

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ ТЕПЛОМАССОБМЕНА

2-е издание, переработанное и дополненное

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний*

САМАРА
Издательство СГАУ
2008

Рецензент В. Н. Матвеев

Составители: *В.Н. Белозерцев, В.В. Бирюк,
А.И. Довгялло, Н.А. Кудрявцева*

Лабораторный практикум по курсу тепломассообмена:
метод. указания / сост. *В.Н. Белозерцев, В.В. Бирюк, А.И. Довгялло,
Н.А. Кудрявцева*. – 2-е изд., перераб. и доп. – Самара: Изд-во Самар.
гос. аэрокосм. ун-та, 2008. – 54 с.

В предлагаемом цикле лабораторных работ описаны конструкции лабораторных установок, изложены методики проведения экспериментов и обработки их результатов по разделам: теплопроводность, конвективный теплообмен и тепловое излучение.

Предназначен для студентов, обучающихся по специальностям аэрокосмического профиля.

Содержание

Лабораторная работа №1. Определение теплопроводности металла	5
Лабораторная работа №2. Определение теплопроводности сыпучих материалов	11
Лабораторная работа №3. Определение термического сопротивления металлических стыков	16
Лабораторная работа №4. Теплоотдача цилиндра в условиях естественной конвекции	24
Лабораторная работа №5. Теплоотдача плоской пластины в условиях естественной конвекции	30
Лабораторная работа №6. Определение коэффициента теплоотдачи от шара к воздуху методом регулярного режима	37
Лабораторная работа №7. Тепловое излучение окисленной металлической поверхности	45

Общие сведения

Настоящие методические указания отражают развитие учебно-методического комплекса на кафедре теплотехники и тепловых двигателей с момента ее основания до наших дней.

Учебный лабораторный практикум был разработан основателями кафедры: профессорами В.П. Лукачевым, А.П. Меркуловым, В.И. Метениным; доцентами Н.Н. Огородниковым, Н.Д. Кольшевым.

В современном издании отражены изменения, связанные с модернизацией измерительной аппаратуры и с методологией обработки экспериментальных данных.

Лабораторная работа №1

Определение теплопроводности металла

Цель работы: изучение методики исследования; приобретение навыков экспериментального исследования частных задач теплопроводности; углубление знаний по вопросам теплопроводности.

Задание

1. Провести эксперимент и определить значение теплопроводности исследуемого металлического образца.
2. Составить отчет о выполненной работе.

Теоретические основы эксперимента

Теплопроводность представляет собой молекулярный перенос тепла в телах, обусловленный разностью температур в рассматриваемом пространстве.

Теплопроводность безоговорочно имеет место лишь в твердых телах. В основу аналитической теории теплопроводности положен феноменологический метод: теория теплопроводности игнорирует молекулярное строение вещества и рассматривает его как сплошную среду.

Необходимым условием образования теплового потока является неравномерность распределения температуры в рассматриваемой среде. Для передачи тепла теплопроводностью необходимо неравенство нулю температурного градиента в различных точках тела.

Согласно гипотезе Фурье количество тепла dQ , проходящее через элемент изотермической поверхности dF за промежуток времени $d\tau$, пропорционально температурному градиенту $\partial t / \partial n$:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial \tau}{\partial n} dF d\tau \quad (1)$$

где λ - теплопроводность вещества, Вт/(м·К).

Если количество переданного тепла отнести к единице площади изотермической поверхности в единицу времени, то зависимость (1) можно представить в виде

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = -\lambda \text{grad}t, \quad (2)$$

где \vec{q} - плотность теплового потока, Вт/м².

Теплопроводность λ при этом определяется из соотношения

$$\lambda = \frac{|\vec{q}|}{|\text{grad}t|}, \quad (3)$$

из которого следует, что теплопроводность численно равна количеству тепла, проходящего в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности при значении градиента температуры на ней, равного единице.

Теплопроводность - физическая характеристика вещества, определяющая его способность проводить тепло. Для различных веществ при прочих равных условиях количество проходящего тепла определяется только величиной λ .

Теплопроводность металлов в основном осуществляется за счет диффузии свободных электронов. Для большинства чистых металлов с повышением температуры теплопроводность убывает. Наличие разного рода примесей снижает λ . Для чистой меди $\lambda=396$ Вт/(м·К). Для меди со следами мышьяка $\lambda=142$ Вт/(м·К). Для железа с 0.1% углерода $\lambda=52$ Вт/(м·К), с 1% углерода $\lambda=40$ Вт/(м·К). Для закаленной углеродистой стали λ на 10..25% ниже, чем для мягкой. Установить какую-либо общую закономерность влияния примесей на величину λ пока невозможно. Поэтому для металлов и их сплавов только опыт является надежным способом определения теплопроводности.

В лабораторной установке используются образцы из бронзы и латуни. Зависимость их теплопроводности от температуры приведена в таблице, из которой видно, что при почти одинаковых исходных компонентах сплавов λ колеблется в широких пределах.

Теплопроводность сплавов, Вт/(м·К)

Сплав	Состав, %	$t, ^\circ\text{C}$			
		0	100	200	300
Бронза	85Cu; 6Sn; 6Zn; 3Pb	62	69	75	81
Латунь	96Cu; 4Zn	244	245	246	249
Латунь	68Cu; 32Zn	105	108	110	113
Латунь	62Cu; 38Zn	102	116	132	148
Латунь	59Cu; 40Zn; 3Al; 2Ni	81	93	106	119
Латунь	58Cu; 40Zn; 2Mn	67	78	88	97
Латунь	58Cu; 40,7Ni; 1,3Pb	122	122	123	124

Описание лабораторной установки

Существуют два основных метода экспериментального определения теплопроводности;

абсолютный, основанный на измерении q , $grad t$ и вычислении λ по формуле (3);

относительный, при котором тепловой поток, не измеряется, а теплопроводность вычисляется по измеренным температурным градиентам в исследуемом материале и в образце.

Общий вид экспериментальной установки для определения теплопроводности металла представлен на рисунке 1. Установка состоит из цилиндрического бронзового стержня 4 диаметром 30 мм, верхний конец которого снабжен электронагревателем 5. Нижний торец бронзового стержня спаян (для лучшего термического контакта) с верхним торцом испытуемого (латунного) стержня 2, диаметр которого равен также 30 мм. Свободный конец испытуемого стержня охлаждается проточной водой, протекающей через холодильник 1.

Электронагреватель 5 питается через автотрансформатор 3 стабилизированным напряжением.

Температура в концевых сечениях стержней измеряется с помощью хромель-копелевых (ХК) термопар ($t_1 \dots t_4$) и электронного измерителя температур «Овена» 8. Каждая термопара вставлена в сверление перпендикулярно оси образца на глубину 15 мм.

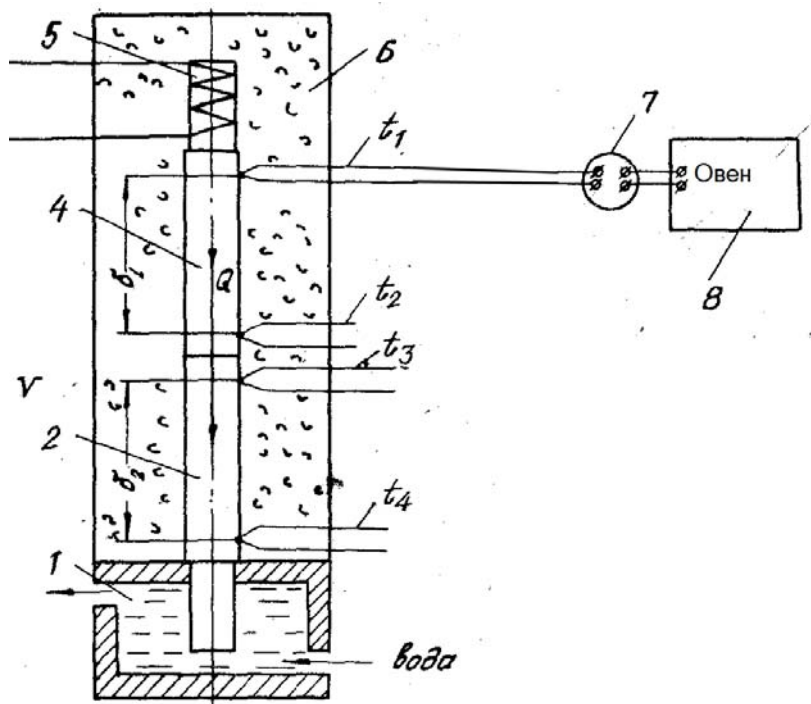


Рисунок 1. Экспериментальная установка для определения теплопроводности металла

Расстояние между термопарами в каждом образце одинаково - 35 мм. Нагреватель и образцы окружены кожухом 6 с тепловой изоляцией, что позволяет создать одномерный стационарный тепловой поток вдоль стержневой системы. Таким образом, поле температур в системе одномерно, а изотермические поверхности имеют форму поперечного сечения стержня и расположены параллельно его основанию; распределение температуры по длине стержня имеет линейный характер. Температурный режим установки стабилизируется примерно через 30 мин после ее включения. При этом с достаточной точностью можно считать, что через оба стержня проходит одинаковый тепловой поток.

Порядок выполнения работы.

Обработка результатов эксперимента

Включить подачу воды в холодильник 1 (см. рисунок), на нагреватель подать мощность (~200 Вт) с помощью автотрансформатора 3. После достижения стационарного распределения температуры в стержнях произвести измерение температур.

