

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
6-05-0722-05 «Производство изделий на основе
трехмерных технологий»
очной формы обучения*



Могилев 2026

УДК 536.24.01
ББК 22.21
Т33

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «26» января 2026 г.,
протокол № 11

Составитель канд. техн. наук, доц. В. П. Груша

Рецензент канд. техн. наук, доц. Е. В. Ильюшина

Изложены задачи, учебная литература по изучению тематики курса «Термодинамика и теплопередача в машиностроении», которые направлены на закрепление теоретического материала курса, а также ознакомление студентов с методиками измерений и исследований теплофизических процессов, протекающих в производственных агрегатах. Большое внимание уделяется приобретению студентами навыков ведения самостоятельной научно-исследовательской работы, анализа и обобщения полученных результатов.

Учебное издание

ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В МАШИНОСТРОЕНИИ

Ответственный за выпуск	Д. И. Якубович
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать 26.06.2026 . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,56 . Уч. -изд. л. 2,63 . Тираж 26 экз. Заказ № 501.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2026

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Изучение способов и приборов для измерения температуры	5
2 Лабораторная работа № 2. Изготовление термопары, измерение температуры, построение градуировочной характеристики	13
3 Лабораторная работа № 3. Построение температурного поля и определение температурного градиента	18
4 Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента теплопроводности твердого тела	21
5 Лабораторная работа № 5. Теплопроводность многослойной плоской стенки при стационарном режиме	25
6 Лабораторная работа № 6. Исследование теплоотдачи при свободном движении воздуха	29
7 Лабораторная работа № 7. Исследование теплового излучения твердого тела	35
8 Лабораторная работа № 8. Изучение процесса нестационарной теплопроводности различных материалов	38
Список литературы	42

Введение

Задачей дисциплины «Термодинамика и теплопередача в машиностроении» является закрепление теоретического материала курса, а также ознакомление студентов с методиками измерений и исследований теплофизических процессов, протекающих в производственных агрегатах. Большое внимание уделяется приобретению студентами навыков ведения самостоятельной научно-исследовательской работы, анализа и обобщения полученных результатов.

Для осмысленного выполнения работы студенты предварительно изучают теоретические положения, методику исследования, принцип работы приборов и оборудования.

Перед началом работы студенты проходят инструктаж по технике безопасности.

1 Лабораторная работа № 1. Изучение способов и приборов для измерения температуры

Цель работы: изучить различные методы измерения температуры, устройство отдельных термометров и принцип их работы.

Оборудование: печь SNOL, термопары ХА, экранный многоканальный регистратор JUMO, пирометр «Кельвин».

Температура: основные понятия и определения.

Одним из основных параметров, определяющих ход технологических процессов, является температура. Точное и надежное измерение данной величины в значительной мере определяет качество выпускаемой продукции и эффективность автоматизированных систем управления технологическим процессом. Многообразие задач предопределило появление большого числа различных методов и средств измерения температуры.

Температура – параметр теплового состояния, который характеризует степень нагретости тела. Значение этого параметра обуславливается средней кинетической энергией поступательного движения молекул данного тела. При соприкосновении двух тел, например газообразных, переход теплоты от одного тела к другому будет происходить до тех пор, пока значения средней кинетической энергии поступательного движения молекул этих тел не будут равны. С изменением средней кинетической энергии движения молекул тела изменяется степень его нагретости.

Если тела имеют разную температуру, то при их контакте происходит выравнивание внутренних энергий: тело, имеющее более высокую температуру, а значит, и большую среднюю кинетическую энергию молекул, передает свою теплоту телу, имеющему меньшую температуру, а значит, и меньшую среднюю кинетическую энергию, до тех пор, пока их температуры не станут равными. Таким образом, температура является параметром, характеризующим как качественную, так и количественную сторону процессов теплообмена. Она характеризует также и направление передачи тепловой энергии.

Измерить температуру непосредственно, как плотность или линейные размеры, невозможно. Поэтому температуру определяют косвенно, по изменению физических свойств различных тел, так называемых термометрических параметров. *Термометрические параметры* – это параметры, которые однозначно и монотонно изменяются в зависимости от температуры. Такими параметрами являются объем, длина, электрическое сопротивление, термо-электродвижущая сила, энергетическая яркость излучения и др.

Для определения изменяющегося уровня теплового состояния необходимо иметь непрерывный ряд значений выбранного свойства термометрического вещества, т. е. температурную шкалу. *Температурная шкала* – непрерывная совокупность чисел, линейно связанных с числовыми значениями данного,

достаточно точно измеряемого физического свойства, являющегося однозначной и монотонной функцией температуры.

Существует множество разнообразных устройств для измерения температуры твердых, жидких и газообразных сред, использующих различные термометрические свойства, – термометров. *Термометр* – это прибор, применяемый для измерения температуры путем преобразования ее в показания или сигнал, являющийся известной функцией температуры. Часть термометра, преобразующая тепловую энергию в другой вид энергии, называется чувствительным элементом.

Различают *контактные и бесконтактные методы измерения температуры*. При контактных методах измерения чувствительный элемент термометра приводится в непосредственное соприкосновение с исследуемой средой. При бесконтактных методах чувствительный элемент термометра и исследуемая среда не приводятся в непосредственное соприкосновение.

Термометры стеклянные жидкостные.

Принцип действия стеклянных жидкостных термометров основан на тепловом расширении термометрической жидкости, заключенной в термометре. Термометры обладают большей инерционностью, удобны для наблюдения температур в лабораторных и производственных условиях, применяются для измерения температур в области от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура измеряемой среды, в которую помещены резервуар и часть капилляра, определяется по изменению объема термометрической жидкости. Это изменение оценивается по положению уровня жидкости в капилляре, который отградуирован в градусах Цельсия.

Для заполнения жидкостных термометров применяют ртуть, толуол, этиловый спирт, керосин, петролейный эфир, пентан и т. д.

Из жидкостных термометров наибольшее распространение получили ртутные. Они обладают рядом преимуществ: ртуть не смачивает стекла, ее сравнительно легко получить в химически чистом виде и при нормальном атмосферном давлении она остается жидкой в широком интервале температур. К числу недостатков ртути относят сравнительно малый коэффициент расширения, что требует изготовления термометров с тонкими капиллярами.

Стеклянные термометры с органическими термометрическими жидкостями применяются в интервале температур от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако эти жидкости смачивают стекло и поэтому требуют применения капилляров с довольно большим диаметром.

К достоинствам стеклянных жидкостных термометров относятся высокая точность измерений, простота и дешевизна. Недостатками являются относительно плохая видимость шкалы, практическая невозможность передачи показаний на расстояние, невозможность автоматической регистрации показаний, невозможность ремонта термометра, инерционность измерений.

Биметаллические термометры.

Область применения биметаллических термометров лежит в интервале $-60\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от марки используемого биметалла.

Твердые тела в различной степени изменяют свои линейные размеры при изменении их температуры. Данное свойство положено в основу принципа действия биметаллических термометров.

В качестве чувствительного элемента в биметаллических термометрах используется термобиметаллическая пластина (рисунок 1.1, а), состоящая из двух слоев разнородных металлов 1 и 2, обладающих различными коэффициентами линейного расширения, например инвар (64 % железа, 36 % никеля) – латунь (70 % меди, 30 % цинка) или инвар – сталь, сваренных между собой по всей плоскости соприкосновения. При нагреве такой пластины свободный конец изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения (инвар), и по величине этого перемещения судят о температуре.

К достоинствам биметаллических термометров относятся простота конструкции и дешевизна изготовления.

Недостатками являются относительно невысокая точность измерений, плохая видимость шкалы, инерционность измерений.

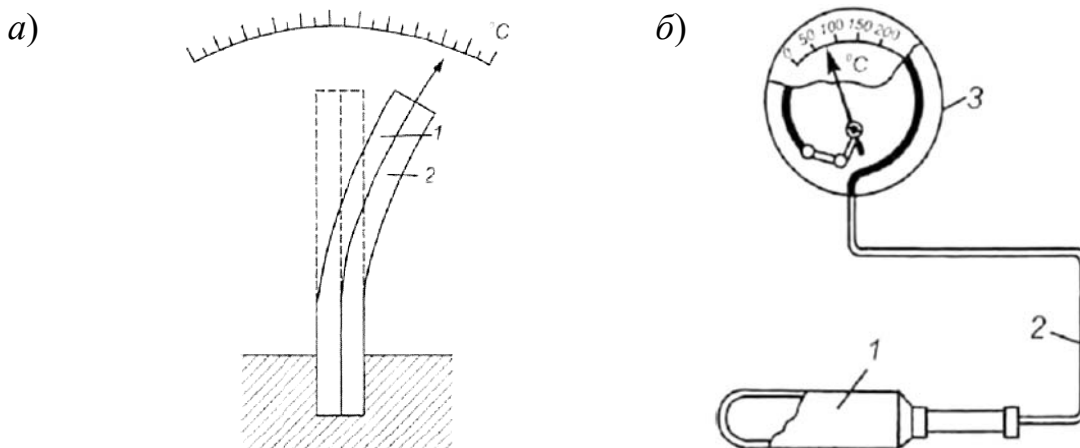


Рисунок 1.1 – Схема биметаллического (а) и манометрического (б) термометров

Дилатометрические термометры.

