

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический университет

А.Н.Крутилин, В.Ф.Одиночко

Теплообмен в литейных процессах

Лабораторный практикум

Учебно-методическое пособие для студентов специальности
1–36 02 01 «Машины и технология литейного производства»

Учебное электронное издание

Минск ◊ БНТУ ◊ 2008

УДК 621.74:536.24 (075.8)

ББК 34.617

К84

Авторы:

А.Н. Крутилин – доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» БНТУ,

В.Ф. Одиночко – доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» БНТУ

Рецензенты:

Р.И. Есьман – профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика» БНТУ,
доктор технических наук

М.А. Садоха – заведующий отделом производства отливок из цветных сплавов
РУП «БелНИИЛит», кандидат технических наук

Учебно-методическое пособие содержит восемь лабораторных работ по основным процессам теплообмена в литейном производстве. Рассмотрены такие вопросы, как теплопроводность при стационарном и нестационарном режимах, конвективный теплообмен, теплообмен при излучении, кипении и конденсации.

Белорусский национальный технический университет
Пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел. (017) 293-92-04. Факс (017) 292-50-60
Регистрационный № БНТУ/МТФ 32 – 1.2008

© БНТУ, 2008

© Крутилин А.Н., Одиночко В.Ф. 2008

© Одиночко В.Ф., компьютерный дизайн, 2008

Оглавление

Оглавление	3
Введение	4
Теплопроводность	5
Лабораторная работа №1	10
Лабораторная работа №2	12
Лабораторная работа №3	14
Конвективный теплообмен.....	16
Лабораторная работа №4	24
Лабораторная работа №5	27
Теплообмен при излучении.....	30
Лабораторная работа №6	35
Теплообмен при кипении и конденсации	38
Лабораторная работа №7	42
Теплопроводность при нестационарном режиме	45
Лабораторная работа №8	48
Литература	51
Приложение	52

Введение

Теплообмен в литейных процессах является одним из основных курсов, необходимых для профессиональной деятельности специалистов в области металлургического оборудования и литейных технологий

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 курса предусматривает не только изложение в лекциях 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.

Теплопроводность

Основные понятия

Теплопроводностью называется процесс переноса внутренней энергии, происходящий при непосредственном соприкосновении тел или частей одного тела с различной температурой.

Тепловое состояние термодинамической системы (тела) характеризуется температурным полем, под которым понимается совокупность 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 или 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 :

$$\text{grad}T = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta T}{\Delta n} \right) = \frac{\partial T}{\partial n}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (1)$$

Эта величина векторная и направлена 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:

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dn} dF d\tau \quad (2)$$

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

$$q = -\lambda \operatorname{grad} T; \quad (3)$$

Плотность теплового потока величина векторная, знак “–” показывает, что направления векторов градиента температур и теплового потока противоположны. Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м · °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. На величину коэффициента теплопроводности оказывает влияние температура, давление, пористость и характер распределения пор, влажность, химический состав, структура материала и т.д.

Для большинства материалов зависимость коэффициента теплопроводности от температуры может быть выражена следующей зависимостью:

$$\lambda = \lambda_0 [1 \pm b(T - T_0)]; \quad (4)$$

где: λ_0 – коэффициент теплопроводности при температуре T_0 ;

b – постоянная, определяемая опытным путем.

Наибольшей теплопроводностью обладают металлы $\lambda = 20\text{--}400$ Вт/(м · °С). С увеличением температуры для большинства металлов теплопроводность падает. 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 $\sim 41,9$ Вт/(м · °С), феррита $\sim 76,8$ Вт/(м · °С), перлита $\sim 51,9$ Вт/(м · °С), цементита $\sim 7,1$ Вт/(м · °С), а графита ~ 155 Вт/(м · °С).

Коэффициент теплопроводности капельных жидкостей колеблется от 0,08 до 0,7 Вт/(м · °С). Теплопроводность воды составляет $\approx 0,6$ Вт/(м · °С). С увеличением температуры коэффициент теплопроводности жидкостей убывает, за исключением воды и глицерина.

Явление чистой теплопроводности в газах наблюдается в очень тонких слоях. Согласно молекулярно–кинетической теории теплопроводность газов зависит от скорости движения молекул и их соударений между собой. 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:

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}}; \quad (5)$$

Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов 0,02 – 3,0 Вт/(м · °С), зависит от структуры материала, его пористости и влажности. Эти границы условные, так как характеризуют совместный перенос теплоты теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением. Так, например, если поры и капилляры материала заполнены водой, то коэффициент теплопроводности материала возрастает, так как при капиллярном перемещении жидкости большее количество теплоты передается благодаря высокой теплоемкости воды.

Для выполнения теплотехнических расчетов все тела разделяют на тела простой (пластина, цилиндр, шар) и сложной формы.

Рассмотрим процесс теплопроводности через неограниченную плоскую однослойную стенку толщиной δ и коэффициентом теплопроводности материала λ . Температуры на наружной и внутренней поверхностях T_1 и T_2 . Плотность теплового потока по закону Фурье:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}; \quad (6)$$

Температуру в любой точке рассматриваемой плоской стенки можно определить из выражения:

$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\delta} x; \quad (7)$$

где: x – расстояние от поверхности с температурой T_1 до рассматриваемого сечения.

Закон Фурье для рассматриваемого случая записывают:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2); \quad (8)$$

Отношение λ/δ называется 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, имеющей толщины слоев $\delta_1, \delta_2 \dots \delta_n$ и соответствующие коэффициенты теплопроводности $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$ значение плотности теплового потока определяют по формуле:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\sum R}; \quad (9)$$

где:

$$\sum R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}; \quad (10)$$

Температуру в любой точке многослойной стенки при стационарных условиях можно определить из выражения:

$$T_x = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\sum R} R_x; \quad (11)$$

Где: R_x – сумма термических сопротивлений той части многослойной стенки, которая находится между плоскостями с температурами T_1 и T_x . 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:

$$q_{1n} = \frac{(T_{1n} - T_{2n})}{\frac{1}{2\lambda} d_1 \ln \frac{d_2}{d_1}}; \quad (12)$$

$$q_{2n} = \frac{(T_{1n} - T_{2n})}{\frac{1}{2\lambda} d_2 \ln \frac{d_2}{d_1}}; \quad (13)$$

Для однородной сферической стенки с внутренним диаметром d_1 и внешним d_2 тепловой поток равен:

$$q = \pi\lambda \frac{(T_1 - T_2)d_1 d_2}{F\delta}; \quad (14)$$

где: $\delta = (d_1 - d_2)/2$ – толщина стенки, м;

F – площадь внутренней или наружной поверхности сферы, м².

Уравнение температурной кривой внутри однородной шаровой стенки:

$$T_x = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right)} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_x}\right); \quad (15)$$

Расчет теплопроводности для тел неправильной геометрической формы можно производить, расчлняя тело сложной конфигурации плоскостями, параллельными или перпендикулярными направлению теплового потока, на элементы простой формы.

Лабораторная работа №1

Определение коэффициента теплопроводности огнеупорных материалов методом пластины

Цель работы – ознакомление с теоретическими основами стационарного теплового режима и экспериментальное определение коэффициента теплопроводности огнеупорных материалов методом пластины.