Обработка результатов опыта ведется в следующем порядке:

1. Расшифровываются показания термомпар (по градуировочным таблицам ЖК термомпар с учетом температуры холодных спаев).
2. Определяется теплопроводность бронзы ($\bar{\lambda}_{бр}$) при средней температуре верхнего стержня:

$$t_{бр} = \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

Определение $\bar{\lambda}_{бр}$ производится графическим интерполированием данных из табл. 1

3. Теплопроводность латунного (исследуемого) стержня рассчитывается следующим образом.

Если пренебречь потерями тепла в окружающую среду через тепловую изоляцию, то можно принять $q_{бр} = q_{лат}$, что на основании формулы (2) выражается следующим образом:

$$\bar{\lambda}_{бр} grad t_{бр} = \bar{\lambda}_{лат} grad t_{лат}, \quad (4)$$

где

$$grad t_{бр} = \frac{t_2 - t_1}{\delta_1}; \quad (5)$$

$$grad t_{лат} = \frac{t_4 - t_3}{\delta_2}; \quad (6)$$

$\delta_1 = \delta_2 = 0.335$ – расстояние между термопарами соответственно t_1 и t_2 , t_3 и t_4 .

Из формул (4), (5), (6) следует:

$$\bar{\lambda}_{лат} = \bar{\lambda}_{бр} \frac{\delta_2}{\delta_1} \frac{t_1 - t_2}{t_3 - t_4}. \quad (7)$$

По формуле (7) рассчитывается $\bar{\lambda}_{лат}$ теплопроводность латунного (исследуемого) стержня при его средней температуре

$$\bar{t}_{\text{лат}} = \frac{t_3 + t_4}{2}$$

4. По определённому значению $\bar{\lambda}_{\text{лат}}$ можно ориентировочно оценить химический состав исследуемого латунного стержня, пользуясь данными табл.

Содержание отчёта

1. Принципиальная схема установки.
2. Протокол записи измерений.
3. Обработанные результаты опыта.

Протокол записи измерений

Номер термопары	t _{стерж.} , °C	λ _{лат.} , Вт/(м·К)
1		
2		
3		
4		

Студент _____

Преподаватель _____

Контрольные вопросы к зачёту

1. Каково математическое выражение гипотезы Фурье?
2. Что выражает величина коэффициента теплопроводности?
3. Какова размерность теплопроводности?
4. Как влияют примеси на теплопроводность металлов?
5. Объясните порядок выполнения работы.
6. Объясните формулы, используемые для обработки результатов эксперимента.

Лабораторная работа №2

Определение теплопроводности сыпучих материалов

Цель работы: ознакомление с экспериментальными методами определения теплофизических характеристик материалов.

Задание: Определить на экспериментальной установке теплопроводность зернёного шамота.

Теоретические основы эксперимента

Накопление сведений о теплофизических характеристиках различных материалов является важной задачей, потому что на этой основе производится проектирование многочисленных промышленных объектов.

Лабораторные методы определения теплопроводности многочисленны. Конструктивное разнообразие установок зависит от характера материала и уровня температур, в пределах которых проводится исследование. Все известные методы принципиально делятся на два вида: стационарные и нестационарные.

В данной работе исследуется метод стационарного теплового потока. Все методы стационарного потока опираются на известные решения задач о тепловом потоке через плоскую, цилиндрическую или сферическую стенки.

В свою очередь методы делятся на абсолютные и относительные. В абсолютных методах на испытательной установке через испытуемый материал проходит весь тепловой поток. Тепло вводится с помощью электрических нагревателей и учитывается по электрическим приборам.

В относительных методах (метод плоского слоя) теплопроводность испытуемого материала определяется на основе закономерности распределения температурного поля, создаваемого в двухслойной стенке, где одна стенка - исследуемый материал, а другая стенка выполнена из эталонного материала с известной теплопроводностью. Абсолютные методы считаются более точными.

Описание лабораторной установки

Установка предназначена для определения теплопроводности сыпучих материалов с размерами зерна не более двух миллиметров.

Метод абсолютный. Центральная часть установки λ -калориметр 1 выполнена по схеме цилиндрического слоя. Калориметр собран из двух concentrically расположенных труб $d_1=42$ мм и $d_2=76$ мм (рисунок 1).

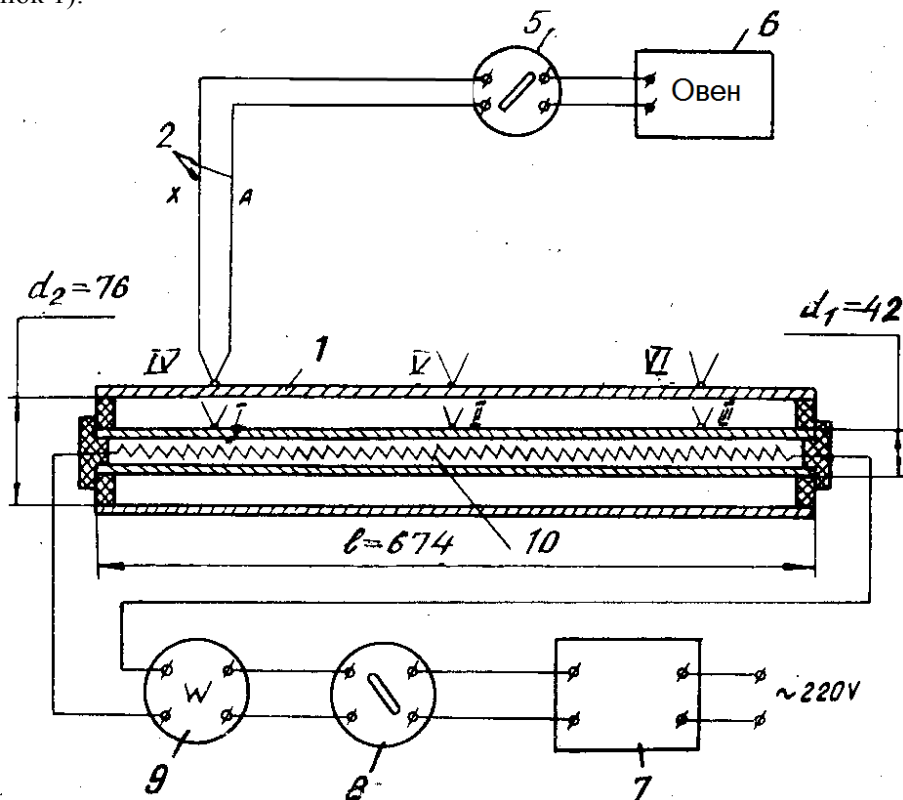


Рисунок 1. Схема установки для определения теплопроводности сыпучих материалов методом трубы

Кольцевой зазор (17 мм) между трубами заполняется с торца испытуемым материалом. Торцовые крышки и проставки для уменьшения конечных тепловых потерь выполнены из термостойкого пластика.

В центре внутренней трубы расположен электронагреватель 10 мощностью 200 Вт.

На поверхности каждой трубы размещены по три термопары (ХА) 2 (IV, V, VI - внешняя труба; I, II, III - внутренняя труба).

Потенциальные выводы присоединены к переключателю 5 который соединен с электронным измерителем температуры «Овен» 6. Электрическое питание нагревателя осуществляется через стабилизатор напряжения 7 от сети переменного тока 220 В.

Для регулирования мощности в цепь включен лабораторный автотрансформатор 8. Мощность W регистрируется ваттметром 9.

Проведение опыта

Установка подключается к электросети при положении "0" рукоятки трансформатора.

Затем изменением напряжения мощность нагревателя поднимается до 200 Вт. Происходит разогрев установки. В этом режиме она выдерживается, пока температура на поверхности внутренней трубы не достигнет 200...220°C (регистрируется по одной из термопар I-III).

Затем мощность несколько снижается таким образом, чтобы температура сохранялась приблизительно постоянной. В дальнейшем, чтобы добиться стационарного теплового потока, периодически производится измерение температуры внешней поверхности.

Признаком стационарности является постоянство температур обеих поверхностей. По достижении стационарности регистрируются показания:

t , электронного измерителя температур «Овена», °С;
 W , ваттметра, Вт.

Обработка результатов опыта

1. Записывается показания температур.
2. Определяются средние температуры поверхностей, °С:
внутренняя

$$t_{1cp} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3};$$

внешняя

$$t_{2cp} = \frac{t_4 + t_5 + t_6}{3}.$$

3. Рассчитывается значение теплопроводности λ .

В основу расчета принимается формула теплового потока для участка цилиндрической стенки

$$Q = 2\pi l \lambda \frac{t_{1cp} - t_{2cp}}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (1)$$

где $Q=W$ - количество тепла, проходящего через слой испытуемого материала, Вт;

$l=0.674$ - длина трубы, м;

t_{1cp} и t_{2cp} - средние температуры внутренней и внешней поверхности, °С;

d_1 и d_2 - диаметры цилиндрического слоя испытуемого материала (42 и 76 мм, см. рисунок);

λ - теплопроводность испытуемого материала, Вт/(м·К).

Решая уравнение (1) относительно λ , получаем

$$\lambda = \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l} \frac{W}{t_{1cp} - t_{2cp}}. \quad (2)$$

Первая дробь содержит постоянные величины и является константой установки, которую обозначим C , м⁻¹.

$$C = \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l} = 0.14 \quad (3)$$

С учетом сокращения (3) расчетная формула для определения λ приобретает вид

$$\lambda = 0.14 \frac{W}{t_{1cp} - t_{2cp}}. \quad (4)$$

Отчет о выполненной работе должен содержать принципиальную схему установки, протокол наблюдений и расчет всех параметров.