Термометры этого типа, несмотря на ряд достоинств (высокая чувствительность измерений, простота конструкции, невысокая стоимость термометра, возможность передачи показаний на расстояние, возможность автоматической регистрации показаний), для измерения температуры используются сравнительно редко. В основном они находят применение в качестве первичных измерительных преобразователей в системах автоматической регулировки температуры.

Дилатометрический термометр состоит из металлической трубы (чувствительного элемента), внутри которой находится стержень. Труба имеет коэффициент линейного расширения, больший, чем стержень. Нижняя часть термометра погружается в среду, температура которой измеряется. При

повышении температуры труба удлиняется больше, чем стержень, вследствие чего последний перемещается вниз. Полученное перемещение трансформируется в сигнал и поступает на регистрирующий прибор.

Для получения необходимой чувствительности dilatометрического термометра трубу изготавливают из материала с большим коэффициентом линейного расширения (латунь, сталь), а стержень – из материала, коэффициент линейного расширения которого близок к нулю (инвар).

Термометры манометрические.

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления термометрического вещества в герметически замкнутом объеме от температуры. Термосистема манометрического термометра (рисунок 1.1, б) состоит из термобаллона 1, капилляра 2 и манометрической пружины, один конец которой соединен с капилляром, а другой, запаянный, – со стрелкой измерительного прибора 3.

Манометрические термометры в зависимости от рабочего (термометрического) вещества, заполняющего термосистему, подразделяются на газовые, жидкостные и конденсационные. Манометрические термометры применяются для измерения температур от $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$, конкретные диапазоны измерения определяются заполнителем термосистемы.

Термобаллон системы погружается в измеряемую среду, и рабочее вещество, находящееся в термобаллоне, принимает температуру измеряемой среды. При этом в термосистеме устанавливается давление, определяемое температурой исследуемой среды. При повышении температуры давление повышается, при уменьшении – понижается. Изменение давления рабочего вещества через гибкий капилляр передается на измерительный прибор, являющийся частью манометрического термометра. Измерительным прибором выступает пружинный манометр, рассчитанный на те диапазоны измерения давления, которые имеют место в термосистемах манометрических термометров. При погружении термобаллона в среду изменяется давление термометрического вещества в замкнутой термосистеме, чувствительным элементом которой является манометрическая пружина. Она деформируется, и ее свободный конец перемещается. Данное изменение положения пружины преобразуется в соответствующее перемещение регистрирующей стрелки относительно шкалы прибора. Термобаллон изготавливают из нержавеющей стали, которая обеспечивает возможность контроля температуры химически агрессивной среды.

Газовые манометрические термометры предназначены для измерения температур от $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве рабочего вещества в газовых термометрах применяется азот.

Жидкостные манометрические термометры предназначены для измерения температуры в пределах от $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве рабочего вещества, заполняющего термосистему, применяют ртуть, пропиловый спирт, метаксиллол.

Конденсационные манометрические термометры предназначены для измерения температур в интервале от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термобаллон примерно

на $3/4$ заполнен низкокипящей жидкостью, а остальная часть заполнена паром этой жидкости. Количество жидкости в термобаллоне должно быть таким, чтобы при максимальной температуре не вся жидкость переходила в пар. В качестве рабочей жидкости применяются фреон-22, пропилен, хлористый метил, ацетон. Капилляр и манометрическая пружина заполняются, как правило, другой жидкостью. Давление в термосистеме будет равно давлению насыщенного пара рабочей жидкости, определяемому температурой, при которой находится рабочая жидкость, т. е. температурой окружающей среды.

Манометрические термометры отличаются простотой устройства, возможностью дистанционной передачи показаний и автоматической записи. Одним из важных преимуществ является возможность их использования в пожаро- и взрывоопасных помещениях. К недостаткам относятся невысокая точность измерения, инерционность измерений, трудность ремонта при разгерметизации системы, ограниченное расстояние передачи данных и во многих случаях большие размеры термобаллона.

Термометры сопротивления.

Принцип действия термометров сопротивления основан на способности различных материалов (в первую очередь металлов) изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры. Зная зависимость электрического сопротивления от температуры, по изменению величины сопротивления термометра судят о температуре среды, в которую он погружен. Выходным параметром устройства является электрический сигнал, который может быть измерен с высокой точностью, передан на большие расстояния и непосредственно использован в системах автоматического контроля и регулирования.

В качестве материалов для изготовления чувствительных элементов термометров сопротивления используются чистые металлы: платина (интервал температур от $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+750\text{ }^{\circ}\text{C}$), медь (интервал температур от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$), никель (интервал температур от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$) и полупроводники.

Параметр, характеризующий изменение электрического сопротивления с температурой, называется температурным коэффициентом электрического сопротивления.

Чистые металлы имеют практически линейную зависимость электро-сопротивления от температуры и положительный температурный коэффициент, т. е. повышение температуры ведет к увеличению сопротивления. Сопротивление полупроводников с увеличением температуры резко уменьшается, т. е. они имеют отрицательный температурный коэффициент. Они в основном применяются для измерения низких температур.

Термопары.

Технические термопары позволяют измерять температуры в интервале от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Принцип действия термопар основан на изменении термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) термопары от температуры.

Термопара состоит из двух разнородных проводников, так называемых термоэлектродов, сваренных с одной стороны. Место сварки с прилегающими к нему концами термоэлектродов называется рабочим концом термопары. Рабочий конец термопары погружается в среду, температура которой измеряется. Вторые (несваренные) концы проводников являются «свободными концами». К ним подсоединяются провода от прибора, измеряющего термоЭДС термопары. Если температура концов различна, то в термопаре возникает термоЭДС, которая зависит от материала и температур рабочего и свободного концов термоэлектродов.

Пирометры.

О температуре нагретого тела можно судить на основании измерения параметров его теплового излучения, представляющего собой электромагнитные волны различной длины. Чем выше температура тела, тем большую энергию оно излучает.

Бесконтактные методы измерения температуры теоретически не имеют верхнего предела измерения. Серийно выпускаемые приборы позволяют контролировать температуру от 30 °С до 6 000 °С.

Термометры, действие которых основано на измерении теплового излучения, называют пирометрами. Одним из главных достоинств данных приборов является отсутствие влияния измерителя на температурное поле нагретого тела, т. к. в процессе измерения они не вступают в контакт друг с другом.

Все тела излучают электромагнитные волны различной длины λ и частоты ν . Электромагнитное излучение, возбуждаемое тепловым движением молекул, называют тепловым излучением. Тела характеризуются либо непрерывным спектром излучения (твердые или жидкие вещества), либо селективным (газы). Интегральное излучение – это суммарное излучение, испускаемое телом во всем спектре длин волн. Монохроматическим называют излучение, испускаемое при определенной длине волны. Физические объекты имеют различные оптические свойства: они по-разному поглощают, отражают и пропускают тепловые лучи.

Разработаны различные конструкции пирометров. На рисунке 1.2 представлена схема оптического квазимонохроматического пирометра с исчезающей нитью. Он предусматривает измерение температуры по спектральной энергетической яркости тела, т. е. по излучению при определенной длине волны. Для монохроматизации излучения применяется красный светофильтр.

Принцип работы оптического пирометра излучения основан на сравнении яркости излучения нагретого тела и нити электрической лампы 3 при длине волны 0,65 мкм, пропускаемой красным светофильтром 5. Объектив 1 и окуляр 4 прибора для визирования на тело выполнены подвижными. Лампа питается батареей 7, напряжение которой изменяется реостатом 8 и измеряется милливольтметром 6, шкала которого градуирована в градусах.

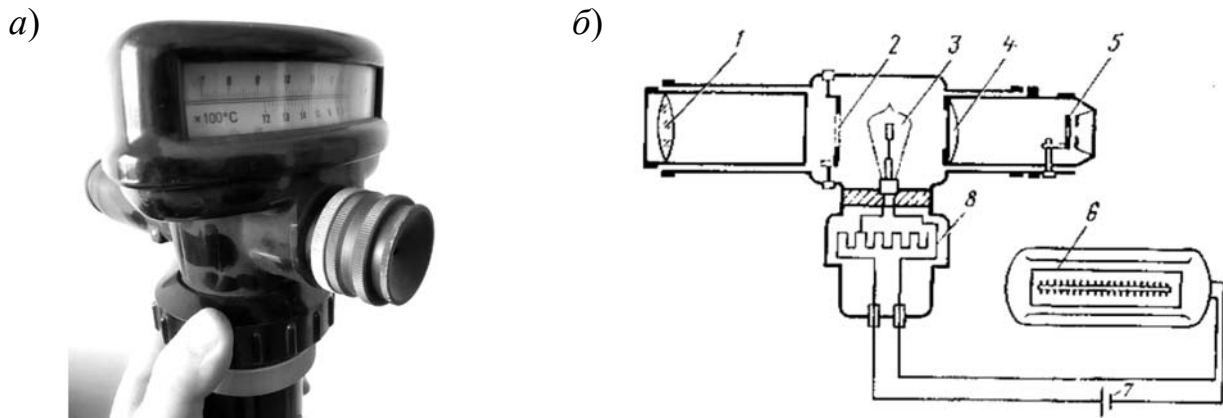


Рисунок 1.2 – Оптический пирометр с исчезающей нитью (а) и его принципиальная схема (б)

Процесс измерения сводится к изменению яркости накала нити пирометрической лампы до тех пор, пока глаз наблюдателя не перестанет различать нить лампы на фоне объекта измерения. В этот момент производят отсчет температуры, т. к. спектральная яркость объекта измерения и яркость нити пирометрической лампы равны.