Описание лабораторной установки

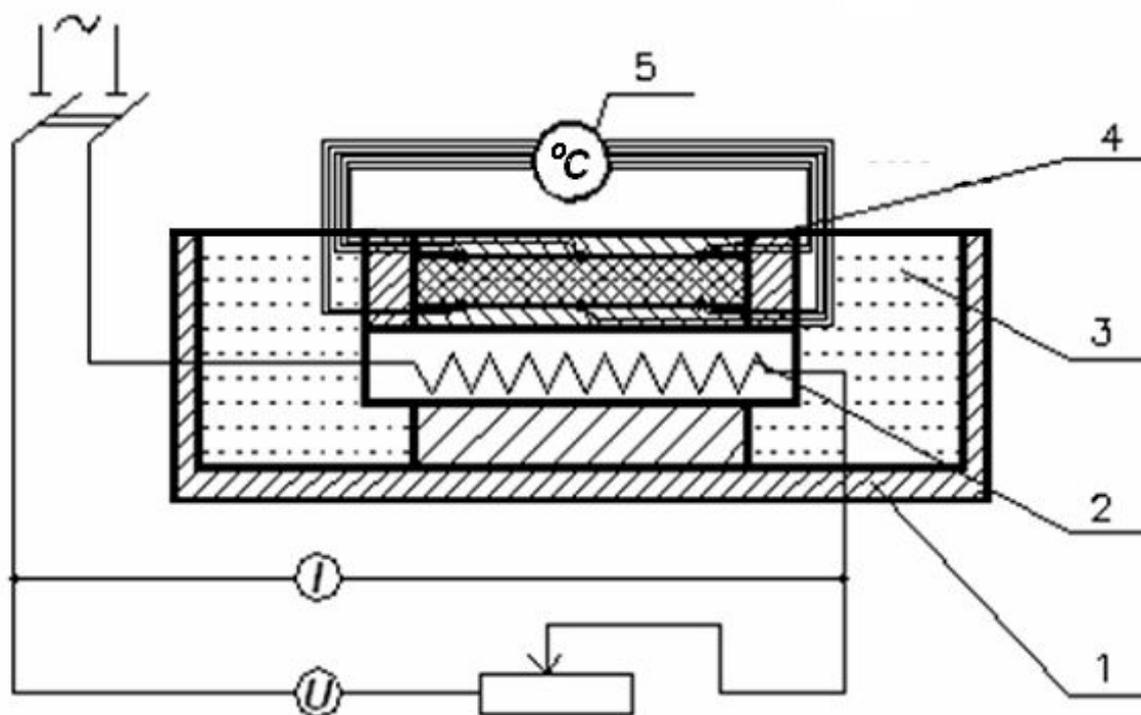


Рисунок 1

Лабораторная установка (см. рисунок 1) 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 зачехлены 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 эксперимента и обработка результатов измерений

Для создания направленного теплового потока на нагреватель подается электрический ток. Через каждые 15 минут 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

№ п/п	Время, τ , мин	Температура, T °С		Сила тока, I , А	Напряжение, U , В
		T_{1cp}	T_{2cp}		
1	15				
2	30				
3	45				
4	60				

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

$$IU = \frac{\lambda F (T_{1cp} - T_{2cp})}{\delta}; \quad (16)$$

где: IU – тепловой поток, проходящий через образец;
 F – площадь поверхности, через которую происходит теплопередача,
 m^2 ;

δ – толщина испытуемого образца, м.

Полученное значение коэффициента теплопроводности сравнивают с расчетными данными (см. приложение, таблица 1).

Лабораторная работа №2

Определение коэффициента теплопроводности материала методом трубы

Цель работы – ознакомление с методикой экспериментального определения коэффициента теплопроводности материала методом трубы.

Описание лабораторной установки

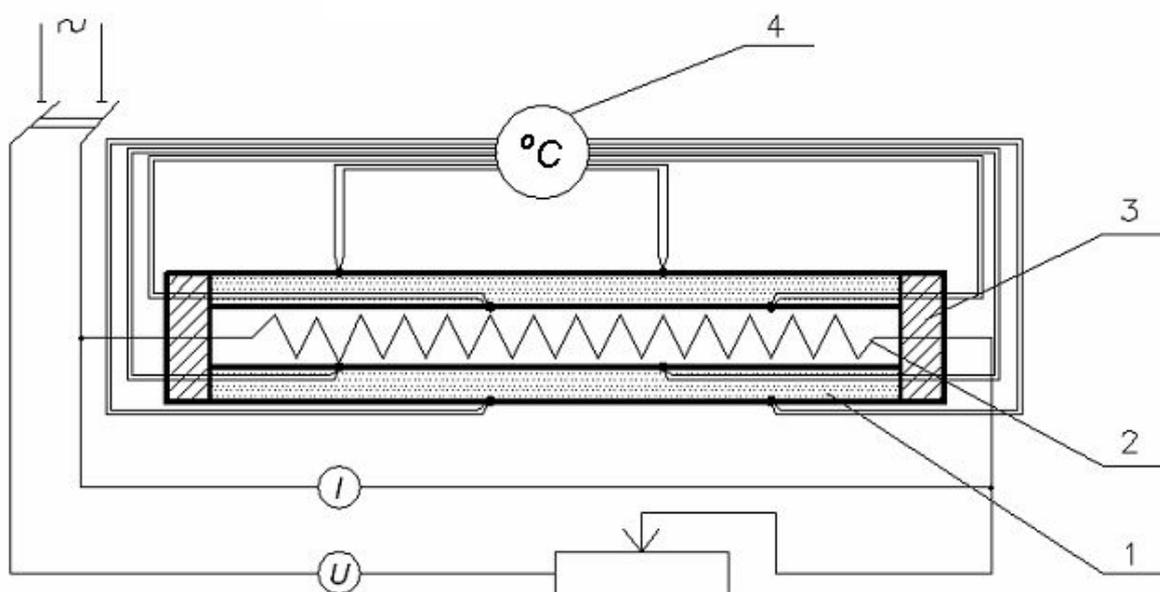


Рисунок 2

Лабораторная установка схематически изображена на см. рисунок 2. Внутри трубы, изготовленной из испытуемого материала 1, с наружным диаметром 38 мм и длиной 0,5 м на кварцевой трубке установлен электронагреватель 2 в виде нихромовой спирали. Для устранения осевых утечек тепла торцы трубы закрыты пробками, изготовленными из теплоизоляционного ультраалюмосиликатного 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 по формуле:

$$\lambda_{cp} = \frac{IU \ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \pi l (T_1 - T_2)}; \quad (17)$$

Отсчет показаний термопар производят 4 раза с интервалом 15 минут, при установившемся тепловом режиме. Показания прибора заносят в таблицу 2.

Таблица 2

№ п/п	Время, τ , мин	Температура, T °С		Сила тока, I, А	Напряжение, U, В
		T_{1cp}	T_{2cp}		
1	15				
2	30				
3	45				
4	60				

Полученное значение λ относят к средней температуре материала:

$$T_{cp} = \frac{T_1 + T_2}{2}; \quad (18)$$

где: T_1 и T_2 – температуры 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 (см. приложение, таблица 1).

Лабораторная работа №3

Определение коэффициента теплопроводности материала методом шара

Цель работы – экспериментальное определение коэффициента теплопроводности материала методом шара.