Протокол записи измерений

Дата испытания _____

Температуры поверхностей, °С									
t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	$t_{1\text{ ср}}$	$t_{2\text{ ср}}$	λ , Вт/(м·К)	

Студент _____

Преподаватель _____

Контрольные вопросы к зачёту

1. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности?
2. Каков закон распределения температуры по толщине испытуемого материала?
3. Что такое градиент температуры и какова его размерность?
4. На каком диаметре в установке больше градиент температуры в слое?
5. Каким образом передаётся тепло через прослойку сыпучего материала?
6. В чём условность теплопроводности для сыпучих материалов?
7. Можно ли назначить в установке толщину испытуемого слоя, соизмеримую с размерами нескольких зерен материала (3..5 шт.)?
8. Как будет изменяться величина λ с возрастанием средней температуры слоя?

Лабораторная работа №3

Определение термического сопротивления металлических стыков

Цель работы: углубление знаний по вопросам контактного теплообмена, ознакомление с методикой исследования и приобретение навыков проведения эксперимента (в результате работы должно быть усвоено понятие о термическом сопротивлении и физической природе этого явления).

Задание

1. Провести эксперимент и определить термическое сопротивление стыка двух металлических образцов.
2. Составить отчет о выполненной работе.

Теоретические основы эксперимента

Происхождение термина **термическое сопротивление** (R) связано со структурой формулы для определения теплового потока в процессах стационарной теплопроводности:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{R} \quad (1)$$

Выражение (1) является универсальной формой определения стационарного теплового потока, проходящего через единицу изотермической поверхности в единицу времени. Из данной формулы следует, что тепловой поток q всегда пропорционален разности температур и обратно пропорционален термическому (тепловому) сопротивлению R . Этот термин наиболее употребителен при рассмотрении одномерных задач стационарной теплопроводности. Структура величины R индивидуальна для каждого типа задач.

До недавнего времени в инженерной практике существовало мнение о том, что в стыке двух металлических деталей не может возникнуть какого-либо заметного сопротивления переходу тепла из одной детали в другую. В расчетах тепловых сопротивлений пакетов стыкованных деталей сопротивление самих стыков (фланцевые соединения по плоскости, соединения цилиндров на прессовой посадке и др.) не учитывалось. При создании устройств с большой тепловой напряжен-

ностью (ГТД, ЖРД и др.) пришлось обратить серьезное внимание на роль стыков в общем тепловом сопротивлении.

Подробные экспериментальные исследования в этом плане были проведены Академией наук Украинской ССР. Как показали результаты, металлические стыки даже при наличии высокой чистоты сопрягаемых поверхностей (высота неровностей от 2 до 20 мкм) и при значительных удельных давлениях (до 12 МПа) обладают заметным тепловым сопротивлением. Действие стыка в указанном смысле как бы эквивалентно дополнительному утолщению основной стенки. Абсолютная величина эквивалентного утолщения δ , зависит от класса чистоты сопрягаемых поверхностей, удельного давления и теплопроводности металла. Она может изменяться от долей миллиметров до нескольких десятков миллиметров.

В теплонеприжатых конструкциях через их стенки могут проходить очень большие тепловые потоки (до $2 \cdot 10^7$ Вт/м²). Температуры сред, контактирующих со стенкой, могут достигать 2300...3300 °С (например, в камере сгорания ЖРД). Чтобы поддерживать температуру стенки на допустимом уровне, ее внешнюю поверхность охлаждают, при этом тепловое сопротивление ее должно быть минимальным. С целью соблюдения этого условия назначается минимально допустимая толщина стенки и подбирается материал, обладающий максимальной теплопроводностью. Толстая стенка в подобных условиях начала бы разрушаться из-за перегрева с горячей стороны. Во многих случаях абсолютная толщина стенок составляет 1...5 мм. Поэтому всякого рода причины, вызывающие хотя бы местные увеличения тепловых сопротивлений, недопустимы, так как они могут стать потенциальным источником аварийности.

Физическая природа теплового сопротивления стыка связана с явлением микрошероховатостей сопрягаемых поверхностей. На рисунке 1 дана схема стыка двух металлических деталей при большом увеличении.

Действительная площадь металлического контакта в сотни и даже тысячи раз меньше площади видимого сопротивления. Сопрягае-

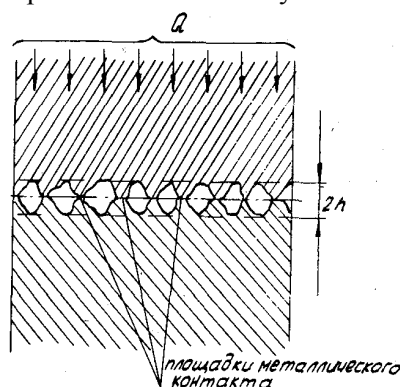


Рисунок 1. Схема контакта стали

мые детали разделены громадным количеством ячеек неправильной формы, заполненных воздухом. Перенос тепла в стыке происходит посредством теплопроводности через площадки прямого металлического контакта, а также путем излучения и теплопроводности через воздушные ячейки.

Предельные размеры ячеек $2h$ невелики – от долей микрон до десятков микрон. Однако теплопроводность воздуха в 2000 раз меньше теплопроводности металлов. Лучистый перенос в окружении металлических поверхностей - процесс не интенсивный. Повышенное тепловое сопротивление объясняется наличием воздушных прослоек.

В районе стыка в пределах зоны, протяженность которой можно оценить величинами порядка $(2...3)h$, по обе стороны от плоскости разъема возникает весьма сложная картина распределения линий теплового потока (за пределами этой зоны тепловой поток равномерно распределен по площади поперечного сечения). Общий тепловой поток разветвляется на множество мелких потоков с различной плотностью. Наиболее концентрированные элементарные потоки направлены к площадкам непосредственного металлического контакта, образованным смятием выступов микрошероховатости.

Картина температурного поля в районе стыка также становится весьма сложной. Увеличение теплового сопротивления приводит к резкому возрастанию среднего градиента температуры по нормали к плоскости стыка и соответственно к резкому падению температуры.

Характерным свойством температурных полей является самовыравнивание. Если в однородном поле в силу каких-либо причин возникают местные неоднородности, то на некотором удалении от области возмущения поле выравнивается и снова приобретает простейшую, наиболее устойчивую форму (следствие второго начала термодинамики).

Профессор Г. Н. Дульнев на примере специального аналитического решения показал и экспериментально подтвердил, что область резких изменений температурного поля в таких случаях выражается величиной того же порядка, что и занимаемая источником возмущения. Таким образом, можно считать, что приведенная картина сложного поля тепловых потоков и соответствующая ей картина температурного поля проявляются в основном в пределах удвоенной величины микрошероховатости ($2h$), т.е. реально проявляются на участке, исчисляемом десятками долями миллиметра.

Экспериментально произвести какие-либо измерения в такой области не представляется возможным. Замер распределения темпера-

Номер установки	Расположение стержня	Материал стержня	λ , Вт/(м·К)
1	Верхний	Алюминиевый сплав (97% Al, 3% Mg)	167
	Нижний	Латунь (62% Cu, 38% Zn)	116
2	Верхний	Сталь 14x17H2	23
	Нижний	Сталь 17x18H9	16

Верхний образец 4 нагревается с помощью электрического нагревателя 2, питаемого через трансформатор 3. Нижняя часть образца 5 охлаждается проточной водой, проходящей через холодильник 7. Нагреватель и образцы окружены жестяными коробками с тепловой изоляцией.

Конструкцией установки предусматривается создание стационарного одномерного потока тепла вдоль стержневой системы. Для обнаружения эффекта термического сопротивления стыка производится измерение температур по длине образцов с помощью десяти хромель-алюмелевых (ХА) термопар и электронного измерителя температур «Овен» 10. Термопары (по 5 штук в каждом образце) изготовлены из проволоки диаметром 0,23 мм и армированы двухканальной керамикой ($d=1,5$ мм). Каждая термопара вставлена в сверление перпендикулярно оси образца на глубину 15 мм.

Для создания различных удельных давлений в стыке внизу установки имеется рычажная схема 8 с плечевым отношением 1:54, которая может нагружаться гирями (от 1 до 5 штук по 2 кг). Эта система вместе с винтом 1 и указателем 6 обеспечивает во время опыта постоянное давление в стыке, компенсируя тепловое расширение стержневой системы.

Конструктивная схема расположения термопар представлена на рис. 3. Здесь показано распределение температур по стержням.

Порядок выполнения работы. Обработка результатов эксперимента

Рычажная система 8 (см. рис. 2) освобождается от арретира и нагружается гирями. С помощью верхней рукоятки 1 она устанавливается в нулевое положение по указателю 6. Включается подача воды в холодильник 7. На нагреватель подается мощность в 400 Вт.