Измерения температур от $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ также проводят радиационными пирометрами (рисунок 1.3), которые регистрируют лучистые потоки в интервале длин волн $0,4\ldots 2,5\text{ }\mu\text{m}$. Лучистый тепловой поток от нагретого тела 1 концентрируется линзой в пирометре 2 на чувствительном элементе 3. Нагрев элемента сопровождается возникновением термоЭДС, которая автоматически регистрируется 4.

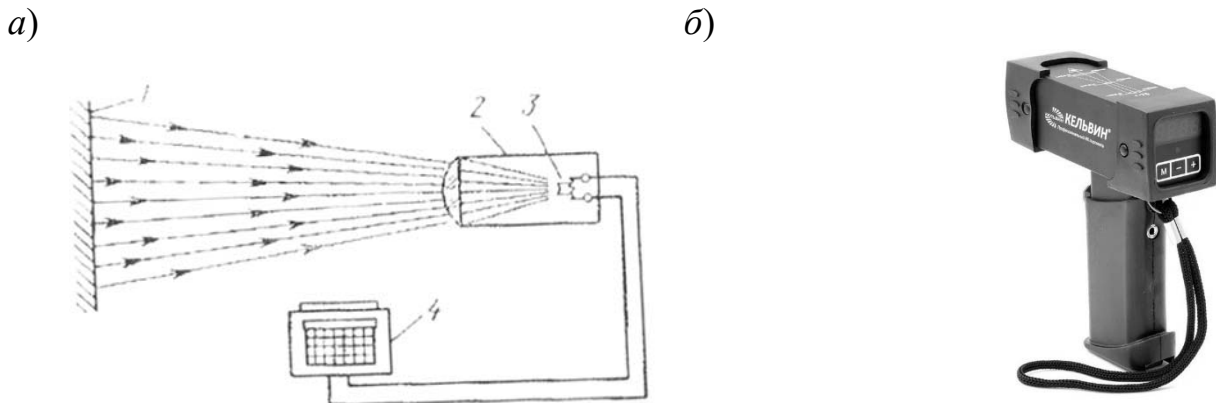


Рисунок 1.3 – Радиационный (а) и инфракрасный (б) пирометры

Существуют также фотоэлектрические и цветные пирометры, обладающие повышенной точностью измерения температур.

Инфракрасные пирометры типа «Кельвин» (см. рисунок 1.3, б) предназначены для бесконтактного измерения температуры поверхности и применяются для контроля теплового режима оборудования, а также для измерения в технологических процессах металлургии, машиностроения и т. д. Они преобразуют энергию инфракрасного излучения, излучаемую поверхностью

объекта, в электрический сигнал. Затем эта информация преобразуется в температурные данные

Данный тип приборов позволяет измерять температуру в широком диапазоне от 800 °С до 6 000 °С.

Преимущества методов измерения температур по излучению: не требуют непосредственного контакта с измеряемой средой, тем самым не искажают температурное поле объекта измерения; верхний предел измерения пирометрами излучения не ограничен; методы очень чувствительны, измерения безынерционны. Недостатки методов: все методы пирометрии дают значения условной температуры, что ведет к достаточно большой погрешности измерений; сравнительно высокая стоимость изготовления таких приборов и сложность ремонта.

Пирометры излучения могут применяться без ограничений при измерении температуры твердых тел и жидких сред, которые имеют непрерывный спектр излучения, а также газов, имеющих линейчатый или полосатый спектр излучения.

Содержание отчета

Общие сведения о методах измерения температуры, принцип работы и схемы отдельных термометров. Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое температура?
- 2 Что такое температурная шкала?
- 3 В чем разница контактных и бесконтактных методов измерения температуры?
- 4 Какой интервал измеряемых температур стеклянными жидкостными и биметаллическими термометрами?
- 5 Какую максимальную температуру можно измерить термопарой?
- 6 Какой принцип работы пирометра?

2 Лабораторная работа № 2. Изготовление термопары, измерение температуры и построение градуировочной характеристики

Цель работы: изучить принцип действия металлических термопар, схемы их включения; построить градуировочную характеристику исследуемой термопары.

Оборудование: печь SNOL, термопары ХА, экранный многоканальный регистратор JUMO, пирометр «Кельвин».

Устройство и принцип работы.

Для измерения температуры в металлургии наиболее широкое распространение получили термоэлектрические термометры, работающие в интервале температур от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше. Данный тип устройств характеризует высокая точность и надежность, возможность использования в системах автоматического контроля и регулирования температуры, которая является параметром, в значительной мере определяющим ход технологического процесса в металлургических агрегатах.

Термоэлектрический метод измерения температур основан на строгой зависимости термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) термоэлектрического термометра от температуры. ТермоЭДС возникает в цепи, составленной из двух разнородных проводников, при неравенстве температур в местах соединения этих проводников.

Принцип действия термопары основан на эффектах Томсона и Зеебека. Эффект Томсона заключается в том, что если проводник, обладающий электронной проводимостью, нагрет по своей длине неравномерно, на его нагретом конце повышается концентрация свободных электронов, которые диффундируют к холодному концу. При этом горячий конец заряжается положительно, а холодный – отрицательно. Если замкнутая цепь состоит из двух различных проводников А и В, то ЭДС Томсона в такой цепи равна разности термоЭДС, возникающих в каждом проводнике, и зависит от температуры спаев.

Эффект Зеебека проявляется в том, что в спаях различных проводников (А и В) возникают контактные разности потенциалов, вызванные диффузией свободных электронов из проводника, где их концентрация больше.

Общая термоЭДС, обусловленная эффектами Томсона и Зеебека, является функцией температур t_0 и t , зависит от физической природы проводников А и В.

В общем случае два любых разнородных проводника могут образовывать термоэлектрический термометр. Поэтому к материалам, используемым для изготовления термоэлектрических термометров, предъявляются следующие требования: постоянство термоэлектрических свойств во времени, линейность градуировочной характеристики, большая величина развиваемой термоЭДС,

однородность термоэлектрических свойств по длине проводника, жаростойкость, жаропрочность, химическая стойкость, возможность воспроизводимого получения сплава одинакового состава, стабильность, однозначность.

Стабильность и воспроизводимость термоэлектрической характеристики материалов обуславливают точность измерения температуры. Жаростойкость и механическая прочность в значительной мере определяют верхние температурные границы применимости термоэлектрических материалов, т. к. с ростом температуры резко ускоряются процессы, ведущие к разрушению термоэлектродов: падение механической прочности; химическое взаимодействие термоэлектродов со средой, с соприкасающимися телами, друг с другом; рекристаллизация; возгонка. При выборе термоэлектродных материалов необходимо учитывать также и технологию их изготовления. Кроме того, необходимо стремиться к тому, чтобы стоимость термоэлектродных материалов была невысокой. Надежная работа термоэлектрических термометров в промышленных условиях определяется не только качеством и свойствами термоэлектродного материала, но также качеством и конструкцией арматуры термометра.

По характеру термоэлектродных материалов термоэлектрические термометры подразделяются на две группы: термоэлектрические термометры с металлическими электродами и термоэлектрические термометры с электродами из тугоплавких соединений, изготовленных в виде порошков различных материалов путем прессования с последующим спеканием.

Рассмотрим наиболее распространенные термоэлектрические термометры первой группы. В таблице 2.1 приведены характеристики некоторых стандартных термоэлектрических термометров.

Таблица 2.1 – Стандартные термоэлектрические термометры

Тип термопары термоэлектрического термометра	Рабочий диапазон длительного режима работы, °C	Максимальная температура кратковременного режима работы, °C
Медь-копелевая	–200...+100	—
Медь-медно-никелевая	–200...+400	—
Железо-медно-никелевая	–200...+700	+900
Хромель-копелевая	–50...+600	+800
Хромель-алюмелевая	–200... +1000	+1300
Платинородий (10 %) - платиновая	0...+1300	+1600
Платинородий (30 %) - платинородиевая (6 %)	+ 300... +1600	+1800
Вольфрамрений (5 %) - вольфрамрениевая (20 %)	0...+2200	+2500

Платинородий-платиновые термоэлектрические термометры применяются для измерения температур в окислительных и нейтральных средах.