Описание лабораторной установки

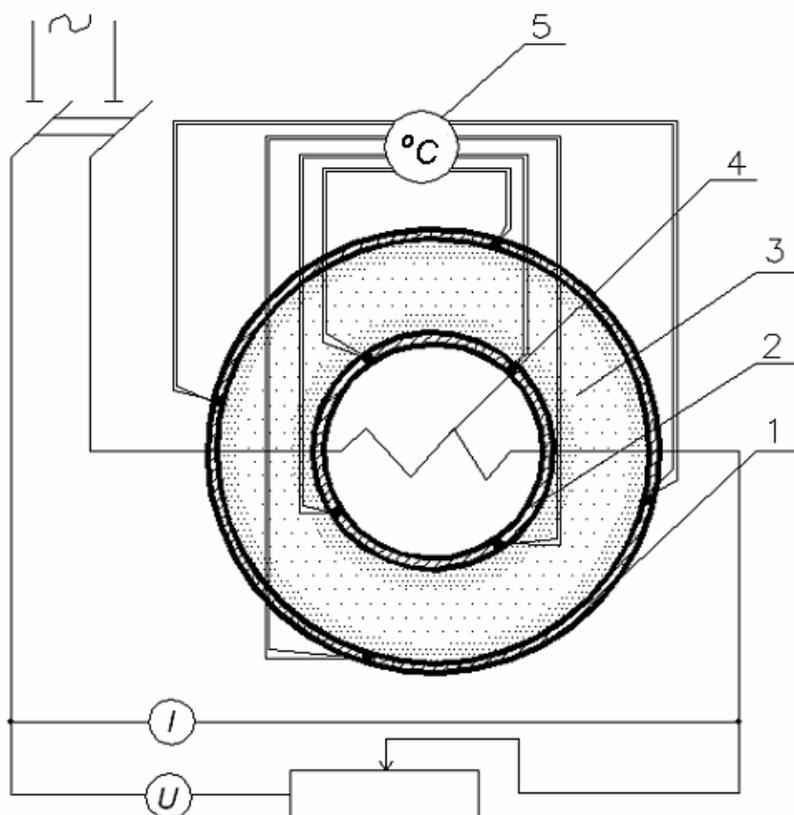


Рисунок 3

Схема лабораторной установки изображена на см. рисунок 3. В пространстве 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 лабораторным 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 термометров, 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 минут при наступлении стационарного режима. Затем находят средние значения полученных экспериментальных данных в каждый промежуток времени. Одновременно регистрируют показания амперметра и вольтметра. Результаты измерений заносят в таблицу 3.

Таблица 3

№ п/п	Время, τ , мин	Температура, T °С		Сила тока, I, А	Напряжение, U, В
		T _{1cp}	T _{2cp}		
1	15				
2	30				
3	45				
4	60				

Определение коэффициента теплопроводности производят при наступлении стационарного теплового режима по формуле:

$$\lambda_{cp} = \frac{IU\delta}{\pi d_1 d_2 (T_1 - T_2)}; \quad (19)$$

где: T_1 – средняя температура поверхности внутренней сферы, °С;
 T_2 – средняя температура поверхности внешней сферы, °С;

$$\delta = \frac{d_2 - d_1}{2}; \quad (20)$$

δ – толщина образца, м.

Коэффициент теплопроводности λ_{cp} относится к средней температуре стенки.

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.

Конвективный теплообмен

Основные понятия

Конвективный теплообмен представляет собой сложный процесс переноса теплоты в жидкостях и газах, обусловленный перемещением вещества в пространстве. В микрообъемах имеет место процесс переноса тепла теплопроводностью, а на макроуровне – за счет перемешивания. На формирование и интенсивность теплового потока между стенкой и жидкостью влияют физические свойства жидкости и режим ее движения, размеры и положение тела в пространстве и т.д. Из теплофизических свойств жидкости наибольшее влияние на теплообмен оказывают: плотность ρ (кг/м³), теплопроводность λ (Вт/м · °С), теплоемкость c (Дж/кг · °С). Для реальной жидкости необходимо учитывать вязкость ν (м²/с) –сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой. Вязкость зависит от температуры и давления. Сила вязкого трения зависит от динамического коэффициента вязкости μ . В технических расчетах чаще пользуются кинематическим коэффициентом вязкости $\nu = \mu/\rho$ (м²/с).

В зависимости от природы возникновения различают конвективный теплообмен при вынужденном и свободном движении жидкости. Свободная конвекция происходит вследствие разности температур и плотностей жидкости или газа. Если движение поддерживается искусственно, за счет внешних возбудителей (насос, вентилятор и т.п.) имеет место вынужденная конвекция.

По характеру движения различают ламинарное и турбулентное течение жидкости. При малых скоростях, движение частиц жидкости происходит по плавным, непересекающимся траекториям. Вид траектории движения частиц определяется формой границ тела, обтекаемого потоком. Такое движение носит название слоистого или ламинарного.

Турбулентное движение характеризуется хаотичным движением частиц. Траектории движения быстро изменяются во времени и в пространстве. Скорость, давление и другие параметры изменяются беспорядочно и нерегулярно.

Для процессов теплоотдачи характер движения жидкости определяет механизм переноса теплоты. Перенос теплоты при ламинарном движении в направлении нормали к поверхности стенки осуществляется теплопроводностью. При турбулентном характере движения жидкости в тонком слое у поверхности течение жидкости замедляется, вследствие наличия вязкого трения. Этот слой называют пограничным или слоем Прандтля. Пограничный слой представляет собой область течения вязкой жидкости с малой толщиной по сравнению с продольными размерами области и большим градиентом скорости, температуры и концентрации, изменением которых и обуславливаются процессы переноса количества движения, теплоты и вещества. Различают гидродинамический, тепловой и диффузионный пограничные слои. Гидродинамический пограничный слой представляет собой область потока, непосредственно прилегающую к поверхности твердого тела, в которой происходят наиболее существенные изменения скорости. Тепловой и диффузионный пограничные слои характеризуют

область потока, в которой имеют место наибольшие градиенты температуры или концентрации компонентов смеси. В самом пограничном слое движение может быть как ламинарным, так и турбулентным, но всегда существует ламинарный подслой. Термическое сопротивление этого слоя оказывает существенное влияние на интенсивность теплообмена, так как перенос теплоты через ламинарный слой осуществляется теплопроводностью.

Для определения количества тепла, передаваемого конвекцией, обычно пользуются уравнением Ньютона – Рихмана:

$$Q = \alpha(T_f - T_s)F\tau, \quad (21)$$

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

T_f и T_s – температуры поверхности и среды;

F – площадь поверхности, м²;

τ – время, с.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α характеризует интенсивность теплообмена и представляет собой количество теплоты, передаваемого в единицу времени, единицей поверхности, при разности температур между поверхностью и средой в один градус. Коэффициент теплоотдачи зависит от формы и размеров тела, его расположения в пространстве, теплофизических свойств среды, скорости движения, температуры среды и других факторов.

Процесс теплоотдачи определяется тепловыми и гидродинамическими явлениями. Совокупность этих явлений описывается системой дифференциальных уравнений.

Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье–Кирхгофа выведено на основе закона сохранения энергии. Устанавливает связь между временными и пространственными изменениями температуры в любой точке движущейся среды. Для твердых тел уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right); \quad (22)$$

где α – коэффициент температуропроводности, м²/с.

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \rho}; \quad (23)$$

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

$$\frac{DT}{d\tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial T}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial T}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial T}{\partial z}; \quad (24)$$

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

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – 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. Вывод уравнения основан на втором законе Ньютона: сила равна массе, умноженной на ускорение.

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

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial \omega_x}{\partial \tau} + \rho \left(\omega_x \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial \omega_x}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial \omega_x}{\partial z} \right) = \\ & = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial z^2} \right); \end{aligned} \quad (25)$$

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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega_z)}{\partial z} = 0; \quad (26)$$

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

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} = 0; \quad (27)$$

Для процессов конвективного теплообмена система дифференциальных уравнений охватывает множество различных процессов теплоотдачи. Чтобы ограничить задачу, необходимо математически описать частные особенности, которые называют условиями однозначности, они включают в себя:

- геометрические условия, характеризующие форму и размеры системы, в которой протекает процесс;
- физические свойства среды и тела;
- 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 на поверхности тела в любой момент времени;
- второго рода – задается плотность теплового потока для каждой точки поверхности тела в любой момент времени;
- третьего рода – задается закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой;
- четвертого рода – соответствует теплообмену поверхности тела с окружающей средой или теплообмену соприкасающихся твердых тел, при равенстве температур их поверхностей.

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.

Наибольшее распространение нашли: 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.

Решение системы дифференциальных уравнений можно значительно упростить применением хорошо построенной расчетной сетки.