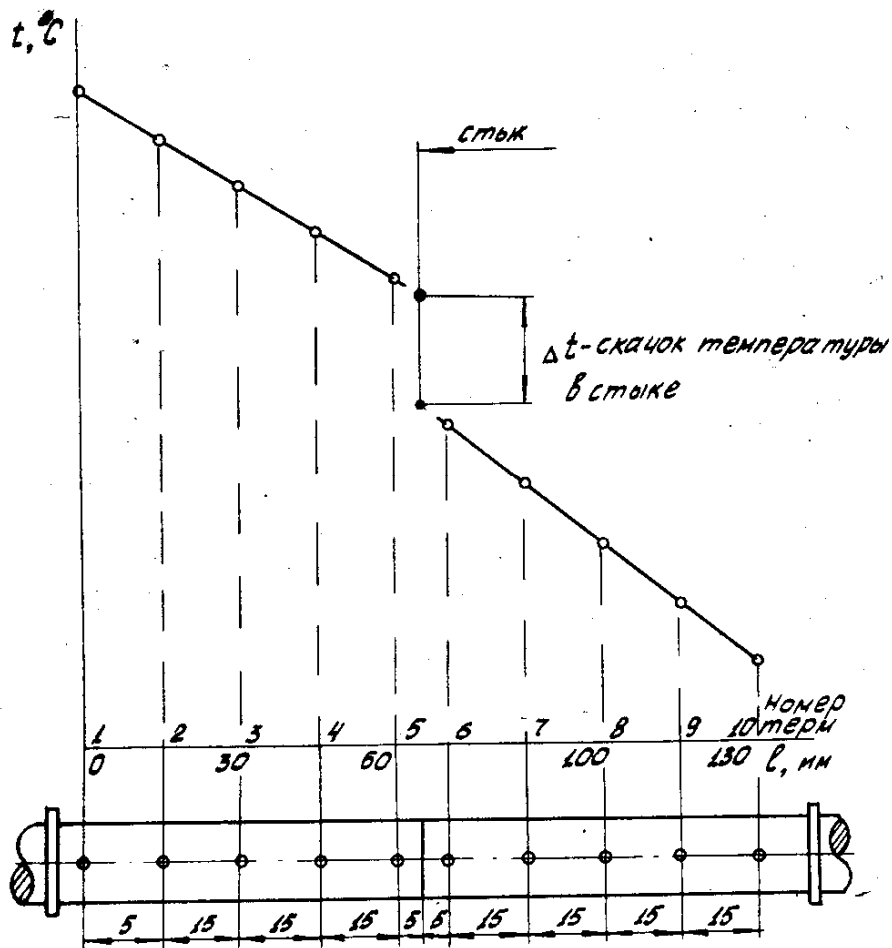


Рисунок 3 - Распределение температуры по длине экспериментальных образцов

По достижении стационарного распределения температур (60.....80 мин) в стержневой системе производится замер температур.

Обработка результатов опыта ведется в следующем порядке.

1. Записываются показания всех термопар.
2. На графике (см. рис. 3) откладываются результаты показаний. Масштаб температур: в 1 мм 1°C . Для каждого стержня проводится осредняющая прямая.

3. Графически определяется значение температурного скачка в стыке путем экстраполяции осредняющих прямых до плоскости стыка (пунктирные участки на рис. 3).

4. Рассчитываются:

удельный тепловой поток, протекающий через стержни,

$$q = -\lambda gradt \quad (2)$$

где $gradt = \frac{t_5 - t_1}{\delta}$;

λ – теплопроводность верхнего стержня (см. табл.);

$\delta = 0.06$ м - базовое расстояние между термопарами 1 и 5;

термическое сопротивление стыка $R = \frac{\Delta t}{q}$; (3)

эквивалентное утолщение стенки δ_3 в мм за счет термического сопротивления R :

$$\delta_3 = R\lambda \cdot 10^3. \quad (4)$$

Содержание отчёта

1. Краткое описание работы
2. Принципиальная схема установки
3. Протокол записи показаний измерительных приборов
4. Обработанные результаты опыта

Протокол записи измерений

Дата испытания _____

Номер эксперимента	G , кгс	P , мПа	Температура стержней										q , Вт/м ²	R	δ_3 , мм		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
			t , °C														

1. Материал образцов _____
2. $t_{x.c.}$ _____

Студент _____

Преподаватель _____

Контрольные вопросы к зачёту

1. Что подразумевается под термином "термическое сопротивление"?
2. Как понимать эквивалентность действия стыка дополнительному утолщению стенки δ_3 ?
3. Какова физическая природа повышенного термического сопротивления металлических стыков?
4. Какими способами осуществляется перенос тепла в стыке?
5. На какое расстояние от стыка распространяется область нелинейных резких изменений температурного поля?
6. Объясните порядок выполнения работы.
7. Объясните, что изображено на графике $t = f(I)$, как изменяется характер этой зависимости при увеличении нагрузки на стыке? Как изменится характер этой зависимости при повышении класса чистоты поверхностей?

Лабораторная работа №4

Теплоотдача цилиндра в условиях естественной конвекции

Цель работы: изучение методики и приобретение навыков экспериментального исследования частных задач конвективного теплообмена, обработка и обобщение результатов исследования.

Задание:

1. Провести опыт по определению коэффициента теплоотдачи при различных температурных напорах.
2. Обработать результаты экспериментов и представить их в обобщенной критериальной форме.

Теоретические основы эксперимента

При свободной конвекции движение жидкости у поверхности объекта возникает исключительно под действием разности плотностей, обусловленной отличием температуры поверхности от температуры среды. Если температура поверхности объекта выше температуры окружающей среды, то течение развивается снизу вверх. При обратном соотношении температур течение окружающей среды происходит сверху вниз.

В мировой практике этот вид теплообмена широко исследовался в самых различных вариантах с жидкостями и газами на объектах разных форм и размеров. Исследования в этом направлении продолжают и в настоящее время.

Математическая постановка задачи о конвективном теплообмене и ее переработка на основе учения о подобии физических явлений приводит к принципиальному выводу о том, что в условиях естественной конвекции обобщенная зависимость теплоотдачи должна выражаться функциональным соотношением

$$Nu = f(Gr; Pr), \quad (1)$$

где $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ - среднее число Нуссельта на поверхности цилиндра (безразмерное выражение коэффициента теплоотдачи);

$Gr = \beta \frac{gd^3 \Delta t}{\nu^2}$	-	число Грасгофа;
$Pr = \nu / a$	-	число Прандтля;
α	-	коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)
λ	-	теплопроводность газа (жидкости), Вт/(м·К)
ν	-	кинематическая вязкость, м ² /с;
a	-	температуропроводность, м ² /с;
β	-	коэффициент объёмного расширения жидкости или газа;
d	-	определяющий размер, м;
$\Delta t = t_w - t_f$	-	температурный напор (разность температур у поверхности объекта и температуры среды), К.

Многочисленные исследования полностью подтверждают теоретически предсказанную принципиальную зависимость (1). Вид функции устанавливается опытным путем в зависимости от геометрической формы поверхности, участвующей в конвективном теплообмене.

Для геометрически подобных тел независимо от их размеров функциональная зависимость является единой.

В данной лабораторной работе опыты проводятся с воздухом, для которого число Pr практически не зависит от температуры и давления ($Pr=0.7=const$). Поэтому не представляется возможным установить влияние Pr на теплоотдачу. В этом случае основная зависимость (1) упрощается:

$$Nu = f(Gr) \quad (2)$$

Следует иметь в виду, что последняя зависимость (2), конкретно определяемая по результатам опытов, в дальнейшем может использоваться в расчетах теплоотдачи только для сред, имеющих то же значение числа Pr (H₂, N₂, O₂, CO).

Описание лабораторной установки

Принципиальная схема установки представлена на рисунке 1. Экспериментальный цилиндр 1 изготовлен из алюминиевого сплава ($d=42$ мм, $l=684$ мм), внешняя поверхность которого никелирована и

отполирована, чтобы по возможности уменьшить рассеяние тепла лучеиспусканием. Равномерное распределение температур по длине цилиндра обеспечивается высокой теплопроводностью металлической стенки. Внутри цилиндра размещен электронагреватель 2 с максимальной потребляемой мощностью 200 Вт. Торцы цилиндра закрыты термостойким теплоизоляционным материалом. На поверхности цилиндра прикреплены винтами три дифференциальных хромель-копелевых термопары 3 (I, II, III).

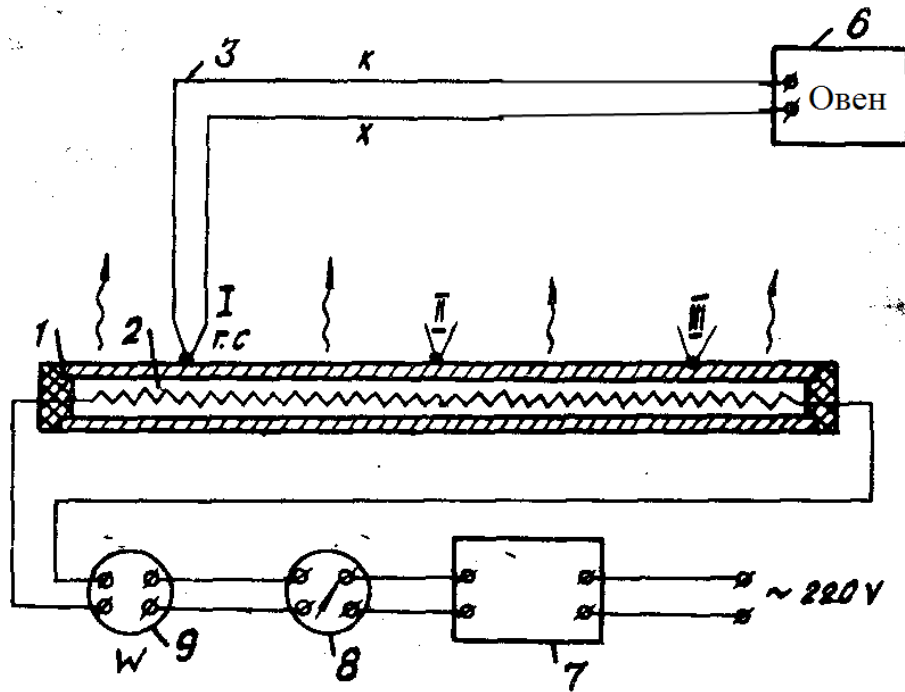


Рисунок 1. Схема установки для исследования теплоотдачи цилиндра в условиях естественной конвекции

Выводы термопар присоединены к «Овен» 6.

Электропитание нагревателя осуществляется от сети переменного тока (~ 220 V) через стабилизатор напряжения 7 и лабораторный автотрансформатор 8.

Для регистрации мощности, потребляемой электронагревателем, в цепь включен ваттметр 9.

Проведение опытов

После ознакомления со схемой опытной установки необходимо проверить правильность включения измерительных приборов и затем приступить к проведению опытов.

