб. / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер. – М. : Высшая школа, 2003. – 671 с.
7. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968 – 471 с.
8. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков.. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.
9. Лыков, А. В. Тепломассообмен. – М. : Энергия, 1978 – 497 с.
10. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : БАСТЕТ, 2010. – 343 с.
11. Борисов, Б. Г. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : справочник / Б. Г. Борисов. – М. : МЭИ, 2007. – 630 с.
12. Спэрроу, Э. М. Теплообмен излучением / Э. М. Спэрроу, Р. Д. Сесс. – Л. : Энергия, 1971. – 294 с.
13. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – М. : Высшая школа, 1980. – 469 с.
14. Белоусов, В. В. Теплотехника и теплоэнергетика металлургического производства: сборник задач : учебное пособие / В. В. Белоусов [и др.]. – М. : Металлургия, 1993. – 335 с.
15. Краснощеков, Е. А. Задачник по теплопередаче / Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел. – М. : Энергия, 1980. – 288 с.

Приложение

Таблица П1 – Свойства огнеупорных материалов

Материал	Плотность γ , кг/м ³	Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	Теплоемкость c_p , кДж/(кг·°С)
Шамот	1800–1900	$0,84 + 0,00058T$	$0,88 + 0,00230T$
Динас	1900–1950	$0,93 + 0,00069T$	$0,84 + 0,00025T$
Магнезит	2600–2800	$4,65 + 0,00174T$	$1,05 + 0,00029T$
Хромомagneзит	2750–2850	1,92 (до 600°С)	–
Пеношамот	950	$0,28 + 0,00023T$	–
	600	$0,11 + 0,00015T$	–
Песок кварцевый	1500	0,301	–

Таблица П2 – Значения коэффициентов для расчета α при свободной конвекции

Произведение критериев Грасгофа и Прандтля $Gr \cdot Pr$	Коэффициент C	Коэффициент n
$1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$	0,500	0,000
$1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,180	1,125
$1 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,540	0,250
$2 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^{13}$	0,135	0,333

Таблица П3 – Физические параметры сухого воздуха ($p_v = 760$ мм рт. ст. $\approx 1,01 \cdot 10^5$ Па)

Температура T , °С	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость c_p , кДж/(кг·°С)	Теплопроводность $\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·°С)	Температуропроводность $a \cdot 10^6$, м ² /с	Вязкость $\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Критерий Прандтля Pr
1	2	3	4	5	6	7
–50	1,584	1,013	2,04	12,7	9,23	0,728
–40	1,515	1,013	2,12	13,8	10,04	0,728
–30	1,453	1,013	2,20	14,9	10,80	0,723
–20	1,395	1,009	2,28	16,2	11,61	0,716