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

Аналитические решения системы уравнений конвективного теплообмена получены лишь для ограниченного числа простейших задач. В связи с этим при изучении процессов теплоотдачи большое внимание уделяют экспериментальным исследованиям, которые позволяют получать более достоверные данные. Однако, исследования на реальном объекте часто бывают затруднительными. Кроме того, полученные результаты, возможно, использовать только для условий проведенного эксперимента. Теория подобия объединяет достоинства аналитического и экспериментального методов и допускает проведение опытов на модели натурального объекта.

В теории подобия 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, характеризующиеся общим физическим механизмом процессов, математической моделью которых, являются одинаковые по физическому содержанию и форме записи дифференциальные уравнения. Кроме класса и единичного явления в теории подобия введено понятие группы физических явлений. Группой явлений называют совокупность физических процессов, описываемых одинаковыми как по форме, так и по содержанию дифференциальными уравнениями и условиями однозначности. При переходе от единичного явления к группе явлений, применяют подобное преобразование условий однозначности. Единичное явление преобразуют в группу явлений. Различные явления данной группы можно рассматривать как одно и то же явление, но представленное в различных масштабах. Все явления, входящие в группу, подобны между собой. Подобные преобразования заключаются в том, что значение каждой физической величины умножают на некоторый постоянный, выбранный для этой величины, числовой множитель. Придавая множителям различные значения, получим 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. 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 следующие критерии:

– критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega l}{\nu}; \quad (28)$$

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 к силам внутреннего трения (вязкости).

- критерий Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}; \quad (29)$$

где: α – коэффициент температуропроводности, м/с.

Критерий **Pr** учитывает влияние теплофизических параметров пограничного слоя среды при конвективном теплообмене. По физическому смыслу это мера подобия полей температур и скоростей.

- критерий Грасгофа

$$Gr = \beta g \Delta T \frac{l^3}{\nu^2}; \quad (30)$$

где: β – коэффициент термического расширения. Для газов – величина обратная температуре, в градусах Кельвина;

l – определяющий размер, м;

ΔT – разность температур поверхности и среды, °С;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

g – ускорение силы тяжести (9,81 м/с²).

Физический смысл критерия **Gr** представляет собой меру отношения подъемной силы, возникающей в жидкости или газе, вследствие различия плотностей объемов среды, к силе молекулярного трения.

- критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha_k l}{\lambda}; \quad (31)$$

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.

По своему 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 не определяет развитие физического процесса теплообмена, поэтому он является определяемым, из него определяют коэффициент теплоотдачи α .

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.

Функциональная зависимость между числами или критериями подобия называется критериальным уравнением или уравнением подобия. Для подобных явлений, одинаковые критерии подобия имеют одинаковые величины – первая теорема подобия. Вторая теорема утверждает возможность представления дифференциальных уравнений, описывающих физический процесс, в виде функциональной связи между критериями подобия.

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

$$Nu = A Re^n Pr^m Gr^v \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25}; \quad (32)$$

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

Множитель $(Pr_f/Pr_s)^{0,25}$ – поправка, учитывающая влияние изменения 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, т.к. критерий $Re \rightarrow 1$:

$$Nu = A_1 Gr^{v_1} Pr^{m_1} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25} ; \quad (33)$$

При вынужденном движении жидкости критерий $Gr \rightarrow l$ критериальное уравнение имеет вид:

$$Nu = A_2 Re^{n_2} Pr^{m_2} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25} ; \quad (34)$$

Связь между числами подобия получают из эксперимента, 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.

Для подобия физических процессов необходимо, чтобы процессы были качественно одинаковыми, а их определяющие критерии были численно равны. Третья теорема подобия устанавливает правила моделирования физических процессов, т.е. определяет какие условия необходимы и достаточны, для подобия процессов теплообмена.

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

Лабораторная работа №4

Исследование процесса теплоотдачи при свободной конвекции

Цель работы – экспериментальное определение коэффициента 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:

$$q_0 = q_k + q_l; \quad (35)$$

Конвективная составляющая потока может быть представлена соотношением:

$$q_k = \alpha_k(T_n - T_c); \quad (36)$$

а лучистая составляющая (закон Стефана – Больцмана):

$$q_l = \varepsilon_{np} c_0 \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]; \quad (37)$$

В практике инженерных расчетов обычно рассчитывают общий поток тепла q_0 не отдельно по формулам (36, 37), а через общий коэффициент теплоотдачи α_0 по выражению:

$$q_0 = \alpha_0 (T_n - T_c); \quad (38)$$

Здесь общий коэффициент теплоотдачи α_0 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. Однако, с учетом (38) можно выразить величину α_0 как:

$$\alpha_l = \frac{\varepsilon_{np} c_0 \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]}{T_n - T_c}; \quad (39)$$

При известных значениях величин, входящих в уравнение (39) можно определить α_l . Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k можно определить из критериального уравнения свободной конвекции:

$$Nu = c (Gr Pr)^n; \quad (40)$$

c и n – коэффициенты, принимаемые в зависимости от величины произведения $Gr \cdot Pr$ (см. приложение, таблица 2).

Описание лабораторной установки

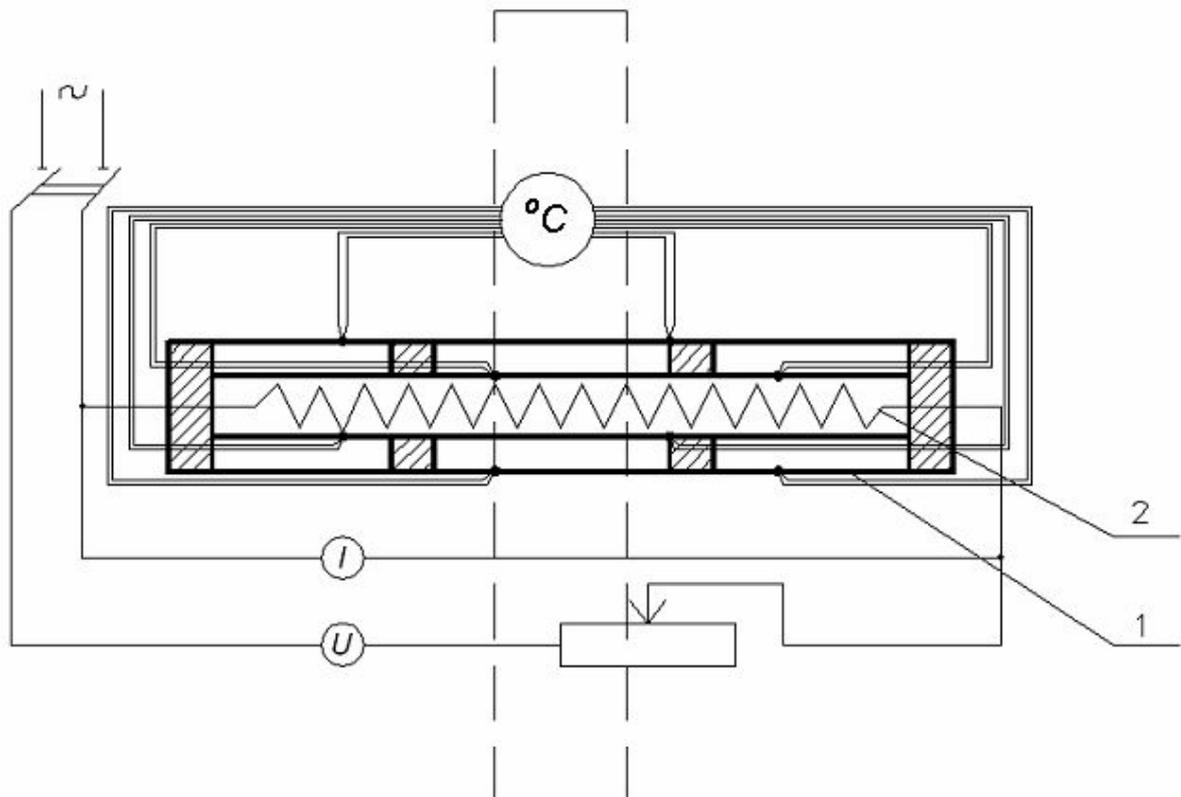


Рисунок 4

Основу установки (см. рисунок 4) представляет собой труба 1 наружным диаметром $d=38$ мм и длиной $l=500$ мм, внутри которой установлен электрический нагреватель 2. По истечении некоторого времени, после включения нагре-

вателя в сеть, устанавливается стационарный режим, и все тепло от нагревателя, передается через боковую поверхность в окружающую среду.