В восстановительной среде эти термоэлектрические термометры работать не могут, т. к. происходит существенное искажение показаний термоЭДС термометра. Это лучшие из термоэлектрических термометров по точности и воспроизводимости. Они используются в качестве эталонов и образцовых термометров. Положительным электродом является платинородий (сплав 90 % платины и 10 % родия), отрицательным – чистая платина.

Платинородий-платинородиевые термоэлектрические термометры получили большое распространение для измерения высоких температур. Могут изготавливаться из следующих сплавов: положительный электрод – сплав из 30 % Rh и 70 % Pt, а отрицательный электрод – из 6 % Rh и 91 % Pt. Такие термоэлектрические термометры могут применяться в окислительной (воздушной) и нейтральной атмосфере. Они отличаются большой стабильностью градуировочной характеристики. При технических измерениях температур платинородий-платинородиевыми термоэлектрическими термометрами нет необходимости термостатировать их свободные концы и, следовательно, вводить поправку.

Хромель-копелевые термоэлектрические термометры широко применяют для измерения температур различных сред. Они обладают наибольшим коэффициентом преобразования из всех стандартных термометров. Для изготовления положительного электрода используют хромель, представляющий собой жаропрочный немагнитный сплав на никелевой основе (89 % Ni; 9,8 % Cr; 1 % Fe; 0,2 % Mn). Отрицательный электрод – копель (сплав 55 % Cu и 45 % Ni). Верхний температурный предел длительного применения термоэлектродов из копельной проволоки находится в пределах 500 °С...600 °С при работе в чистом воздухе. Это объясняется тем, что копельная проволока, содержащая медь, сравнительно быстро окисляется при высоких температурах и, следовательно, происходит изменение термоЭДС термоэлектрода.

Хромель-алюмелевые термоэлектрические термометры также широко применяются для измерения температур различных сред. Положительным термоэлектродом является хромелевая проволока, отрицательным служит алюмель, представляющий собой магнитный сплав на никелевой основе (94 % Ni; 2 % Al; 2,5 % Mn; 1 % Si; 0,5 % примеси). Хромель-алюмелевые термоэлектрические термометры обладают лучшей сопротивляемостью окислению, чем другие термопары из благородных металлов. Верхние пределы применения хромель-алюмелевых термоэлектрических термометров зависят от диаметра термоэлектродов. Кроме того, они отличаются достаточно большой стабильностью градуировочной характеристики при высокой интенсивности ионизирующих излучений.

Вольфрамений-вольфрамениевые термоэлектрические термометры предназначены для длительного измерения температур от 0 °С до 2200 °С. Положительный электрод – сплав из 95 % вольфрама и 5 % рения, отрицательный – сплав из 80 % вольфрама и 20 % рения. Такой термометр имеет стандартные характеристики.

Поверка технических термоэлектрических термометров сводится к определению температурной зависимости термоЭДС и сравнению полученной градуировки со стандартными значениями.

Градуировочная характеристика термопары – зависимость возникающей в ней термоЭДС от температуры рабочего спая при нулевой температуре свободных концов.

Градуировка проводится двумя способами: по постоянным (реперным) точкам и методом сличения.

Градуировка по постоянным точкам является наиболее точной и применяется для образцовых термоэлектрических термометров. Проверяемый термоэлектрический термометр помещают в тигель с металлом высокой степени чистоты, установленный в печи, и регистрируют площадку на кривой изменения термоЭДС по мере повышения или понижения температуры металла. Данная площадка соответствует температуре плавления или кристаллизации металла, причем более предпочтительно вести градуировку по точке кристаллизации. В качестве реперных металлов используют золото, палладий, платину и др.

Методом сличения проводится градуировка образцовых и технических термоэлектрических термометров. Он заключается в непосредственном измерении термоЭДС градуируемого термоэлектрического термометра при постоянной температуре свободных концов $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и различных температурах t_2 рабочего спая, причем последняя определяется с помощью образцового термометра.

Порядок выполнения работы

1 Собрать термоэлектрическую цепь «хромель-алюмелевая термопара» из двух электродов – экранированный регистратор ЖМО.

2 Закипятить воду в стакане из термостойкого стекла.

3 Произвести измерение температуры кипящей воды с помощью собранных схем и с использованием эталонного термометра.

4 Сравнить полученные данные, определить относительную погрешность каждого измерения. Полученные результаты занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Значения температуры при охлаждении воды

Номер	Значение температуры T , $^{\circ}\text{C}$		Δ , %
	по термометру	по термопаре	

5 Включить лабораторную печь, в которую помещены две термопары, градуировочная характеристика одной из которых известна (эталонная термопара), а градуировочную характеристику другой необходимо построить (исследуемая термопара).

6 В процессе разогрева печи снимать показания температуры эталонной термопары и величину термоЭДС исследуемой термопары каждые 2 мин. Показания занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Показания приборов при разогреве печи

τ , мин	$E_{\text{эталон}}$, мВ	$E_{\text{исслед}}$, мВ	$T_{\text{эталон}}$, °C	$T_{\text{исслед}}$, °C

7 По данным таблицы построить градуировочную характеристику в координатах « E , мВ – T , °C».

Содержание отчета

Общие сведения о принципе работы термометрического термометра, типах и методах градуировки термопар. Описание методики проведения эксперимента. Результаты опытов в виде таблиц, расчетов, графиков. Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Объясните эффект Зеебека.
- 2 Какие бывают стандартные термоэлектрические термометры?
- 3 В каком интервале температур работают термоэлектрические термометры?
- 4 Из каких материалов изготавливают хромель-алюмелевые термоэлектрические термометры?
- 5 Какой термоэлектрический термометр обеспечивает максимальную температуру кратковременного режима работы?
- 6 Как проводится градуировка термопары?

3 Лабораторная работа № 3. Построение температурного поля и определение температурного градиента

Цель работы: построить температурное поле отливки (слитка); определить температурный градиент по сечению отливки (слитка).

Оборудование: печь SNOL, термопары ХА, экранный многоканальный регистратор JUMO, пирометр «Кельвин».

Теоретическая часть

Согласно второму закону термодинамики самопроизвольный процесс переноса теплоты в пространстве возникает под действием разности температур и направлен в сторону уменьшения температуры. Таким образом, процесс распространения теплоты в твердом теле всегда связан с распределением температур, которые могут изменяться как по сечению тела, так и во времени. Поэтому основной задачей теории теплопроводности является определение пространственного изменения температуры в отдельных точках тела, т. е. нахождение зависимостей вида $t = f(x, y, z, \tau)$, где x, y, z – координаты точек тела; τ – время.

Температурным полем называется совокупность мгновенных значений температуры во всех точках тела.

Так как температура – скалярная величина, то и температурное поле является скалярным. Оно может быть как стационарным, так и нестационарным.

Если *температурное поле стационарное*, то температуры по сечению тела могут различаться, но не изменяться во времени. Уравнение стационарного температурного поля $t = f(x, y, z)$.

Нестационарное температурное поле отвечает неустановившемуся тепловому режиму, в данном случае с течением времени температура изменяется от одной точки тела к другой, т. е. $t = f(x, y, z, \tau)$.

Температурное поле в зависимости от числа координат может быть одно-, дву- и трехмерным. Уравнение двумерного поля $t = f(x, y, \tau)$, одномерного $t = f(x, \tau)$.

Одномерным полем обладает плоская стенка, у которой длина и ширина считаются бесконечно большими по сравнению с толщиной. Поле будет нестационарным, если стенку с одной стороны нагревать (охлаждать). По истечении длительного времени, когда стенка прогреется, поле превратится в стационарное, т. к. температура по толщине стенки не будет изменяться со временем.

При любом температурном поле в теле всегда имеются точки с одинаковой температурой. Если их мысленно соединить, то получится поверхность, называемая изотермической.

Так как одна и та же точка не может одновременно иметь различные температуры, то изотермические поверхности не пересекаются. Они либо

оканчиваются на поверхности тела, либо целиком располагаются внутри его. Пересечение изотермических поверхностей плоскостью дает на этой плоскости семейство изотерм (рисунок 3.1, а).