Стабилизатор напряжения включить в сеть при нулевом положении рукоятки ЛАТР-1. Затем, повышая трансформатором напряжение, довести мощность до 200 Вт.

В ходе вывода установки на режим следует систематически контролировать температуру по одной из термопар.

Как только температура стенки трубы станет равной $\sim 175^\circ\text{C}$, необходимо понизить потребляемую мощность, не допуская дальнейшего повышения температуры стенок.

В этом состоянии выдержать установку до полной стабилизации температуры поверхности трубы, проверяя ее несколькими контрольными замерами, выполняемыми с интервалами ~ 3 мин. С этого момента начинается экспериментальная часть работы.

Опыты проводятся на 6-8 температурных режимах нагревателя. В каждом последующем режиме необходимо снижать потребляемую мощность нагревателя так, чтобы температура поверхности цилиндра снижалась по сравнению с предыдущим опытом на $\sim 15^\circ\text{C}$. На каждом этапе предварительно необходимо добиваться стабилизации теплового режима установки.

Обработка результатов

Для каждого температурного режима установки определяются:

1. Значения $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, ^\circ\text{C}$ (по показаниям термопар I, II, III).
2. Средний температурный напор

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3}{3}.$$

3. Суммарный коэффициент теплоотдачи $\alpha_\Sigma, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

$$\alpha_\Sigma = \frac{W}{F \Delta t_{cp}}, \quad (3)$$

где F – боковая поверхность цилиндра, м^2 ;
 W – мощность, потребляемая нагревателем, Вт.

4. Радиационный коэффициент теплоотдачи α_R :

$$\alpha_R = \varepsilon_1 c_0 \frac{\left(\frac{T_{cp}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_f}{100}\right)^4}{\Delta t_{cp}},$$

где $\varepsilon_1=0.078$ - собственная степень черноты поверхности трубы;
 $c_0=5.67$ – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела;
 T_f, T_{cp} – температура окружающего воздуха и поверхности, К:

$$T_f = t_f + 273, T_{cp} = \Delta t_{cp} + T_f$$

5. Конвективный коэффициент теплоотдачи $\alpha = \alpha_\Sigma - \alpha_R$.

6. Число Нуссельта

$$Nu_f = \frac{\alpha d}{\lambda_f},$$

где d – диаметр цилиндра (определяющий размер), м;
 λ_f – теплопроводность воздуха при температуре t_f , Вт/(м·К).

7. Число Грасгофа

$$Gr_f = \beta_f \frac{g d^3 \Delta t_{cp}}{\nu_f^2},$$

где $\beta_f = \frac{1}{T_f}$ – коэффициент объёмного расширения воздуха, 1/К; ν_f – кинематическая вязкость, м²/с. Значения ν_f приведены при давлении $P_0=1.013 \cdot 10^5$ Па. Пересчёт на барометрическое давление B во время опытов в паскалях осуществляется по соотношению

$$\nu_B = \nu_0 \frac{1.013 \cdot 10^5}{B};$$

$g=9.81$ м/с² – ускорение свободного падения.

8. Определение зависимости

$$Nu_f = f(Gr_f), \quad (4)$$

имеющей степенной характер $Nu_f = C Gr_f^n$ производим следующим образом:

значения Nu_f и Gr_f , полученные из опыта, откладываются на графике в логарифмических координатах $lg Nu_f - lg Gr_f$.

Для построения графика могут быть рекомендованы масштабы:
 1 ед. $lg Nu_f = 1000$ мм, 1 ед. $lg Gr_f = 500$ мм.

Через точки на графике проводится осредняющая прямая линия. Величина показателя степени n уравнения (4) определяется как тангенс угла наклона φ к этой прямой оси ординат:

$$n = \lg \varphi = \frac{\lg Nu_B - \lg Nu_A}{\lg Gr_B - \lg Gr_A},$$

где А и Б – любые точки, лежащие на осредняющей прямой. Величина множителя С определяется по соотношению

$$C = \frac{Nu_f}{Gz_f^n},$$

где Nu_f и Gr_f берутся для точки, лежащей между значениями А и Б на осредняющей прямой.

Отчёт о выполненной работе должен содержать принципиальную схему установки, протокол записи измерений, обработку результатов опыта (см. таблицу).

Протокол записи измерений

$V_0 =$ ____ Па

Дата исполнения _____

Номер опыта	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_{cp}	α_Σ	α_R	α	T_{cp}	T_f	Nu_f	Gr_f	$\lg Nu_f$	$\lg Gr_f$
	°С				Вт/(м ² ·К)			К					
1													
2													
3													
4													

Студент _____

Преподаватель _____

Контрольные вопросы к зачёту

1. Что такое конвективный теплообмен?
2. Напишите выражение Ньютона-Рихмана
3. Что такое коэффициент теплоотдачи?
4. Является ли коэффициент теплоотдачи α_Σ одинаковым для каждого элемента внешней поверхности?
5. Подвижна или неподвижна окружающая среда (воздух) около поверхности цилиндра?
6. Как будет изменяться средняя скорость воздуха около поверхности цилиндра с увеличением Δt_{cp} и почему?
7. Через торцы цилиндра частично рассеивается тепло, вводимое во внутреннее пространство. Как это сказывается на точности определения α_Σ ?
8. Как будет развиваться процесс конвекции на поверхности нагретой аппаратуры, помещенной внутри спутников Земли?

Лабораторная работа №5

Теплоотдача плоской пластины

в условиях естественной конвекции

Цель работы:

1. Исследовать процесс теплоотдачи плоской поверхности в различных условиях естественной конвекции.
2. Используя соответствующие критериальные уравнения, оценить коэффициент теплоотдачи.
3. Оценить тепловые потери при разных положениях плоской пластины в пространстве.

Теоретические основы эксперимента

Возле нагретого тела возникает свободное движение теплоносителя, обусловленное разной плотностью холодных и нагретых масс. Нагреваемые от стенки объемы всплывают, а охлаждаемые опускаются.

При малой толщине прилегающего к пластине слоя течение вдоль пластины имеет ламинарный характер, но по направлению движения толщина слоя постепенно увеличивается, течение теплоносителя (в нашем случае воздуха) становится неустойчивым, переходит в турбулентное с образованием и отрывом вихрей от стенки.

На участке ламинарного движения с увеличением толщины пограничного слоя коэффициент теплоотдачи уменьшается, а в зоне вихревого движения имеет практически одинаковое значение для всей поверхности. Таким образом, характер движения обуславливает интенсивность теплоотдачи.

Около нагретых вертикальных или горизонтальных, плоских стенок характер движения воздуха зависит как от температурного напора, так и от положения стенки и ее размеров (длины, ширины); см. рис. 1 (а, б, в, г).

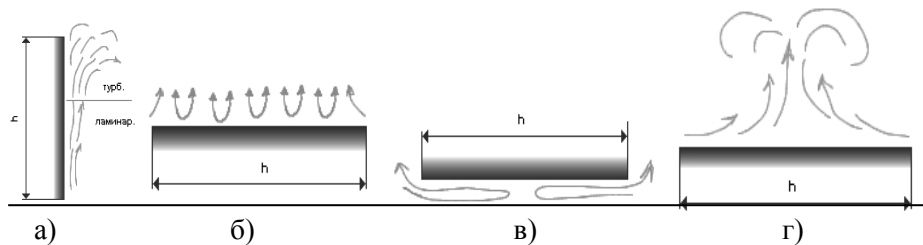


Рисунок 1 - Характер свободного движения воздуха около нагретых горизонтальных плит

Установлено, что теплообмен протекает менее интенсивно там, где поверхность стесняет движение воздуха (рис. 1, г).

Исследования интенсивности теплообмена привели к следующей критериальной зависимости:

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

где значения коэффициента c и показателя степени « n » для различных значений $(Gr \cdot Pr)$

$Gr \cdot Pr$	c	n
$1 \cdot 10^{-2} \div 5 \cdot 10^2$	1.18	$\frac{1}{8}$
$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	0.54	$\frac{1}{4}$
$2 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^{13}$	0.135	$\frac{1}{3}$

$$\overline{Nu} = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda} - \text{число Нуссельта}$$

$$Gr = \beta \frac{g \cdot x^3 \cdot \Delta t}{\nu^2} - \text{число Грасгофа}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} - \text{число Прандтля}$$

$$\alpha - \text{коэффициент теплоотдачи, } \frac{Вт}{м^2 К}$$

$$\lambda - \text{теплопроводность воздуха, } \frac{Вт}{м К}$$

$$\nu - \text{кинематическая вязкость, } \frac{м^2}{с}$$

$$\beta - \text{коэффициент объемного расширения воздуха } \beta = \frac{1}{T}$$

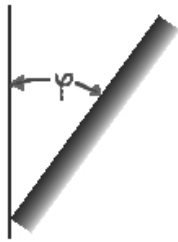
$$a - \text{температуропроводность, } \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \quad a = \left(\frac{\lambda}{C_p \rho} \right)$$

x - определяющий размер, м

$\Delta t = t_{cm} - t_{oc}$ - разность температур поверхности стенки и окружающей среды (температурный напор)

В качестве определяющей принята средняя температура $t_{cp} = \frac{t_{cm} + t_{oc}}{2}$, за определяющий размер в случае вертикального расположения стенки принята ее высота (h), а в случае горизонтального расположения – наименьший размер (b).

Для плоских горизонтальных поверхностей значение α , вычисленное по приведенным формулам, надо увеличить на 30%, если нагреваемая поверхность обращена кверху, и уменьшить на 30% если тепло отдается книзу.



Коэффициент теплоотдачи наклонной поверхности определяется как коэффициент теплоотдачи вертикальной поверхности, умноженный на поправочный множитель $(\cos \varphi)^{-0,25}$ для поверхностей, обращенных вверх, и $(\cos \varphi)^{0,25}$ для поверхностей, обращенных вниз.