О стационарности режима судят по показаниям термопар. 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 (постоянство температур между телом и средой во времени) фиксируют показания термопар, температуру поверхности трубы, амперметра и вольтметра.

Величину общего коэффициента теплоотдачи α_0 определяют из уравнения:

$$\alpha_0 = \frac{IU}{F(T_n - T_c)}; \quad (41)$$

Далее переходят к определению величины α_l по уравнению (39), при этом принимают $\varepsilon_{np}=0,8$ (сталь окисленная при температуре 600°C); $c_0=5,67$ Вт/(м²·К).

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяют из уравнения (). Для этого вычисляют значение произведения критериев Gr и Pr и по данным таблицы 2 определяют значения коэффициентов “с” и “n”. После вычисления значения критерия Nu определяют величину α_k :

$$\alpha_k = \frac{Nu\lambda}{L}; \quad (42)$$

Суммируя рассчитанные величины α_k и α_l , определяют значение α_0 и сравнивают его с рассчитанным по формуле (41).

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

Таблица 4

№ п/п	Температура поверхности, °С				Температура среды, °С	Параметры нагревателя	
	T1	T2	T3	T4	Tc	I, А	U, В
1.							
2.							

Лабораторная работа №5

Определение коэффициента теплоотдачи от охлаждающегося тонкого тела

Цель работы – экспериментальное определение и расчет теплоотдачи 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 :

$$cm(T_1 - T_2) = \alpha_0(T_n - T_c)F\tau; \quad (43)$$

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_n принимается средней за расчетный период τ . Температура среды T_c принимается постоянной 20°C .

Из уравнения (43) можно определить значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_0 = \frac{cm(T_1 - T_2)}{F(T_n - T_{cp})\tau}; \quad (44)$$

Полученная величина коэффициента теплоотдачи включает конвективную и лучистую составляющие:

$$\alpha_0 = \alpha_l + \alpha_k; \quad (45)$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k можно рассчитать, используя критериальную зависимость:

$$Nu = c (Gr \cdot Pr)^n; \quad (46)$$

c и n – коэффициенты, принимаемые в зависимости от величины комплекса $Gr \cdot Pr$ (см. приложение, таблица 2).

Определив величину критерия Nu , определяют значение α_k :

$$\alpha_k = \frac{Nu \lambda}{L}; \quad (47)$$

Лучистую составляющую определяют из соотношения:

$$\alpha_l = \frac{\varepsilon_{np} c_0 \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]}{T_n - T_c}; \quad (48)$$

Описание лабораторной установки

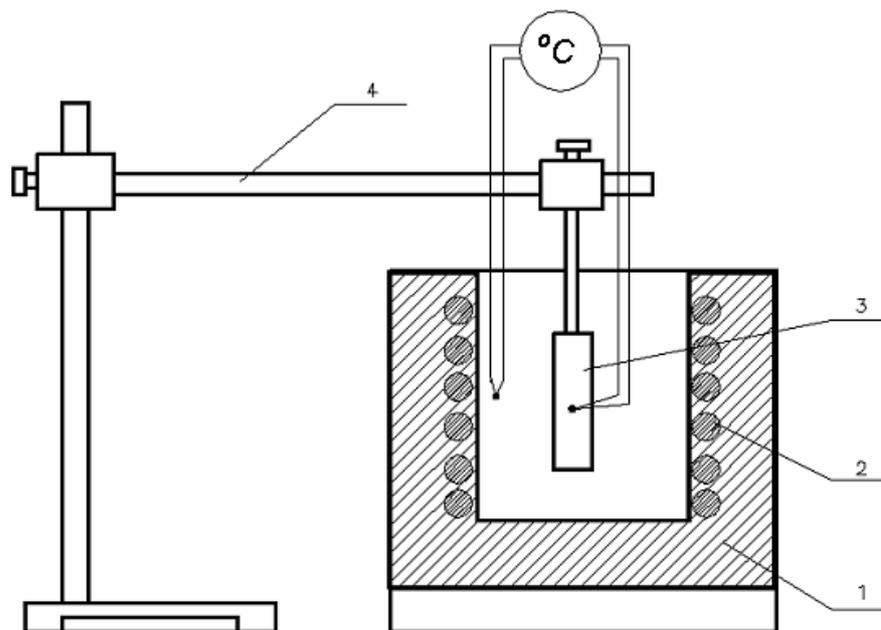


Рисунок 5

Установка (см. рисунок 5) 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 разогревают в печи до температуры 800 – 850 °С, извлекают из печи и подвешивают на штатив. Запись температуры тела производят через определенные промежутки времени.

Полученные в процессе эксперимента данные используют для построения графика $T_n=f(\tau)$. По указанию преподавателя рассчитывают общий коэффициент теплоотдачи по формуле (44) для трех – четырех промежутков времени. Для тех же интервалов определяют α_k и α_l . По полученным данным на одном графике строят зависимости: $\alpha_0 = f(T)$, $\alpha_k = f(T)$, $\alpha_l = f(T)$.

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 не определяющими критериями подобия?
9. Какие уравнения входят в систему дифференциальных уравнений теплообмена, что такое граничные условия и какого рода они бывают?

Теплообмен при излучении

Основные понятия

Поверхность любого материала (жидкость, твердое тело), температура которого отличается от абсолютного нуля, непрерывно излучает энергию и получает ее от окружающих его тел. 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. Спектр излучения у большинства твердых и жидких тел является сплошным. Чистые металлы излучают энергию в определенных интервалах длин волн, спектр у них прерывистый.

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 результатом 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. Интенсивность излучения с возрастанием температуры увеличивается.

Обозначим через Q количество энергии, проходящее через произвольную поверхность F в единицу времени. Тогда единица поверхности этого тела в единицу времени будет излучать по всем направлениям пространства тепловой поток излучением плотностью E :

$$E = \frac{\partial Q}{\partial F}; \quad (49)$$

Энергия, падающая на поверхность любого тела Q_0 , частично поглощается Q_n , отражается $Q_{отр}$, и, частично, проходит через тело $Q_{пр}$. На основании закона сохранения энергии:

$$Q_n + Q_{отр} + Q_{пр} = Q_0. \quad (50)$$

Разделив правую и левую части уравнения на Q_0 , получим:

$$\frac{Q_n}{Q_0} + \frac{Q_{omp}}{Q_0} + \frac{Q_{np}}{Q_0} = 1; \quad (51)$$

или

$$A + R + D = 1; \quad (52)$$

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 $R=0$.

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. Закон распределения энергии по длинам волн при различных температурах для абсолютно черного тела устанавливается законом Планка:

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(\exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right)}; \quad (53)$$

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, представляющая собой отношение плотности потока излучения, испускаемого в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ к рассматриваемому интервалу длин волн $E_\lambda = dE/d\lambda$.