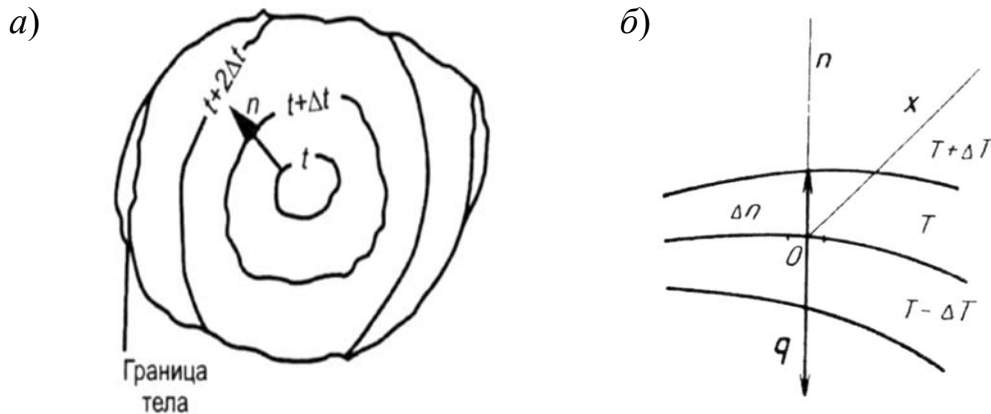


Рисунок 3.1 – Пример температурного поля в сечении тела произвольной формы (а) и температурного градиента (б)

Температурный перепад характеризуется градиентом температуры – векторной величиной, направленной в сторону повышения температуры и численно равной производной от температуры по этому направлению, т. е.

$$\text{grad } t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} (\Delta T / \Delta n), \quad (3.1)$$

где ΔT – изменение температуры, $\Delta T = T_2 - T_1$;

Δn – расстояние по нормали между соседними изотермами.

Из рассмотрения двух изотерм с температурами t и $(t + \Delta t)$ можно сделать вывод, что в конкретной точке наиболее резкое изменение температуры происходит в направлении нормали к изотермической поверхности.

Количественной характеристикой того, насколько резко изменяется температура на бесконечно малом участке тела (практически в точке), служит температурный градиент, К/м.

Температурный градиент – вектор, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры. В случае одномерного температурного поля $\text{grad } t = \partial t / \partial x$, в случае двумерного $\text{grad } t = (\partial t / \partial x) + (\partial t / \partial y)$.

Положительным направлением температурного градиента считается направление в сторону возрастания температуры.

Таким образом, величина температурного градиента служит критерием неоднородности температурного поля. Чем больше температурный градиент, тем интенсивнее процесс теплообмена в теле или среде, тем выше неоднородность температурного поля.

Порядок выполнения работы

1 Приготовить сплав заданного состава, перегреть его в лабораторной печи на 100 °С...150 °С выше температуры ликвидуса и залить в форму, в которой предварительно установить три термопары (подключенные к экранному многоканальному регистратору JUMO): первую – в центре формы, вторую – на расстоянии половины радиуса, третью – у поверхности.

2 В процессе охлаждения расплава через каждые 30 с производить измерения температуры в каждой точке.

3 Для каждой термопары построить кривые охлаждения отливки $t_i = f(\tau)$.

4 Построить температурное поле (распределение температур по сечению) отливки $t = f(x)$ с интервалом 2 мин.

Данные занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Показания термопар

$\tau, \text{с}$	$T, ^\circ\text{C}$		
	Первая термопара	Вторая термопара	Третья термопара
0			
30			
60			

5 Определить температуры ликвидуса и солидуса сплава.

6 Определить скорость охлаждения расплава в жидком и твердом состоянии (в каждой точке).

7 Определить величины температурных градиентов в различные моменты времени.

8 Построить график изменения температурного градиента от времени $\text{grad } t = f(\tau)$.

Содержание отчета

Общие сведения о понятии температуры, температурного поля, температурного градиента. Описание методики проведения эксперимента. Эскиз формы с расположенными термопарами. Результаты опытов в виде таблиц, расчетов, графиков. Выводы.

Контрольные вопросы

1 Что называется температурным полем?

2 Что такое температурный градиент?

3 Объясните порядок построения температурного поля.

4 Чем характеризуется температурный перепад?

5 Почему при проведении экспериментальной части работы применялись несколько термопар, а не одна?

4 Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента теплопроводности твердого тела

Цель работы: изучить процесс теплопроводности; построить температурное поле плоской стенки.

Оборудование: печь SNOL, термопары ХА, экранный многоканальный регистратор JUMO, пирометр «Кельвин».

Теоретическая часть

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

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

$$Q^* = -\lambda F \tau grad\ t. \quad (4.1)$$

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

$$\begin{aligned} Q &= \frac{Q^*}{\tau} = -\lambda F grad\ t; \\ q &= \frac{Q^*}{F \tau} = -\lambda grad\ t. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Величины Q и q называются соответственно *тепловым потоком*, Вт, и *удельным тепловым потоком*, Вт/м²; величина λ – *коэффициентом теплопроводности*, Вт/(м·К).

Таким образом, *коэффициент теплопроводности* – это мощность, проходящая через площадку в 1 м² при градиенте температуры 1 К/м. Он является физическим параметром вещества, характеризует его способность проводить теплоту и зависит от температуры, а для газов – также и от давления. Значения коэффициентов теплопроводности для различных веществ приведены в справочниках.

Коэффициент теплопроводности металлов достаточно высок (5...385 Вт/(м·К)). С увеличением температуры коэффициент теплопроводности

большинства металлов уменьшается. Коэффициент теплопроводности сплавов меньше коэффициента теплопроводности чистых металлов.

Коэффициенты теплопроводности неметаллических твердых материалов ниже, чем металлов (0,15...19 Вт/(м·К)). С увеличением температуры коэффициент теплопроводности неметаллических материалов, как правило, возрастает.

Коэффициенты теплопроводности газов и жидкостей при нормальных условиях ниже твердых материалов.

Процессы переноса теплоты в твердом теле могут протекать таким образом, что температура в каждой точке тела, следовательно, и тепловой поток, однозначно связанный с градиентом температуры, остаются постоянными во времени, т. е. в этом случае температура является функцией лишь пространственных координат: $T = T(x, y, z)$. Такое температурное поле называется *стационарным*.

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

Как отмечено ранее, коэффициент теплопроводности зависит от температуры. Поэтому на практике в каждом конкретном случае используют среднее для данного температурного интервала значение коэффициента теплопроводности.

Рассмотрим стенку, размеры которой значительно превышают толщину s (рисунок 4.1). Площадь, через которую проходит тепловой поток, постоянна; коэффициент теплопроводности также постоянен. Температуры t_1 и t_2 на наружных поверхностях стенки известны и постоянны. Так как разность температур наблюдается только в направлении оси x , тепловой поток направлен также вдоль оси x . Возьмем произвольное сечение a , параллельное наружным поверхностям стенки.

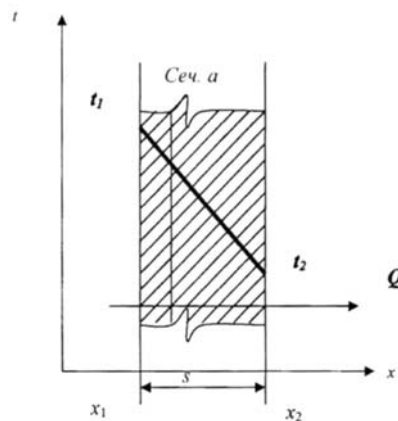


Рисунок 4.1 – Распределение температур в однослойной плоской стенке

Тепловые потоки, проходящие через левую поверхность и сечения a , должны быть одинаковыми, иначе количество теплоты между этими поверхностями изменится, что приведет к изменению температуры и нарушению стационарности. Так как координата a произвольная, тепловой поток вдоль оси x постоянен. Применяя закон Фурье

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

после преобразования получим

$$Q = \frac{\lambda F}{s} (t_1 - t_2). \quad (4.3)$$

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

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{R}. \quad (4.4)$$

Величина удельного теплового потока через плоскую стенку определяется по формуле

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{\lambda}{s} (t_1 - t_2). \quad (4.5)$$

Порядок выполнения работы

1 Включить лабораторную печь SNOL, рабочее пространство которой закрыто пробкой из ультраалегковесного шамота. Измерительная схема состоит из термопар и экранного регистратора JUMO. На внешней и внутренней поверхностях пробки установлено по термопаре.

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

3 Произвести замеры температур.

4 Рассчитать среднее значение коэффициента теплопроводности.

5 Показания занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений

Номер	Номер термопары	$t_1, ^\circ\text{C}$	$\delta_1, \text{м}$	$\lambda_1, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$	$q_1, \text{Вт}/\text{м}^2$	$q_\Sigma, \text{Вт}/\text{м}^2$

- 6 Рассчитать величину удельного теплового потока.
- 7 Построить температурное поле.
- 8 Определить температурный градиент.

Содержание отчета

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

Контрольные вопросы

- 1 Что такое теплопроводность?
- 2 Что такое коэффициент теплопроводности?
- 3 Как меняется коэффициент теплопроводности большинства металлов и неметаллических материалов с увеличением температуры?
- 4 Что такое стационарное температурное поле?
- 5 Как определяется среднее значение температуры?

5 Лабораторная работа № 5. Теплопроводность многослойной плоской стенки при стационарном режиме

Цель работы: изучить процесс теплопроводности при стационарном режиме; построить температурное поле многослойной стенки.

Оборудование: печь SNOL, термопары ХА, экранный многоканальный регистратор JUMO, пирометр «Кельвин».