Для практических расчетов теплообмена, например, охлаждения радиоаппаратуры, применяют упрощенные формулы:

$$\alpha_k = A^4 \sqrt{\frac{t_{cm} - t_{oc}}{h}} \quad \begin{array}{c} \uparrow \\ \uparrow \\ \uparrow \end{array}$$

$$\alpha_k = 1,3 \cdot A^4 \sqrt{\frac{t_{cm} - t_{oc}}{h}} \quad \begin{array}{c} \uparrow \uparrow \uparrow \end{array}$$

$$\alpha_k = 0,7 \cdot A^4 \sqrt{\frac{t_{cm} - t_{oc}}{h}} \quad \begin{array}{c} \downarrow \downarrow \downarrow \end{array}$$

где коэффициенты $A = f(\beta, g, P, \nu)$ при $t_{cp} = \frac{t_{cm} + t_{oc}}{2}$ равны:

t_{cp}	0	10	20	30	40	60	80	100	120	140	150
A	1.42	1.4	1.38	1.36	1.34	1.31	1.29	1.27	1.26	1.25	1.245

Описание лабораторной установки

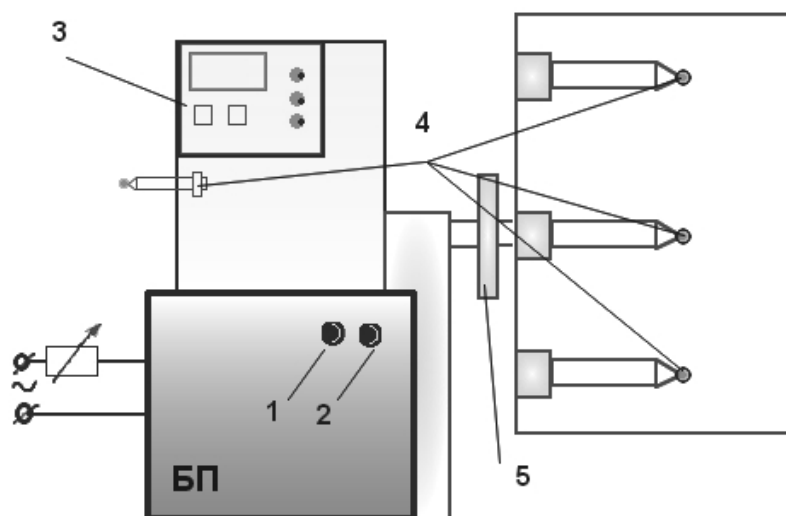


Рисунок 2 - Схема установки:

- 1- Переключатель I
- 2- Переключатель II
- 3- Датчик температуры
- 4- Термопары
- 5- Измеритель угла

На рисунке 2 изображена схема установки, представляющей плоскую стенку из алюминиевого сплава ($h=255$ мм, $b=140$ мм), на которой размещены термопары, определяющие температуру на краях (t_n , t_b) и в центре (t_c) пластины. Выводы термопар (4) и датчик температуры (3) окружающего воздуха присоединены к измерительному прибору через переключатель, располагающийся на датчике.

Тепло на пластину подается нагревательным элементом, работающим от сети через блок питания.

Задняя стенка теплоизолирована.

Угол отклонения стенки от вертикали (φ) измеряется угломером.

Проведение эксперимента

1. Включить установку в сеть и в течение 40-50 мин., проверяя температуру на поверхности стенки, достичь стабилизации разности температур воздуха (t_{oc}) и пластины ($t_{ст}$) в заданном положении. Измерение начинать из положения на рис. 1б.

Записать (t_b , t_n , t_d).

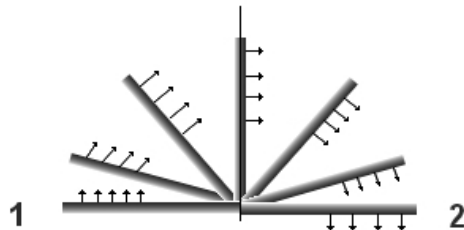


Рисунок 3 – Порядок изменения угла наклона пластины

2. Установить положение пластины под заданным углом, вращая как показано на рис. 3, и, дождаввшись стабилизации показаний, записать новые значения (t_b , t_n , t_d).

3. Внести в протокол угол наклона пластины (φ)

Переключение между термопарами происходит с помощью тумблеров (I и II). Переключение на температуру окружающей среды выполняется с помощью кнопки на датчике (положение 2).

Обработка результатов

1. Для каждого положения пластины найти $t_{cp} = \frac{t_{cm} + t_{oc}}{2}$
2. Принять теплофизические характеристики воздуха (λ , ν , β , P_r) для t_{cp} из таблицы, приведенной в приложении.
3. Вычислить $\Delta t = t_{ст} - t_{oc}$.
4. Рассчитать величину $(Gr \cdot Pr)$. Определить режим обтекания пластины.
5. Выбрав по полученному значению $(Gr \cdot Pr)$ критериальное уравнение, рассчитать величину коэффициента теплоотдачи

$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{x}$, при этом полученное значение α наклонных плит

рассчитывается с введением поправки $(\cos \varphi)^{\pm 0.25}$, а для горизонтальных плит значение α умножается на 1,3, если теплоотдающая поверхность обращена вверх, и на 0,7, если тепло отдается вниз.

6. Найти тепловые потери (Q) при заданных положениях пластины. $Q = (\alpha_k + \alpha_R) \cdot F \cdot \Delta t$

7. Рассчитать радиационный коэффициент теплоотдачи α_R по

формуле: $\alpha_R = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \frac{\left(\frac{T_{cm}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{oc}}{100}\right)^4}{\Delta t}$, где $\varepsilon = 0,06$, $C_0 = 5,7$

и оценить степень влияния α_R на теплоотдачу пластины. Результаты измерений и расчётов занести в протокол:

Положение пластины, угол φ	$t_b, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$	$t_{ц}, ^\circ\text{C}$	$t_{ст}, ^\circ\text{C}$	$t_{ос}, ^\circ\text{C}$	$t_{ср}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	Gr·Pr	α_k	α_R	Q

8. Построить зависимость $\alpha = f(\varphi)$ по полученным экспериментальным данным.

9. Сравните результаты для вертикального и горизонтального положения плит с расчетом по упрощенным формулам. Оцените погрешность.

Контрольные вопросы к зачету:

1. Чем обуславливается теплоотдача пластины в условиях естественной и вынужденной конвекции?
2. Как отличается теплоотдача поверхности в ламинарном и турбулентном режимах обтекания?

3. Как связана температура на поверхности пластины с положением пластины в пространстве?
4. В каких случаях α_R сопоставимо или превышает α_k ?
5. Объясните разницу показаний верхней, средней и нижней термопар с учётом режима обтекания пластины.
6. Сравните результаты с расчётом по упрощённым формулам.

Приложение

Физические параметры для сухого воздуха при давлении 760 мм рт. ст.

T, K	t, °C	C_p	ρ кг/м ³	$\lambda \cdot 10^{-2}$ Вт/м	$\alpha \cdot 10^{-5}$	$\mu \cdot 10^{-6}$	$\nu \cdot 10^{-6}$ м ² /с	Pr
273	0	1.005	1.293	2.44	1.881	17.17	13.28	0.707
283	10	1.005	1.247	2.51	2.006	17.66	14.16	0.705
293	20	1.005	1.205	2.59	2.142	18.15	15.06	0.703
303	30	1.005	1.165	2.67	2.286	18.64	16.00	0.701
313	40	1.005	1.128	2.76	2.431	19.13	16.96	0.699
323	50	1.005	1.093	2.83	2.572	19.62	17.95	0.698
333	60	1.005	1.060	2.90	2.720	20.11	18.97	0.696
343	70	1.009	1.029	2.97	2.856	20.60	20.02	0.694
353	80	1.009	1.000	3.05	3.020	21.09	21.09	0.692
363	90	1.009	0.972	3.13	3.189	21.48	22.10	0.690
373	100	1.009	0.946	3.21	3.364	21.88	23.13	0.688

Лабораторная работа №6

Определение коэффициента теплоотдачи от шара к воздуху методом регулярного режима

Цель работы: теоретическое и экспериментальное ознакомление с нестационарными методами определения коэффициента теплоотдачи.

Задание

1. Найти значение коэффициента теплоотдачи от шара к воздуху в условиях вынужденной (естественной) конвекции.
2. Составить отчет по результатам работы.

Теоретические основы эксперимента

Методы экспериментального определения конвективного коэффициента теплоотдачи α принципиально делятся на две основные группы: стационарные и нестационарные.

Нестационарные методы, как правило, всегда проще по своему техническому оформлению и менее трудоемки, чем стационарные. К особым достоинствам нестационарных методов следует отнести возможность их использования для изучения конвективного теплообмена таких объектов, где применение стационарных методов физически невозможно. Например, теплоотдача к поверхности вращающихся лопаток и дисков газовых турбин, теплоотдача внутри действующих атомных реакторов, теплоотдача на поверхности ракет в полетных условиях и др.

Нестационарные методы исследования теплоотдачи, а также методы определения тепловых свойств материалов глубоко развиты в трудах выдающегося советского теплофизика проф. Г. М. Кондратьева и его учеников. В России эти методы широко распространены и именуются как «методы теплового регулярного режима».

В данной лабораторной работе используется наиболее простой случай, связанный с применением регулярного режима. Излагаемая ниже теория вполне очевидна и достаточно элементарна. Задачей лабо-

раторной работы является экспериментальное определение конвективного коэффициента теплоотдачи α от шара к воздуху в условиях искусственной конвекции. В качестве приёма для определения осреднённого по поверхности шара коэффициента теплоотдачи α используется закономерность, вытекающая из рассмотрения процесса нестационарного охлаждения нагретого шара.