Окончание таблицы ПЗ

1	2	3	4	5	6	7
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	233,7	0,724

Таблица П4 – Физические свойства воды на линии насыщения

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Давление $p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$	Теплоемкость c_p , $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	Теплопроводность $\lambda \cdot 10^2$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	Температуропроводность $a \cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$	Вязкость $\nu \cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$	Критерий Прандтля Pr
0	1,013	999,9	4,212	0,560	13,2	1,789	13,5
10	1,013	999,7	4,191	0,580	13,8	1,306	9,45
20	1,013	998,2	4,183	0,597	14,3	1,006	7,03
30	1,013	995,7	4,174	0,612	14,7	0,805	5,45
40	1,013	992,2	4,174	0,627	15,1	0,659	4,36
50	1,013	988,1	4,174	0,640	15,5	0,556	3,59
60	1,013	983,1	4,179	0,650	15,8	0,478	3,03
70	1,013	977,8	4,187	0,662	16,1	0,415	2,58
80	1,013	971,8	4,195	0,669	16,3	0,365	2,23
90	1,013	965,3	4,208	0,676	16,5	0,326	1,97
100	1,013	958,4	4,220	0,684	16,8	0,295	1,75
110	1,43	951,0	4,233	0,685	17,0	0,272	1,60
120	1,98	943,1	4,250	0,686	17,1	0,252	1,47
130	2,70	934,8	4,266	0,686	17,2	0,233	1,35
140	3,61	926,1	4,287	0,685	17,2	0,217	1,26
150	4,76	917,0	4,313	0,684	17,3	0,203	1,17
160	6,18	907,4	4,346	0,681	17,3	0,191	1,10
170	7,92	897,3	4,380	0,676	17,2	0,181	1,05
180	10,03	886,9	4,417	0,672	17,2	0,173	1,03
190	12,55	876,0	4,459	0,664	17,2	0,165	0,965
200	15,55	863,0	4,505	0,685	17,0	0,158	0,932
210	19,08	852,8	4,555	0,649	16,7	0,153	0,915
220	23,20	840,3	4,614	0,640	16,5	0,148	0,898
230	27,98	827,3	4,681	0,629	16,3	0,145	0,888
240	33,48	813,6	4,76	0,617	16,0	0,141	0,883
250	39,78	799,0	4,87	0,605	15,5	0,137	0,884
260	46,94	784,0	4,98	0,593	15,2	0,135	0,892
270	55,05	767,9	5,12	0,578	14,7	0,113	0,905
280	64,19	750,7	5,30	0,565	14,3	0,131	0,917
290	74,45	733,3	5,50	0,548	13,7	0,129	0,944
300	85,92	712,5	5,76	0,532	13,0	0,128	0,986
310	98,70	691,1	6,11	0,514	12,2	0,128	1,05
320	112,90	667,1	6,57	0,494	11,3	0,128	1,14
330	128,65	640,2	7,25	0,471	10,2	0,127	1,25
340	146,08	610,1	8,20	0,446	8,95	0,127	1,42
350	165,37	574,4	10,10	0,431	7,90	0,126	1,70
360	186,74	528,0	14,65	0,367	4,2	0,126	2,66
370	210,53	450,5	40,32	0,338	1,85	0,126	6,80

Таблица П5 – Степень черноты полного нормального излучения для различных материалов

Материал	Температура T , °C	Степень черноты ε
Алюминий полированный	225–575	0,039–0,057
Алюминий шероховатый	26	0,055
Алюминий, окисленный при 600 °C	200–600	0,110–0,190
Сталь литая полированная	770–1040	0,520–0,560
Сталь листовая шлифованная	940–1100	0,550–0,610
Сталь окисленная при 600 °C	200–600	0,800
Чугун обточенный	830–990	0,600–0,700
Чугун окисленный при 600 °C	200–600	0,640–0,780
Латунная пластинка, прокатанная, с естественной поверхностью	22	0,060
Латунная пластинка, прокатанная, обработанная грубым наждаком	22	0,200
Латунная пластинка тусклая	50–350	0,220
Латунь окисленная при 600 °C	200–600	0,610–0,590
Медь, тщательно полированная, электролитическая	80–115	0,018–0,023
Медь торговая, шабрена до блеска, но не зеркальная	22	0,072
Медь, окисленная при 600°C	200–600	0,570–0,870
Расплавленная медь	1075–1275	0,160–0,130
Свинец серый, окисленный	25	0,281
Свинец окисленный при 200°C	200	0,630
Вода	0–100	0,950–0,963
Кварц плавленный, шероховатый	20	0,932
Кирпич динасовый, неглазурованный, шероховатый	100	0,800
Кирпич динасовый, глазурованный, шероховатый	1100	0,850
Кирпич шамотный, глазурованный	1100	0,750
Кирпич огнеупорный	–	0,80–0,90
Сажа, свечная копоть	95–270	0,952
Сажа с жидким стеклом	100–185	0,959–0,947

Таблица Пб – Коэффициент теплопроводности и другие свойства металлов (для сталей: верхнее значение – для закаленной стали, ниже – для отожженной)