Все случаи распространения тепла теплопроводностью описывает общее дифференциальное уравнение теплопроводности – уравнение Фурье, связывающее температуру любой точки твердого тела со временем и пространственным положением данной точки:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (5.1)$$

где t – температура точки твердого тела;

τ – время;

α – коэффициент температуропроводности;

x, y, z – координаты точки.

Из общего уравнения можно выделить частные случаи. Одним из таких частных случаев является независимость температуры от времени: $dt/d\tau = 0$.

Такое температурное поле называется стационарным. Величина же теплового потока для плоской однородной стенки и стационарного температурного поля (рисунок 5.1, а) будет

$$q_{\lambda 1} = \lambda \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{S}, \quad (5.2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности стенки печи;

$t_{\text{вн}}$ – температура внутренней поверхности стенки печи;

$t_{\text{нар}}$ – температура наружной поверхности стенки печи;

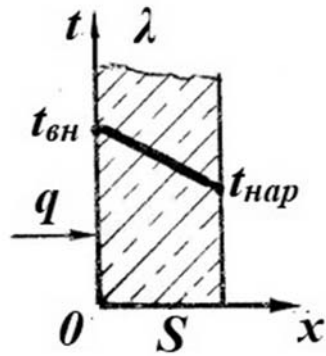
S – толщина стенки.

Для уменьшения тепловых потерь и более рационального использования огнеупорных и теплоизоляционных материалов стенки обычно делают многослойными (рисунок 5.1, б).

Величина теплового потока для многослойной стенки определяется по формуле

$$q_{\lambda 2} = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n}}. \quad (5.3)$$

а)



б)

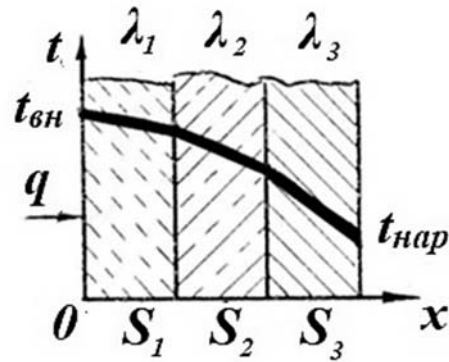


Рисунок 5.1 – Схема распределения температур при теплопередаче теплопроводностью через плоскую однородную (а) и многослойную (б) стенки

Итак, используя эти уравнения, можно решать следующие практические задачи:

- а) зная температуры и характеристики огнеупорных и теплоизоляционных материалов стенки, можно определить потери тепла;
- б) зная температуры и потери тепла, можно подобрать оптимальные размеры многослойной стенки;
- в) зная тепловой поток, характеристики стенок печи и температуру печного пространства, можно вычислить температуру наружной стенки печи.

Тепловой поток, прошедший через стенку печи, уносится окружающей средой с помощью конвективного теплообмена. Если известны температура стенки и температура среды, то тепловой поток можно определить по уравнению Ньютона. Например, для наружной стенки.

Порядок выполнения работы

- 1 Включить печь и выйти на стационарный температурный режим.
- 2 Через каждые 15...20 мин записать показания всех термомпар.
- 3 Построить графики распределения температур по толщине для однослойной и двухслойной стенок печи.
- 4 Найти температуры на внутренней $t_{вн}$ и наружной $t_{нар}$ поверхностях стенок.
- 5 Определить тепловой поток для однослойной стенки печи, используя уравнение (5.1).
- 6 Определить тепловой поток для двухслойной стенки печи сначала по уравнению (5.2), а затем – по уравнению (5.3).

Коэффициенты теплопроводности λ определяются в зависимости от средней температуры слоя (таблица 5.1).

При двухслойной кладке средняя температура внутреннего слоя

$$t_{ср1} = \frac{t_{вн} + t_0}{2}, \quad (5.4)$$

где $t_{вн}$ – температура внутренней поверхности стенки печи;
 t_0 – температура воздуха.

Таблица 5.1 – Коэффициенты теплопроводности

Наименование огнеупоров	Температурный коэффициент теплопроводности λ_1 , Вт/(м·К)	Коэффициент λ_1 , Вт/(м·К), при рабочей температуре	Рабочая темпера- тура, К
<i>Кирпич</i>			
Шамотный	$(0,72 + 0,0005t)$ 1,16	1,65	1620...1720
Пеношамотный	$(0,24 + 0,0002t)$ 1,16	0,59	1620
Легковесный шамот	$(0,09 + 0,000125t)$ 1,16	0,29	1570
Динасовый	$(0,8 + 0,0006t)$ 1,16	2,11	1970
Магнезитовый	$(4,0 + 0,0015t)$ 1,16	0,75	1920...1970
Хромомагнезитовый	$1,6 - 1,7(0 - 600\text{ }^{\circ}\text{C})$ 1,16		1970
Хромитовый	$(1,1 + 0,00035t)$ 1,16	1,966	1920...1970
Диатомитовый	$(0,097 + 0,0002t)$ 1,16	0,309	1120
<i>Изделия</i>			
Силлиманитовые (муллитовые)	$(1,45 - 0,0002t)$ 1,16	1,299	1920
Корундовые	$(1,8 - 0,0016t)$ 1,16	5,24	1920...1970
Циркониевые	$(1,12 - 0,00055t)$ 1,16	2,447	2020...2070
Карбофракс	$(18 - 0,009t)$ 1,16	15,66	1670...1770
Угольные	$(20 - 0,030t)$ 1,16	16,24	2270
Графитовые	$(140 - 0,035t)$ 1,16	81,20	2270
<i>Изоляционные материалы</i>			
Асбест распушенный	$(1,112 - 0,00016t)$ 1,16	0,2598	700
Диатомит(вермикулит)	$(0,062 - 0,000225t)$ 1,16	0,280	900...1100
Шлаковая вата	$(0,05 - 0,000125t)$ 1,16	0,167	750

Средняя температура наружного слоя

$$t_{cp2} = \frac{t_{cp1} + t_0}{2}. \quad (5.5)$$

Коэффициент теплоотдачи α складывается из коэффициентов теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией:

$$\alpha = \alpha_l + \alpha_k, \quad (5.6)$$

подсчитывается по упрощенной формуле

$$\alpha = 8 + 0,05t_{нар}. \quad (5.7)$$

Результаты опытов и вычислений поместить в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты измерений

Двухслойная стенка											
t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	$t_{вн}$	$t_{нар}$	λ_1	λ_2	$q_{\lambda 2}$, Вт/м ²	α , Вт/(м ² · °C ⁴)	$q\alpha$, Вт/м ²
°C							Вт/(м · °C)				

Содержание отчета

- 1 Краткое содержание работы.
- 2 Схема опытной установки.
- 3 Таблицы опытных данных.
- 4 Графики распределения температур, построенные по экспериментальным данным.

Контрольные вопросы

- 1 Для чего делают многослойными стенки огнеупорных и теплоизоляционных материалов?
- 2 Какие практические задачи решаются при определении величины теплового потока для плоской однородной стенки и многослойной стенки?
- 3 Что описывает уравнение Фурье?
- 4 Как строится график распределения температуры?
- 5 Какие Вы знаете изоляционные материалы?
- 6 Из чего складывается коэффициент теплоотдачи?
- 7 Назовите максимальные значения температурного коэффициента теплопроводности известных Вам материалов.

6 Лабораторная работа № 6. Исследование теплоотдачи при свободном движении воздуха

Цель работы: определить значение коэффициента теплоотдачи и зависимость коэффициента теплоотдачи при охлаждении металлической заготовки от температуры $a = f(t)$, а также сравнить значение теплоотдачи конвекцией и излучением.

Оборудование: печь SNOL, термопары ХА, экранный многоканальный регистратор JUMO, пирометр «Кельвин».

Теоретическая часть

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

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

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

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

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

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

Свободная конвекция обусловлена самим процессом тепло- или массообмена, а именно за счет неоднородности в нем массовых сил. Если в жидкости имеется неоднородное распределение температур, следовательно, имеет место неоднородность поля плотности, то возникает свободное

гравитационное движение. Вынужденное движение в общем случае может сопровождаться свободным. Относительное влияние последнего тем больше, чем больше разность температур отдельных частиц среды и чем меньше скорость вынужденного движения.

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

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

$$q = \alpha(t_{cp} - t_{нов}) , \quad (6.1)$$

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

Коэффициент теплоотдачи есть плотность теплового потока на границе жидкости (газа) и соприкасающегося тела, отнесенная к разности температур поверхности и окружающей среды. Численное его значение равно тепловому потоку, Вт, от единичной поверхности теплообмена, м², при разности температур поверхности и жидкости в 1 К в единицу времени, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплоотдачи зависит от большого количества факторов. В общем случае α является функцией формы и размеров тела, режима движения и скорости жидкости, температуры жидкости и тела, физических параметров жидкости и др. Так как сложный процесс конвективного теплообмена описывается простым уравнением (6.1), то основной задачей является определение коэффициента теплоотдачи α . Как правило, коэффициент теплоотдачи определяется из критериальных уравнений, полученных в результате анализа и обработки большого числа экспериментальных данных.