Условные обозначения

Шар

M – масса шара, кг;
 C – теплоёмкость материала, Дж/(кг·К);
 F – площадь поверхности, м²;
 Q_f, Q_R – тепло, отдаваемое шаром окружающей среде конвекцией и лучеиспусканием, Дж;
 $\alpha, \alpha_R, \alpha_\Sigma$ – конвективный, радиационный и суммарный коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 ε_l – степень черноты поверхности;
 t – мгновенное текущее значение температуры в процессе остывания, °С;
 i – условная энтальпия материала, Дж/кг.

Окружающая среда

t_f – температура воздуха вдали от нагретой поверхности ($t_f = \text{const}$), °С;
 τ – время, с.

К телу, остывающему в изобарных условиях, применимо аналитическое выражение первого начала термодинамики, в форме которой устанавливается связь между теплотой и энтальпией:

$$dQ = -Mdi . \quad (1)$$

Выражение (1) строго справедливо для равновесных и неравновесных процессов. Величина dQ в левой части выражается суммой

$$dQ = dQ_f + dQ_R . \quad (2)$$

Сравнивая выражения (1) и (2), получаем исходное дифференциальное уравнение для решения поставленной задачи:

$$- Mdi = dQ_f + dQ_R . \quad (3)$$

Раскрываем выражение (3), используя для определения Q_f и Q_R известные закономерности и относя рассуждения к бесконечно малому промежутку времени $d\tau$:

$$-MCdT = \alpha F(T - T_f)d\tau + \varepsilon_1 c_0 F \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] d\tau$$

(знак "минус" в левой части потому, что при остывании тела его температура снижается).

Полученное выражение перепишем в форме

$$\frac{dT}{T - T_f} = -\frac{F}{MC} \left[\alpha + \varepsilon_1 c_0 \frac{\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4}{T - T_f} \right] d\tau. \quad (4)$$

Второй член в скобках имеет размерность Вт/(м²·К) и именуется радиационным коэффициентом теплоотдачи α_R .

Введем новые обозначения:

$\alpha_\Sigma = \alpha + \alpha_R$ - суммарный коэффициент теплоотдачи;

$v = T - T_f$ - текущая избыточная температура шара, отсчитанная от температуры окружающей среды.

Из условия $T_f = \text{const}$ следует $dv = dt$. С учетом дополнительных обозначений получим конечную форму дифференциального уравнения нестационарного теплообмена

$$\frac{dv}{v} = -\frac{F\alpha_\Sigma}{MC} d\tau \quad (5)$$

Сделав допущение, что $\alpha_\Sigma = \text{const}$ (это еще необходимо специально обосновать) и введя обозначение

$$m = \frac{F\alpha_\Sigma}{MC}, \quad (6)$$

проинтегрируем уравнение (5)

$$\ln v = -m\tau + \text{const}. \quad (7)$$

Уравнение (7) является отправным пунктом во всей теории регулярного режима. Из уравнения (7) следует, что логарифм натуральный избыточной температуры v является линейной функцией времени τ . При выводе уравнения (7) без специальных оговорок сделаны допущения:

А. Шар остывает как одно целое (температура во всех точках шара имеет одно и то же значение), т.е. температурное поле по объему равномерно.

Параметром, определяющим неравномерность температурного поля, является число Био (Bi):

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}.$$

Если $Bi=0$, то в объеме тела имеется строго равномерное распределение температур по объему.

$Bi=\infty$ - предельная степень неравномерности температурного поля.

В данной установке порядок величины Bi для шара составляет $Bi \approx 0.003$. Специальным расчетом можно показать, что в этом случае разность температуры центра и поверхности в условиях опыта не превышает 0.1°C , что находится за пределами точности данных измерений. Таким образом, принятое допущение вполне оправданно.

Б. $\alpha_\Sigma = \text{const}$.

Величина α_R , входящая в состав α_Σ , зависит как от температурного напора, так и от абсолютных значений температур T и T_f . Однако эта зависимость слабая. Опыт проводится в диапазоне t от ~ 150 до $\sim 80^\circ\text{C}$. Изменение v составляет $\sim 70^\circ\text{C}$.

Поверхность шара никелирована и обладает слабой излучательной способностью ($\varepsilon_1 \approx 0,075$). Благодаря этой специальной мере среднее абсолютное значение α_R по сравнению α_Σ составляет величину порядка $\sim 3\%$. Изменение α_R за время опыта составляет $\sim 10\%$.

Поскольку α_R входит слагаемым в состав α_Σ , то полное изменение α_Σ во время опыта не превышает $\sim 0.3\%$.

Строго говоря, для оценки возможности интегрирования уравнения (5) важно постоянство всего комплекса m (6). Кроме рассмотренного влияния α_R на величину, следует иметь в виду, что величина C , входящая в состав знаменателя, при остывании шара в указанном диапазоне температур также изменяется на $\sim 0,5\%$. При остывании α_R и C убывают. Поскольку эти величины входят в состав m в виде отношения, то их совместное влияние на m меньше, чем отдельное влияние α_R , и, таким образом, изменение m фактически составит $\sim 0.1\%$.

Из уравнения (7) следует, что если в процессе остывания шара регистрировать величину v и время τ , то в координатах $\ln v - \tau$ должен получиться падающий линейный график с тангенсом угла наклона $\text{tg}\beta = -m$, 1/мин (рис. 1).

В теории регулярного режима величина m именуется "темпом охлаждения". Любые исследования, связанные с применением регуля-

ного режима, всегда сводятся к определению m . В данном случае по значению величины из соотношения (6) определяется α_s , а затем α . Физический смысл "темпа охлаждения" состоит в том, что m определяет не скорость изменения самой избыточной температуры $\left(\frac{dv}{d\tau}, \frac{^{\circ}C}{C}\right)$, а скорость изменения логарифма избыточной температуры во времени. В стадии регулярного режима эта скорость $m = \frac{d[\ln v]}{d\tau} = const$.

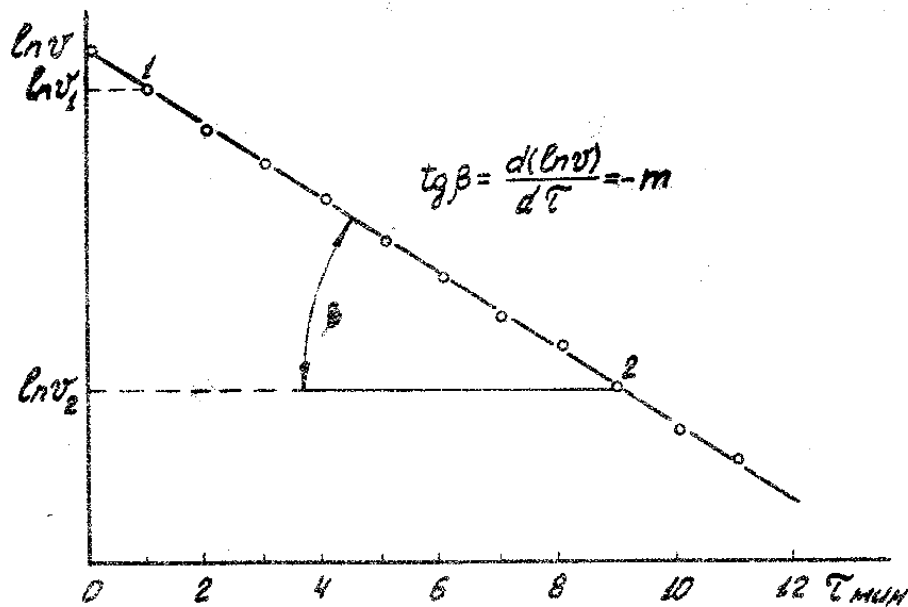


Рисунок 1 - График охлаждения нагретого шара в полулогарифмических коэффициентах при постоянном значении осредненного коэффициента теплоотдачи на поверхности

Описание лабораторной установки и методика эксперимента

Схема установки изображена на рис. 2. Шар (альфакалориметр) 1 выполнен из красной меди, никелирован, полирован, подвешен на вертикальной подвижной державке.

Характеристики шара:

$d=70.14$ мм (определено как среднее значение в результате микрометрического обмера);

$M=1.610$ кг (определено взвешиванием на лабораторных весах после сверления);
 $C=397$ Дж/(кг·К) средняя изобарная теплоемкость меди в интервале температур $t \approx 150 \dots 70^\circ\text{C}$;
 $F=\pi d^2=0.01545$ м² поверхность шара.