Параметр	Температура, °С							
	0	100	200	300	400	500	700	900
Сталь 15								
Плотность γ , кг/м ³	7841	7818	7787	7752	7715	7682	7611	7584
	7850	7825	7794	7759	7724	7687		
Теплоемкость $c_p \cdot 10^3$, кДж/(кг·°С)	456,4	494,0	531,7	535,9	619,6	682,6	523,4	669,9
	439,6	485,7	531,7	577,8	619,6	686,6		
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	50,3	53,1	52,2	49,3	46,1	42,8	35,7	29,5
	52,3	53,4	53,3	49,3	46,1	42,8		
Сталь 35								
Плотность γ , кг/м ³	7803	7781	7751	7725	7702	7667	7853	7549
	7826	7804	7771	7737	7700	7662		
Теплоемкость $c_p \cdot 10^3$, кДж/(кг·°С)	443,8	498,2	519,2	535,9	607,1	665,7	912,7	573,6
	435,4	489,9	531,7	569,9	611,3	665,7		
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	40,0	42,9	45,4	44,9	42,7	40,6	34,8	28,0
	47,9	49,4	49,1	46,5	43,7	40,6		
Сталь 45								
Плотность γ , кг/м ³	7794	7772	7746	7722	7700	7767	7587	–
	7821	7799	7769	7735	7698	7662		
Теплоемкость $c_p \cdot 10^3$, кДж/(кг·°С)	560,5	498,2	519,2	515,0	602,9	661,5	883,4	582,0
	443,8	489,9	535,9	569,4	611,3	657,3		
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	32,0	36,1	39,2	40,6	39,7	38,0	32,7	24,5
	45,9	47,8	47,1	44,8	41,9	38,6		
Медь								
Параметр	Температура, °С							
	20	100	300	600	900	1083	1200	
Плотность γ , кг/м ³	8930	8900	8840	8700	8620	8510	8320	
Теплоемкость $c_p \cdot 10^3$, кДж/(кг·°С)	0,381	0,399	0,422	0,456	0,481	0,533	–	
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	394,4	390,9	372,4	343,4	320,2	–	–	
Латунь Л68								
Параметр	Температура, °С							
	0	100	200	300	400	500	600	
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	105,8	109,3	110,5	114,0	116,3	119,8	121,0	

Окончание таблицы Пб

Латунь Л62							
Параметр	Температура, °С						
	0	100	200	300	400	500	600
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	105,8	119,8	137,2	152,4	168,6	186,1	200,0
Латунь свинцовистая ЛС59-1							
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	104,7	116,3	127,9	140,7	155,8	169,8	182,6
Бронза АЖН 11-6-6							
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	63,7	71,3	77,3	82,1	87,2	94,2	–
Латунь 90 % Cu, 10 % Zn							
Параметр	Температура, °С						
	0	100	200	300	400	500	600
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	102	117	134	149	166	180	195
Латунь 70 % Cu, 30 % Zn							
Параметр	Температура, °С						
	0	100	200	300	400	500	600
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	106	109	110	114	116	120	121
Латунь 60 % Cu, 40 % Zn							
Параметр	Температура, °С						
	0	100	200	300	400	500	600
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	106	120	137	152	169	186	200
Алюминий							
Параметр	Температура, °С						
	20	100	300	400	500	600	800
Плотность γ , кг/м ³	2696	2690	2650	2620	2580	2550	2350
Теплоемкость $c_p \cdot 10^3$, кДж/(кг·°С)	0,879	0,942	1,038	1,059	1,101	1,143	1,076
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	205,9	204,7	230,3	248,9	267,5	280,3	62,8

Учебное издание

КРУТИЛИН Александр Николаевич
ОДИНОЧКО Виктор Федорович
НИКОЛАЙЧИК Юрий Александрович

ТЕПЛООБМЕН В ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССАХ

Учебно-методическое пособие
для студентов дневного и заочного отделения
по специальности 1-36 02 01 «Машины и технология
литейного производства»

Редактор *Т. А. Зезюльчик*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 19.11.2013. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5,99. Уч.-изд. л. 4,68. Тираж 50. Заказ 1340.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.