Для определения коэффициента теплоотдачи используют *критерий Нуссельта*

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} = \frac{\alpha}{\lambda / l} , \quad (6.2)$$

где l – характерный размер тела, омываемого конвективным потоком.

Критерий Нуссельта представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи и характеризует связь между интенсивностью теплоотдачи и

температурным полем вблизи нагреваемой (охлаждаемой) поверхности, т. е. характеризует передачу теплоты от окружающей среды к поверхности тел.

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

$$Gr = \beta \frac{g l^3}{\nu^2} \Delta t, \quad (6.3)$$

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

g – ускорение силы тяжести;

Δt – температурный напор,

$$\Delta t = t_n - t_c; \quad (6.4)$$

ν – коэффициент кинематической вязкости;

l – линейный масштаб.

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

В математическом описании процесса свободной конвекции должны учитываться следующие факторы.

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

2 Плотность является функцией температуры и определяется как

$$\rho = \frac{\rho_{\pi}}{1 + \beta(t - t_{\pi})}, \quad (6.5)$$

где β – коэффициент линейного расширения;

t_{π} – параметрическое значение температуры, т. е. на значительном удалении от стенки;

ρ_{π} – плотность при параметрической температуре.

3 При свободной конвекции границей системы считают поверхность теплообмена и неподвижную жидкость на таком удалении от этой поверхности, где ее действие не сказывается (т. е. теоретически на бесконечном удалении). В этом случае скорость жидкости на границе равна нулю.

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

$$Nu_m = C(Gr \cdot Pr)^{nm}, \quad (6.6)$$

где Gr – критерий Грасгофа;
 Pr – критерий Прандтля.

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (6.7)$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости;
 a – коэффициент температуропроводности.

Сип-постоянные связаны с величиной произведения $(Gr \cdot Pr)$ и формой поверхности.

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

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

Средняя плотность теплового потока

$$q = \frac{\Delta \lambda_{\text{экв}}}{\delta} \Delta T. \quad (6.8)$$

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

$$\varepsilon_k = \frac{\lambda_{\text{экв}}}{\lambda}. \quad (6.9)$$

Коэффициент ε_k является функцией произведения $(Gr \cdot Pr)$, т. е. $\varepsilon_k = f(Gr \cdot Pr)$.

При значениях произведения $Gr \cdot Pr < 1000$ величина $\varepsilon_k = 1$.

При значениях $Gr \cdot Pr > 1000$ величина $\varepsilon_k = 0,18 (Gr \cdot Pr)^{0,25}$.

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

$$dQ = C_{np} \left[\left(\frac{T_{II}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_C}{100} \right)^4 \right] F d\tau + \alpha_k (t_{II} - t_C) F d\tau, \quad (6.10)$$

где F – поверхность тела;

$d\tau$ – продолжительность теплоотдачи;

C_{np} – приведенный коэффициент излучения.

$$C_{np} = \varepsilon C_0, \quad (6.11)$$

где ε – степень черноты тела;

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

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

Введя обозначение

$$\alpha_{л+к} = \frac{C_{np} \left[\left(\frac{T_{\Pi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]}{(t_{\Pi} - t_c)} + \alpha_k,$$

получим

$$dQ = \alpha_{л+к} (t_{\Pi} - t_c) F d\tau. \quad (6.12)$$

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

$$dQ = cG di, \quad (6.13)$$

где c – удельная теплоемкость при данной температуре;

G – масса образца;

di – изменение средней по массе температуры образца.

Если нагреваемое тело имеет высокий коэффициент теплопроводности и небольшую толщину, т. е. является термически тонким, приравняв уравнения (6.12) и (6.13), получим

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\alpha_{л+к} (t_{\Pi} - t_c)}{cG}. \quad (6.14)$$

Из выражения (6.14), зная скорость охлаждения и температуры тела и среды, можно определить величину суммарного коэффициента $\alpha_{л+к}$.

Порядок выполнения работы

1 Поместить образец в заранее разогретую печь до $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$.

2 Нагреть образец до $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ и извлечь из печи.

3 С использованием пирометра «Кельвин» произвести замер температуры поверхности образца каждые 30 с. Измеренные значения занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты измерений

Номер	τ , с	t_c , °C	t_n , °C	$dt/d\tau$, °C/с	$\alpha_{\kappa+l}$, Вт/(м ² · К)	α_{κ} , Вт/(м ² · К)	α_l , Вт/(м ² · К)	C_{np} , Вт/(м ² · К ⁴)

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

5 Вычислить для пяти значений температур величину скорости охлаждения $dt/d\tau$.

6 Определить суммарный коэффициент теплоотдачи с помощью формулы (6.14) для заданных значений температуры.

7 Определить коэффициент теплоотдачи конвекцией по уравнению (6.6).

8 Определить коэффициент теплоотдачи излучением.

9 Определить приведенный коэффициент излучения данного образца.

10 Результаты опытов и вычислений записать в таблицу 6.1.

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

Содержание отчета

Общие сведения о конвективном теплообмене. Описание методики проведения эксперимента. Результаты опытов в виде таблиц, расчетов, графиков. Выводы.

Контрольные вопросы

1 Какой процесс называется конвективным переносом?

2 Чем обусловлена свободная конвекция?

3 Как определяется коэффициент теплоотдачи?

4 Объясните изменение коэффициента теплоотдачи при охлаждении металлических изделий от температуры.

5 Объясните, почему отличаются значения теплоотдачи конвекцией и излучением.

7 Лабораторная работа № 7. Исследование теплового излучения твердого тела

Цель работы: изучить явление переноса теплоты излучением; определить приведенный коэффициент излучения и степень черноты образца; построить график зависимости $\varepsilon = f(t)$.

Оборудование: печь SNOOL, термопары ХА, экранный многоканальный регистратор JUMO, пирометр «Кельвин».

Теоретическая часть

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

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

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

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

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

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

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

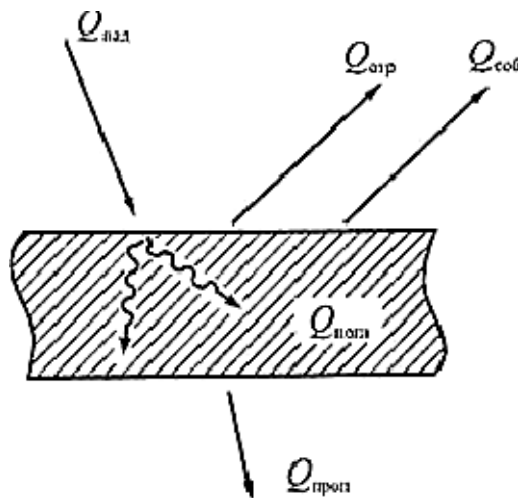
Потоком энергии излучения Q называется количество теплоты, переносимое через некоторую поверхность F , m^2 , за единицу времени по всем направлениям полусферы, Вт.

Плотностью потока энергии излучения q называется количество теплоты, которое переносится через единицу поверхности F , м^2 , в единицу времени по всем направлениям полусферы, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

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

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

Часть падающей энергии излучения, поглощенной данным телом, называется *потоксом поглощенного излучения* $Q_{\text{погл}}$. При поглощении лучистая энергия вновь превращается во внутреннюю энергию тела (рисунок 7.1).



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

Рисунок 7.1 – Потоксы энергии излучения

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

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

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

$$Q_{\text{пад}} = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{проп}} + Q_{\text{отр}} . \quad (7.1)$$

Тело, поглощающее все падающее на него излучение, называется *абсолютно черным телом*. Тело, которое отражает все падающее на него излучение, – *абсолютно белым*. Абсолютно черных и белых тел в природе не существует, однако эти понятия играют чрезвычайно важную роль в теории теплового излучения. Наиболее близки к абсолютно черному телу сажа, бархат ($A = 0,97...0,98$); к абсолютно белому телу – полированные металлы ($R = 0,97$).

Тела, которые пропускают всю падающую на них энергию, ничего не отражая и не поглощая, называются *прозрачными*.

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

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

Порядок выполнения работы

- 1 Включить лабораторную печь и загрузить в печь образец.
- 2 Измерить температуру в пространстве печи.
- 3 После стабилизации температуры печи произвести измерение температуры поверхности образца с использованием пирометра «Кельвин» каждую минуту. Занести результаты измерений в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Результаты измерений

$t, \text{с}$									
$T_{\text{нов}}, \text{С}$									

- 4 Построить график зависимости $T = f(\tau)$.
- 5 Определить приведенный коэффициент излучения образца.
- 6 Определить степень черноты образца.
- 7 Построить график зависимости $\varepsilon = f(T_{\text{нов}})$.

Содержание отчета

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

Контрольные вопросы

- 1 Что такое тепловое излучение?
- 2 Что такое абсолютно белое и черное тело?
- 3 Как классифицируют излучение в зависимости от направления?
- 4 Что такое поток энергии излучения?