По мере увеличения длины волны интенсивность излучения возрастает и, достигнув максимума, уменьшается, асимптотически приближаясь к нулю. Согласно закону смещения Вина с повышением температуры максимум теплового излучения смещается в сторону коротких длин волн. Для определения длины волны, на которую приходится максимум излучаемой энергии, необходимо найти первую производную уравнения (53) и приравнять ее к нулю, тогда:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9 \cdot 10^{-6}}{T}; \quad (54)$$

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

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

$$E_0 = \sigma_0 T^4; \quad (55)$$

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

Для инженерных расчетов эту формулу чаще используют в виде:

$$E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4; \quad (56)$$

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

Закон Стефана – Больцмана для серых тел:

$$E = c \left(\frac{T}{100} \right)^4; \quad (57)$$

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

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{c}{c_0} \leq 1; \quad (58)$$

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

Изменение излучения в зависимости от направления определяется законом Ламберта. Количество энергии излучаемое элементом поверхности dF_1 в направлении элемента dF_2 , пропорционально количеству энергии излучаемой по нормали $E_n dF_1$ умноженному на величину элементарного телесного угла $d\Omega$ и $\cos\varphi$.

$$d^2 Q_\varphi = E_n d\Omega \cos\varphi dF_1; \quad (59)$$

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

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

$$E_1/A_1 = E_2/A_2 = \dots E_0 = f(T); \quad (60)$$

Возможны и другие формы записи: $c_1/A_1 = c_2/A_2 = \dots = c_0$;

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

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

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:

$$q = c_{np} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]; \quad (61)$$

где $c_{np} = \varepsilon_{np} c_0$;

В общем случае приведенная степень черноты определяется из выражения:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}; \quad (62)$$

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

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}; \quad (63)$$

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

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

Газы также обладают способностью испускать и поглощать лучистую энергию. Однако, одно – и двухатомные газы (O_2 , H_2 , Ar , N_2) для тепловых лучей прозрачны. Многоатомные газы и пары воды (CO_2 , SO_2 , CH_4 , H_2O и др.) обладают большой способностью излучать и поглощать энергию. В отличие от твердых тел, имеющих сплошной спектр излучения, газы излучают и поглощают энергию в определенных интервалах длин волн. Способностью отражать лучистую энергию газы не обладают.

Интенсивность излучения газа определяется его температурой, составом и эффективной толщиной слоя газа, зависящей от формы и размеров газового потока. Для различных газов существуют номограммы, по которым определяют собственное излучение газа.

Если в газе продолжают протекать 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 несветящихся газов $\varepsilon = 0,1–0,4$. Излучение этих частиц при значительной толщине пламени приближается к излучению абсолютно черного тела.

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 с разными показателями 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 (61) с учетом того чтобы $\varepsilon_{np} \approx \varepsilon_1$.

$$q_c = \varepsilon_c c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F; \quad (64)$$

$$q_a = \varepsilon_a c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F; \quad (65)$$

$$q_b = \varepsilon_b c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F; \quad (66)$$

В этих соотношениях:

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.

Примем, что излучательная способность первого тела известна. 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:

$$\Delta q = q_a - q_b = (\varepsilon_a - \varepsilon_b) c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]; \quad (67)$$

$$\varepsilon_b = \varepsilon_a - \frac{\Delta q}{c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}; \quad (68)$$

Откуда можно определить ε_b :

Таким образом, задачами эксперимента будут являться:

- создание стационарных условий нагревания трех 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

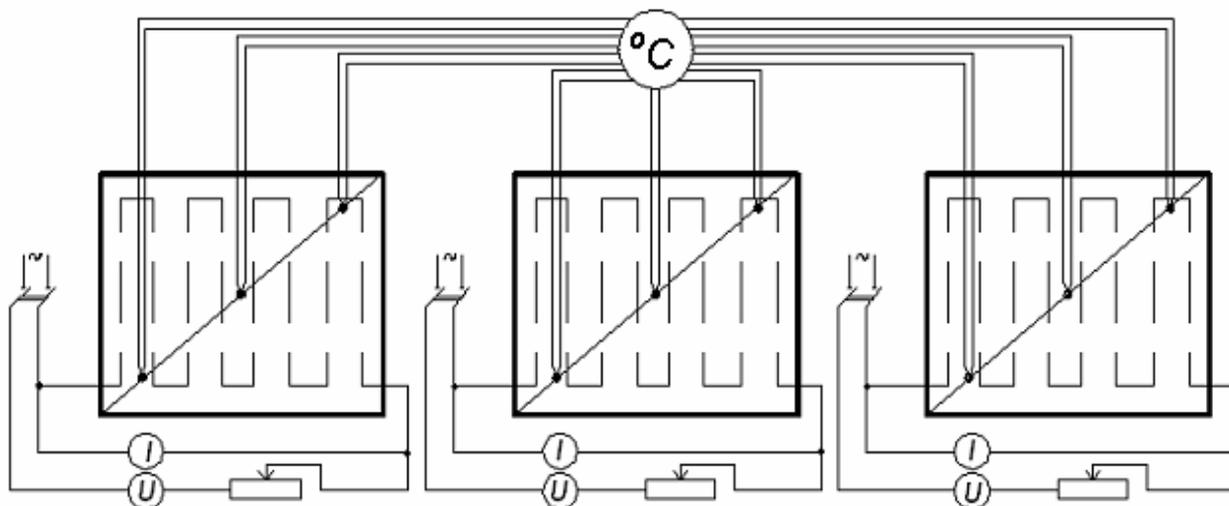


Рисунок 6

Установка (см. рисунок 6) состоит из трех теплоизлучающих образцов 1, 2, 3. Каждый из теплоизлучающих элементов изготовлен 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. Необходимо определить степень черноты этих образцов.

Для определения мощности, потребляемой нагревателями, установлены вольтметры и амперметры. Температуры излучающих поверхностей измеряются с помощью термопар, зачеканенных в пластины и регистрируются с помощью прибора 4. Для регулирования напряжения на нагревателях используются 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 1, 2 и 3. Периодический контроль температуры образцов производят при помощи прибора 4. При достижении стационарного теплового режима на излучателях и одинаковой средней температуры на них фиксируют показания амперметров и вольтметров, полученные значения заносят в таблицу 5.

Таблица 5

№ п/п	Образец 1			Образец 2			Образец 3			Тв, °С	
	Тп, °С			I ₁ , А	U ₁ , В	Тп, °С			I ₁ , А		U ₁ , В
	1	2	3			1	2	3			

Обработка экспериментальных данных сводится к определению средней температуры образцов ($T_{изл}$) и подстановке необходимых величин в выражение (69), которое в конечной форме может быть записано:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 - \frac{I_1 U_1 - I_2 U_2}{c_0 F \left[\left(\frac{T_{изл}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_в}{100} \right)^4 \right]}; \quad (69)$$

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

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается физическая 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.

Теплообмен при кипении и конденсации

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. Для возникновения процесса кипения необходимы, по крайней мере, два условия: температура жидкости должна превышать температуру насыщения и должны быть в наличии центры парообразования. Величина перегрева зависит от свойств жидкости, ее чистоты, давления, а также свойств поверхности. Теплота, расходуемая на парообразование, определяется:

$$Q=rG \tag{70}$$

где Q – количество теплоты, Дж;
 r – теплота фазового перехода жидкости, Дж/кг;
 G – количество пара, кг.

Кипение жидкости может происходить на твердой поверхности и в объеме жидкости. Объемное кипение происходит при перегреве жидкости относительно температуры насыщения при данном давлении. Кроме того, такой процесс кипения может происходить при быстром снижении давления или при наличии в жидкости внутренних источников теплоты.

Образующиеся на поверхности теплообмена пузырьки пара зарождаются в определенных местах обогреваемой поверхности, называемых центрами парообразования. Пузырьки пара разрушают пограничный слой и хорошо перемешивают жидкость, как у поверхности, так и по всему объему.

При увеличении температурного напора, тепловой поток растет до определенного максимума. В течение этого периода имеет место пузырьковый режим кипения. Максимальную тепловую нагрузку называют первой критической плотностью теплового потока. 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. А также материала, строения и шероховатости поверхности нагрева, наличия на ней, неоднородностей состава и адсорбированного поверхностью газа, т.е. от факторов, которые оказывают влияние на количество центров парообразования. 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. Высокая интенсивность теплоотдачи при пузырьковом кипении позволяет отводить от поверхности нагрева достаточно большие плотности теплового потока.