8 Лабораторная работа № 8. Изучение процесса нестационарной теплопроводности различных материалов

Цель работы: изучить явление нестационарной теплопроводности; по опытным данным построить кривые зависимости температуры от времени $t = f(\tau)$ для поверхности и центра образцов.

Оборудование: печь SNOL, термопары ХА, экранный многоканальный регистратор JUMO, пирометр «Кельвин».

Теоретическая часть

Процессы переноса теплоты в твердом теле могут протекать таким образом, что температура в каждой точке тела, следовательно, и тепловой поток, однозначно связанный с градиентом температуры, изменяются во времени. Такое температурное поле называется нестационарным. Оно является не только функцией координат, но и времени, т. е. $T = T(x, y, z, \tau)$.

Нестационарная теплопроводность описывается дифференциальным уравнением теплопроводности

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = \rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad \text{или} \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (8.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·град);

ρ – плотность вещества, кг/м³;

c_p – изобарная теплоемкость единицы массы вещества, Дж/(кг·К);

α – коэффициент температуропроводности, м²/с;

τ – время, с;

t – температура, град;

x, y, z – координаты точек тела.

Дифференциальное уравнение теплопроводности устанавливает связь между временным и пространственным изменением температуры в любой точке тела, в которой происходит процесс теплопроводности.

Запишем частные случаи дифференциального уравнения. Одномерное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right). \quad (8.2)$$

Двумерное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right). \quad (8.3)$$

Для того чтобы решить основную задачу теории теплопроводности, т. е. найти распределение температур в пространстве и во времени $t = f(x, y, z, \tau)$, необходимо решить дифференциальное уравнение (8.1).

Однако это уравнение имеет бесчисленное множество решений. Чтобы из этого множества выделить одно, необходимо задать условия однозначности.

В условия однозначности входят:

- геометрические параметры, т. е. форма и размеры тела;
- теплофизические параметры материала, т. е. коэффициент теплопроводности λ , плотность ρ , удельная теплоемкость тела c ;
- начальные условия, т. е. распределение температуры в объеме тела в некоторый момент времени, принимаемый за начало отсчета: $\tau = 0$;
- граничные условия, характеризующие тепловое взаимодействие окружающей среды с поверхностью тела.

Наиболее простые и часто встречающиеся на практике начальные условия показывают, что температура во всех точках тела в начальный момент времени одинакова.

Граничные условия могут быть заданы тремя различными способами.

1 Граничные условия I рода. В этом случае задается распределение температуры по всей поверхности тела и изменение этого распределения во времени.

2 Граничные условия II рода. В этом случае задается распределение плотности теплового потока по всей поверхности тела и изменение этого распределения во времени.

3 Граничные условия III рода. В этом случае задаются температура окружающей среды или внешнего источника теплоты t_{cp} и закон теплообмена между средой и поверхностью тела. Граничные условия III рода являются наиболее общими и часто встречаются на практике.

В зависимости от поведения тел при нагреве и охлаждении их разделяют на две категории: термически тонкие и термически массивные тела.

Термически тонкими телами называют такие, при нагреве которых температуру в различных точках по сечению можно принимать одинаковой, т. е. считать, что температура таких тел изменяется только во времени.

Термически массивными считаются такие тела, при нагреве которых температура изменяется как по сечению тела, так и во времени. В отличие от тонких тел, при нагреве массивных необходимо учитывать неравномерность температурного поля по сечению.

Мерой массивности тела, позволяющей отнести его к одной из указанных категорий, является *критерий или число Био*

$$Bi = \frac{\alpha S}{\lambda}, \quad (8.4)$$

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

S – характерный размер тела (для пластины – половина ее толщины при симметричном нагреве, при несимметричном нагреве – толщина; для цилиндра и шара – радиус), м.

Если $Bi \leq 0,25$ – тело считается термически тонким, если $Bi > 0,5$ – термически массивным, интервал от 0,25 до 0,5 – переходная область.

Порядок выполнения работы

1 Поместить в лабораторную печь опытные цилиндрические образцы и в заранее просверленные отверстия зачеканить термопары.

2 Включить лабораторную печь.

3 Нагревать заготовки в течение 30 мин. Снимать показания каждую минуту и заносить их в таблицу.

4 Построить кривые нагрева образцов $t_{нов} = f(\tau)$ и $t_{ц} = f(\tau)$.

5 Вычислить критерий Био для образцов:

$$Bi = \frac{\alpha_{л+к} R}{\lambda}. \quad (8.5)$$

Так как в электрических печах почти вся тепловая энергия передается лучеиспусканием, то коэффициент теплоотдачи определяется по формуле

$$\alpha_{л+к} = \frac{C_{ПП} \left[\left(\frac{T_{печи}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{П}}{100} \right)^4 \right]}{t_{печи} - t_{П}}, \quad (8.6)$$

где $C_{ПП}$ – приведенный коэффициент излучения.

$$C_{ПП} = C_0 \varepsilon,$$

где $C_0 = 5,67$ Вт/(м² · К⁴);

ε – степень черноты тела.

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)},$$

где F_1, F_2 – площади поверхностей образца и стен печи, м²;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степени черноты образца и стен печи соответственно.

Так как температура поверхности образца при его нагреве изменяется, то расчет следует вести по среднегеометрическому значению коэффициента теплоотдачи.

$$\alpha_{л+к} = \sqrt{\alpha_n + \alpha_k}, \quad (8.7)$$

где α_n, α_k – значения коэффициента теплоотдачи, подсчитанные по температуре поверхности образца в начале и в конце рассматриваемого промежутка времени.

Определить коэффициент теплопроводности λ в зависимости от средней по времени и массе температуры образца.

6 Определить критерий Фурье:

$$F_0 = \frac{\alpha \tau}{R^2}. \quad (8.8)$$

7 Используя номограммы Будрина, определить безразмерные температуры поверхности Θ_n и центра Θ_u образца.

8 По полученным значениям безразмерных температур определить температуры поверхности и центра образца и сравнить с измеренными значениями:

$$\Theta = \frac{t_{печи} - t}{t_{печи} - t_{нач}}. \quad (8.9)$$

Результаты занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Результаты измерений

Номер	Материал образца	τ , мин	$t_{нач}$, °C	$t_{нач}$, °C	t_n , °C	t_n , °C	Bi	F_0	Θ_n	Θ_u	$t_n^{теор}$, °C	$t_o^{теор}$, °C

Содержание отчета

Общие сведения о процессе нестационарной теплопроводности. Описание методики проведения эксперимента. Результаты опытов в виде таблиц, расчетов, графиков. Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что устанавливает дифференциальное уравнение теплопроводности?
- 2 Какие тела называются термически тонкими?
- 3 Какие тела называются термически массивными?

4 Зачем термопары зачеканиваются в предварительно просверленные отверстия в изделиях?

5 Как вычисляется критерий Био?

6 В чем суть нестационарной теплопроводности различных материалов?

Список литературы

1 **Семенов, Ю. П.** Теплотехника / Ю. П. Семенов, А. Б. Левин. – 2-е изд. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 234 с.

2 **Кудинов, В. А.** Теплотехника / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. – М.: КУРС; ИНФРА-М, 2019. – 268 с.

3 **Видин, Ю. В.** Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен / Ю. В. Видин, Р. В. Казаков, В. В. Колосов. – Красноярск: СФУ, 2015. – 215 с.

4 **Семенов, Ю. П.** Основы тепломассообмена / Ю. П. Семенов. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 321 с.

5 Техническая термодинамика и теплотехника / под ред. А. А. Захаровой. – 2-е изд., испр. – М.: Академия, 2008. – 460 с.

6 **Кудинов, В. А.** Техническая термодинамика / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2007. – 218 с.

7 **Кривандин, В. А.** Metallургическая теплотехника: учебник: в 2 т. / В. А. Кривандин. – М.: Metallургия, 1986. – 326 с.

8 **Шатров, М. Г.** Теплотехника / М. Г. Шатров, И. Е. Иванов, С. А. Пришвин; под ред. М. Г. Шатрова. – М.: Академия, 2011. – 288 с.

9 **Арутюнов, В. А.** Metallургическая теплотехника / В. А. Арутюнов, В. И. Миткалинный, С. Б. Старк. – М.: Metallургия, 1974. – 268 с.

10 Промышленные теплотехнологии: методики и инженерные расчеты оборудования высокотемпературных теплотехнологий машиностроительного и metallургического производства: учебник: в 5 т. / под общ. ред. В. И. Тимошпольского. – Мн.: Высш. шк., 1998. – Т. 3. – 302 с.

11 **Беленький, А. М.** Технологические измерения и контрольно-измерительные приборы / А. М. Беленький. – М.: Metallургия, 1981. – 298 с.

12 **Иванова, Г. М.** Теплотехнические измерения и приборы / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 345 с.

13 **Кишнев, В. В.** Технические средства автоматики / В. В. Кишнев. – М.: Metallургия, 1981. – 348 с.

14 **Прибытков, И. А.** Теоретические основы теплотехники / И. А. Прибытков, И. А. Левицкий. – М.: Академия, 2004. – 286 с.