Характерной особенностью второго, переходного режима кипения, является снижение величины теплового потока и коэффициента теплоотдачи, вследствие слияния пузырьков, образования больших паровых полостей, 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. 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. Перенос теплоты, при пленочном режиме кипения, происходит путем конвективного теплообмена и излучения через паровую пленку. Движение пара и толщина пленки зависят от условий движения жидкости, размеров и формы поверхности нагрева и ее расположения в пространстве. Интенсивность теплообмена низкая и 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.

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

Необходимым условием конденсации пара является наличие поверхности с температурой меньшей, чем температура насыщенного пара. В зависимости от состояния поверхности и свойств окружающей среды конденсат образуется на поверхности в виде отдельных капель (капельная конденсация) или в виде сплошной пленки жидкости (пленочная конденсация). Вид конденсации зави-

сит 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. Капельки конденсата зарождаются на микроуглублениях и других элементах неоднородности поверхности. Из-за очень высокой интенсивности, теплоотдача 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, наличия неконденсирующихся газов, которые накапливаются у поверхности и препятствует поступлению пара к поверхности. Присутствие газа представляет дополнительное термическое сопротивление процессу передачи тепла.

В процессе пленочной конденсации перенос теплоты при ламинарном движении жидкости осуществляется теплопроводностью. Толщина конденсатной пленки зависит от высоты стенки H , вязкости жидкости ν и ускорения силы тяжести g .

Комплекс этих величин представляет критерий Галилея:

$$Ga = \frac{gH^3}{\nu^2}; \quad (71)$$

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

$$K = \frac{r}{c\Delta T}; \quad (72)$$

где $\Delta T = T_{жс} - T_n$;

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

- вертикальная плоская стенка или труба, высотой H :

$$Nu = 0,42K^{0,28} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25} ; \quad (73)$$

- горизонтальная труба диаметром d :

$$Nu = 0,72K^{0,25} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0,25} ; \quad (74)$$

Лабораторная работа №7

Исследование процесса теплоотдачи при фазовом переходе

Цель работы – определение коэффициента 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:

$$cm\Delta T = Q = \alpha F(T_1 - T_2)\tau, \quad (75)$$

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

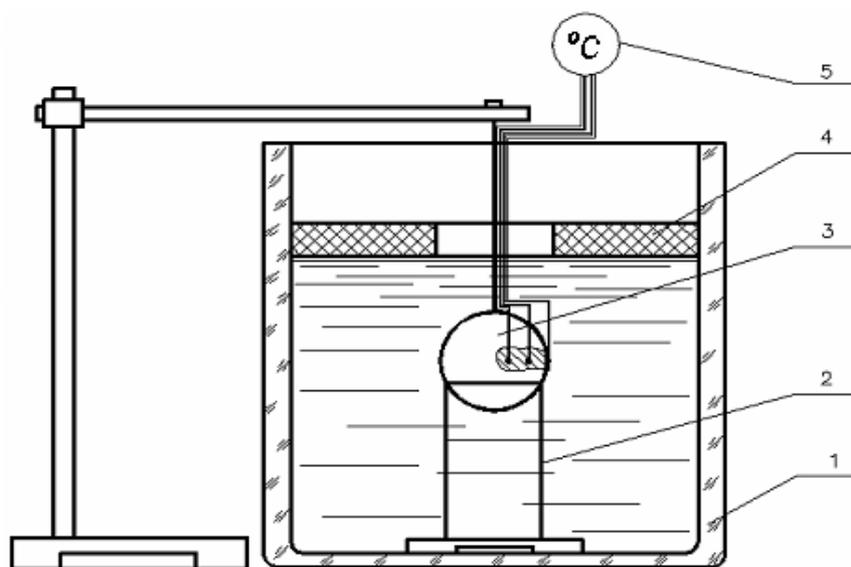


Рисунок 7

Лабораторная установка (см. рисунок 7) 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 его температуру, поместить на подставку в сосуд. Процесс теплообмена нагретого тела с водой сопровождается фазовым переходом воды в парообразное состояние. Эксперимент длится до того момента, пока не прекратится процесс кипения воды у поверхности шара, после чего фиксируются показания термопар. Определяют среднюю температуру воды в различных точках сосуда. Результаты эксперимента заносят в таблицу 6.

Таблица 6

№ п/п	Время, с	Температура, °С					
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆

По формуле:

$$T_{cp} = \frac{T_1V_1 + T_2V_2 + T_3V_3}{\sum V}; \quad (76)$$

определяем среднюю температуру тела. Здесь 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_{1cp} до T_{2cp} . При известной массе шара m и теплоемкости c можно определить количество отданной теплоты:

$$Q_m = c_m m_m (T_{1cp} - T_{2cp}), \quad (77)$$

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

$$Q_в = c_в m_в (T_{2в} - T_{1в}), \quad (78)$$

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 :

Определим коэффициент теплоотдачи:

$$Q = \frac{Q_T + Q_B}{2}; \quad (79)$$

$$\alpha = \frac{Q}{F \tau (T_n - T_{жс})}; \quad (80)$$

где F – боковая поверхность тела, m^2 ;

T_n – средняя за период τ температура поверхности тела;

$T_{жс}$ – средняя за период τ температура воды.

$$T_n = \frac{T_{n1} + T_{n2}}{2}; \quad (81)$$

$$T_{жс} = \frac{T_1 + T_2}{2}; \quad (82)$$

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.

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?

Теплопроводность при нестационарном режиме

Основные понятия

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 оказывает влияние и 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 целью его 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:

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}; \quad (83)$$

где: α – коэффициент теплоотдачи;
 l – характерный размер тела;
 λ – коэффициент теплопроводности тела.

Критерий Био, характеризует относительную интенсивность теплообмена между телом и средой.

$$Fo = \frac{at}{\delta^2}; \quad (84)$$

где: a – коэффициент температуропроводности тела;
 t – текущее время;
 δ – характерный размер тела.

При двухстороннем нагреве δ – половина толщины пластины, для цилиндра или шара – $\delta=r$.

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

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

$$v/v' = f(Bi, Fo, L); \quad (85)$$

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

$$Q/Q_0 = f(Bi, Fo); \quad (86)$$

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

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

$$Q_0 = c\rho V(T_0 - T_c) = c\rho V\theta_0, \quad (87)$$

где: $\theta_0 = T_0 - T_c$.

Для плоской стенки

$$Q_0 = c\rho 2F \delta \theta_0, \quad (88)$$

для цилиндрической

$$Q_0 = c\rho \pi r^2 l \theta_0, \quad (89)$$

для шара

$$Q_0 = \frac{4}{3} c\rho \pi r^3 \theta_0. \quad (90)$$

Лабораторная работа №8

Исследование нестационарного теплового процесса и определение теплофизических характеристик материала

Цель работы – построение нестационарного температурного поля 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:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right); \quad (91)$$

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 эти тела 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:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x_{x=0}} = q = const; \quad (92)$$

$$T_{\tau=0} = T_0; \quad T_{x=\infty} = T_0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_{x=\infty}} = 0; \quad (93)$$

Решение уравнения (91) может быть представлено в виде:

$$T - T_0 = 1,128 \frac{q\sqrt{t}}{\sqrt{\lambda c \rho}}; \quad (94)$$

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

$$b = \sqrt{\lambda c \rho}; \quad (95)$$

Описание лабораторной установки

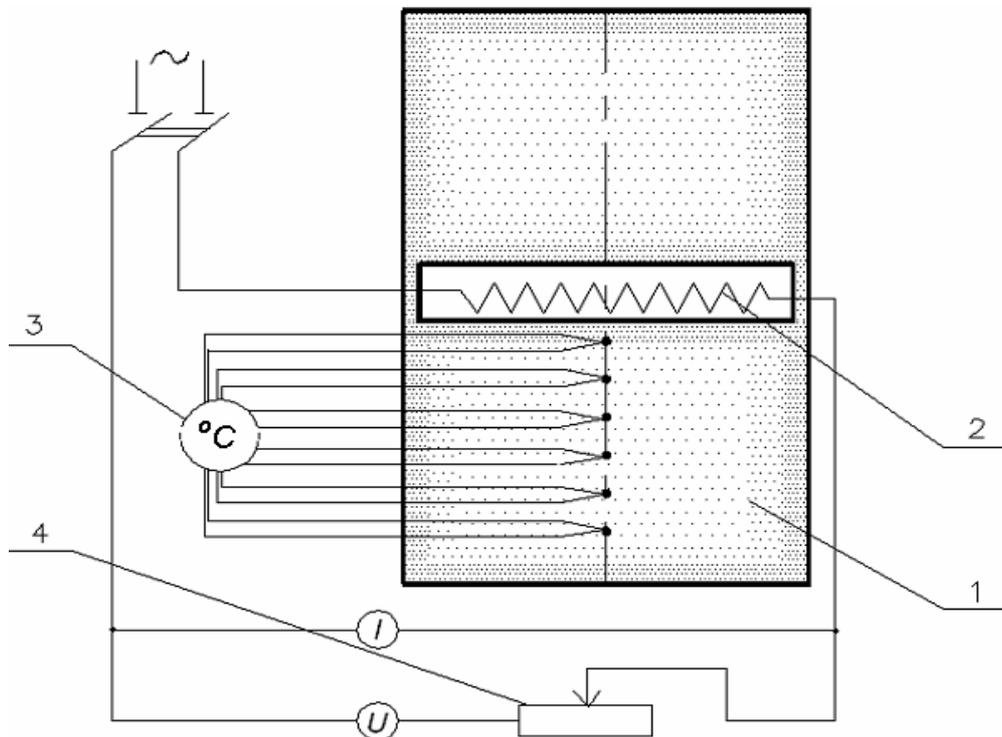


Рисунок 8

Схема лабораторной установке представлена на см. рисунок 8. 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 тепло-

изолируются. По сечению параллелепипеда установлен ряд термопар с шагом 5 мм. Термопары подключены к автоматическому регистрирующему прибору 3.

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

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

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

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:

$$b = \sqrt{\lambda c \rho} = \frac{1,128 IU \sqrt{t}}{T - T_c}; \quad (96)$$

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

Вопросы для самопроверки

1. Что называется нестационарным тепловым 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 .

Литература

1. Михеев Н.А., Михеева И.Н. Основы теплопередачи. М., 1977.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А. Теплопередача. М., 1975.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М., 1980.

Приложение

Свойства огнеупорных материалов

Таблица 1

Материал	γ , кг/м ³	λ , Вт/(м · °С)	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	–

Значения коэффициентов для расчета α при свободной конвекции

Таблица 2

(Gr · Pr)	c	n
$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$	0,500	0
$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,180	1,125
$1 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,540	0,250
$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$	0,135	0,333

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

Таблица 3

T, °С	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кг · °С)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м · °С)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
– 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
– 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

Физические свойства воды на линии насыщения

Таблица 4

T, °C	$p \cdot 10^{-5}$, Па	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кг·°C)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·°C)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	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	323,3	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

Степень черноты полного нормального излучения для различных материалов

Таблица 5

Материал	Температура, °С	Степень черноты, ϵ
Алюминий полированный	225–575	0,039–0,057
То же шероховатый	26	0,055
Алюминий окисленный при 600 °С	200–600	0,11–0,19
Стальное литье полированное	770–1040	0,52–0,56
Сталь листовая шлифованная	940–1100	0,55–0,61
Сталь окисленная при 600 °С	200–600	0,8
Чугун обточенный	830–990	0,60–0,70
Чугун окисленный при 600 °С	200–600	0,64–0,78
Латунная пластинка, прокатанная, с естественной поверхностью	22	0,06
Латунная пластинка, прокатанная, обработанная грубым наждаком	22	0,20
Латунная пластинка тусклая	50–350	0,22
Латунь окисленная при 600 °С	200–600	0,61–0,59
Медь, тщательно полированная, электролитическая	80–115	0,018–0,023
Медь торговая, шабренная до блеска, но не зеркальная	22	0,072
Медь, окисленная при 600 °С	200–600	0,57–0,87
Расплавленная медь	1075–1275	0,16–0,13

Свинец серый, окисленный	25	0,281
Свинец окисленный при 200°C	200	0,63
Вода	0–100	0,95–0,963
Кварц плавленный, шероховатый	20	0,932
Кирпич динасовый, неглазурованный, шероховатый	100	0,80
Кирпич динасовый, глазурованный, шероховатый	1100	0,85
Кирпич шамотный, глазурованный	1100	0,75
Кирпич огнеупорный	–	0,8–0,9
Сажа, свечная копоть	95–270	0,952
Сажа с жидким стеклом	100–185	0,959–0,947

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

Таблица 6

Параметр	Температура, °С							
	0	100	200	300	400	500	700	900
Сталь 15								
γ , кг/м ³	7841 7850	7818 7825	7787 7794	7752 7759	7715 7724	7682 7687	7611	7584
ср 103 кДж/ (кг·°С)	456,4 439,6	494,0 485,7	531,7 531,7	535,9 577,8	619,6 619,6	682,6 686,6	523,4	669,9
λ , Вт/(м·°С)	50,3 52,3	53,1 53,4	52,2 53,3	49,3 49,3	46,1 46,1	42,8 42,8	35,7	29,5
Сталь 35								
γ , кг/м ³	7803 7826	7781 7804	7751 7771	7725 7737	7702 7700	7667 7662	7853	7549
ср 103 кДж/ (кг·°С)	443,8 435,4	498,2 489,9	519,2 531,7	535,9 569,9	607,1 611,3	665,7 665,7	912,7	573,6
λ , Вт/ (м·°С)	40,0 47,9	42,9 49,4	45,4 49,1	44,9 46,5	42,7 43,7	40,6 40,6	34,8	28,0
Сталь 45								
γ , кг/м ³	7794 7821	7772 7799	7746 7769	7722 7735	7700 7698	7767 7662	7587	–
ср·10 ³ кДж/ (кг·°С)	560,5 443,8	498,2 489,9	519,2 535,9	515,0 569,4	602,9 611,3	661,5 657,3	883,4	582,0
λ , Вт/(м·°С)	32,0 45,9	36,1 47,8	39,2 47,1	40,6 44,8	39,7 41,9	38,0 38,6	32,7	24,5

Продолжение таблицы 6

Медь							
Параметр	Температура, °С						
	20	100	300	600	900	1083	1200
γ , кг/м ³	8930	8900	8840	8700	8620	8510	8320
ср 10 ³ кДж/ (кг·°С)	0,381	0,399	0,422	0,456	0,481	0,533	–
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
λ , Вт/(м·°С)	105,8	109,3	110,5	114,0	116,3	119,8	121,0
Латунь Л62							
λ , Вт/(м·°С)	105,8	119,8	137,2	152,4	168,6	186,1	200,0
Латунь свинцовистая ЛС59–1							
λ , Вт/(м·°С)	104,7	116,3	127,9	140,7	155,8	169,8	182,6
Бронза АЖН 11–6–6							
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
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
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
λ , Вт/(м·°С)	106	120	137	152	169	186	200
Алюминий							
Параметр	Температура, °С						
	20	100	300	400	500	600	800
γ , кг/м ³	2696	2690	2650	2620	2580	2550	2350
ср 103 кДж/ (кг·°С)	0,879	0,942	1,038	1,059	1,101	1,143	1,076
λ , Вт/(м·°С)	205,9	204,7	230,3	248,9	267,5	280,3	62,8