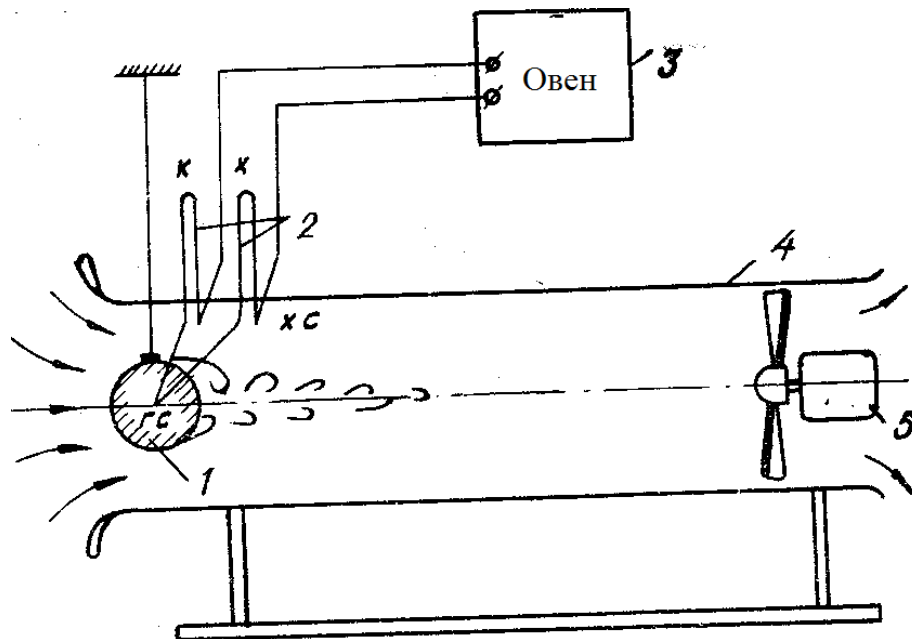


Рисунок 2 - Схема установки для определения коэффициента теплоотдачи от шара к воздуху методом регулярного режима: 1 - шар "альфакалориметр"; 2 – дифференциальная термопара ХК; 3 – электронный измеритель температуры Овен; 4 - аэродинамическая труба; 5 - вентилятор

Для измерения текущей разности температур $v=t-t_f$ используется хромель-копелевая (ХК) дифференциальная термопара из проволок $d=0,5$ мм. Горячий спай через сверление $d=3$ мм введен до центра шара. Для улучшения теплового контакта сверление на глубину ~ 6 мм залито сплавом Вуда. Холодный спай помещен в воздушный поток. Замер температуры производится электронным измерителем температуры «Овен».

До начала эксперимента поверхность шара протирается спиртом для удаления пыли и жировых загрязнений. Затем прогревается на специальной электрической плитке до температуры $\sim 150^\circ\text{C}$. Нагретый

шар вводится в устье аэродинамической трубы, затем включается вентилятор.

Эксперимент начинается первым отсчетом показания потенциометра, одновременно в ход пускается секундомер. Дальнейшие измерения производятся через одинаковые промежутки времени (10-12 замеров).

Обработка результатов эксперимента

Записываются показания температуры и значения избыточной температуры ν , °С.

Определяются значения $\ln \nu$ с точностью до третьего знака после запятой. Строится график $\ln \nu = f(\tau)$ в следующем масштабе: одна логарифмическая единица равна 500 мм, одна минута - 10...15 мм.

Через точки графика проводится осредняющая прямая. По ее наклону определяется темп охлаждения:

$$m = \frac{\ln \nu_1 - \ln \nu_2}{\tau_2 - \tau_1}.$$

Индексы 1 и 2 относятся к любым двум точкам, находящимся на осредняющей прямой (см. рис. 1). Суммарный коэффициент теплоотдачи определяется из уравнения (7).

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{M}{F} C \frac{m}{60}, \quad (8)$$

где $\frac{M}{P} = 104.15$ кг/м² - константа калориметра;

$C=397$ Дж/(кг·К)

m - темп охлаждения из постоянного графика, мин⁻¹.

С учетом постоянных коэффициентов

$$\alpha_{\Sigma} = 689m. \quad (9)$$

Среднее значение радиационного коэффициента теплоотдачи определяется по среднему значению температуры T за время опыта. В качестве T_f принимается значение температуры помещения

$$\alpha_R = C \frac{\left(\frac{T_{cp}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_f}{100}\right)^4}{T - T_f}, \quad (10)$$

где $C=0.418$ Вт/(м²·К⁴) - коэффициент излучения поверхности шара.

Конвективный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \alpha_{\Sigma} - \alpha_R \quad (11)$$

При аккуратном ведении опыта погрешность определения ее не превышает $\pm 3\%$.

Отчет о выполненной работе должен содержать принципиальную схему установки, протокол записи измерений (см. таблицу), обработку результатов опыта.

Протокол записи измерений

$B =$ _____ Па

Дата испытания _____

№ п/п	τ , мин	E , мВ	ν , °С	$\ln \nu$	m , л/мин	α_{Σ}	α_R	α
						Вт/(м·К)		
1								
2								
3								
4								

Студент _____

Преподаватель _____

Контрольные вопросы к зачёту

1. Что такое конвективный теплообмен?
2. Напишите формулу Ньютона-Рихмана.
3. Каков физический смысл коэффициента теплоотдачи?
4. Физический смысл темпа охлаждения.
5. Что такое тепловой регулярный режим?
6. Какой вид будет иметь график охлаждения $\ln \nu - \tau$, если коэффициент теплоотдачи в процессе остывания будет изменяться (возрастать, падать)?

Лабораторная работа №7

Тепловое излучение окисленной металлической поверхности

Цель работы: определение калориметрическим методом зависимости интегральной излучательной способности металлической поверхности как функции температуры.

Задание:

1. Определить количество тепла, излучаемое вольфрамовой нитью в интервале температур 600...1300 К.
2. На основании полученных результатов определить собственную излучательную способность вольфрамовой проволоки и ее степень черноты.
3. Результаты экспериментов отразить графически и аппроксимировать аналитической зависимостью.

Теоретические основы эксперимента

Излучение энергии, происходящее из поверхностного слоя твердого тела в окружающую среду, называется излучением твердого тела.

Тепловое излучение является процессом рассеивания внутренней энергии излучающего тела электромагнитными волнами. Оно является результатом внутриатомных процессов, которые зависят от температуры тела. Возбудителем волн являются заряженные материальные частицы (электроны, ионы). При поглощении каким-либо другим телом электромагнитное излучение, взаимодействуя с атомной структурой, вызывает изменение внутренней энергии этого тела. Все виды электромагнитного излучения имеют одинаковую природу и различаются лишь по длине волны.

Виды излучения	Длина волны, мм
космическое	$0.05 \cdot 10^{-9}$
γ -излучение	$0.05 \cdot 10^{-9} \dots 0.1 \cdot 10^{-9}$
рентгеновское	$0.1 \cdot 10^{-9} \dots 2 \cdot 10^{-5}$
ультрафиолетовое	$2 \cdot 10^{-5} \dots 0.4 \cdot 10^{-3}$
видимое	$0.4 \cdot 10^{-3} \dots 0.8 \cdot 10^{-3}$
тепловое (инфракрасное)	$0.8 \cdot 10^{-3} \dots 0.8$
радиоволновое	$0.2 \dots 10 \cdot 10^6$

Необходимо отметить, что представление о лучистой энергии как энергии только электромагнитных колебаний не позволяет объяснить некоторые ее свойства. Лучистая энергия излучается и поглощается не в виде непрерывного потока, а некоторыми порциями-квантами, которые обладают и волновыми, и корпускулярными свойствами. Эти свойства дополняют друг друга.

Корпускулярные свойства (отражение, поглощение, фотоэффект) наиболее существенно проявляются в коротковолновом спектре излучения, волновые (дифракция, интерференция) - в длинноволновом.

Излучение свойственно всем телам и происходит при любой температуре, отличной от абсолютного нуля. Каждое тело не только непрерывно излучает, но и непрерывно поглощает лучистую энергию. Количество отдаваемого или воспринимаемого тепла определяется разностью между количеством излучаемой и поглощаемой лучистой энергии. Эта разность отлична от нуля, если температура тел, участвующих во взаимном обмене лучистой энергии, различна. При одинаковой температуре тел вся система находится в подвижном тепловом равновесии. В этом случае все тела системы также излучают и поглощают энергию, но для каждого из них приход лучистой энергии равен ее расходу (на основании закона теплового равновесия).

В процессах лучистого теплообмена участвуют лишь тонкие поверхностные слои. Для проводников тепла толщина слоя составляет 1 мкм, а для непроводников тепла - около 1 мм.

Количество тепла, переносимого путем излучения, становится существенным только при высоких температурах.

При всем разнообразии процессов излучения в различных областях длин волн для них могут быть установлены некоторые общие свойства. В качестве характеристики вводится величина, называемая

плотностью излучения - φ (Вт/м²). Она представляет собой количество энергии, излучаемой при данной температуре с единицы поверхности тела в единицу времени:

$$\varphi = \frac{Q}{P\tau}, \quad (1)$$

В теории лучистого теплообмена широко используется закон Стефана-Больцмана, устанавливающий зависимость полной излучательной способности абсолютно черного тела от его температуры:

$$\varphi_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (2)$$

где $c_0=5.67$ Вт/(м²·К⁴) - коэффициент излучения абсолютно черного тела, константа, не зависящая от температуры.

Излучение реальных нагретых тел отличается от излучения черного тела и называется серым излучением. Излучательная способность серого тела отклоняется от знака Стефана-Больцмана. Однако для однообразия расчетных построений в основу всех расчетов теплового излучения различных тел положены, как наиболее простые и универсальные, законы излучения абсолютно черного тела (в виде закона четвертой степени) в форме

$$\varphi = c \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (3)$$

где c - коэффициент излучения серого тела, Вт/(м²·К⁴). Его численное значение является функцией температуры тела, определяется экспериментально и может быть представлено зависимостью

$$c = \varepsilon c_0 \quad (4)$$

где ε - степень черноты (отношение количества энергии собственного излучения тела при данной температуре к энергии излучения абсолютно черного тела той же температуры).

Как показывают опыты, степень черноты различных тел определяется не только их природой, но также формой, состоянием поверхности и температурой.

Согласно опытным данным повышение температуры твердых тел приводит к увеличению ε , поэтому излучательная способность реальных тел, в общем, изменяется пропорционально температуре не в четвертой, а в более высокой степени, т.е. T^n , где $n>4$ (для платины

$n=5.11$ в интервале $T= 500...9000$ К; для алюминия $n=4.73$ в интервале $T=500...800$ К). Результирующий лучистый теплообмен в системе двух серых тел, имеющих температуры T_1 и T_2 , всегда определяется как некоторая разность их лучистых эффективных потоков в форме

$$\Phi = F \varepsilon_n c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

где ε_n - приведенная степень черноты системы, зависящая от излучательных свойств материалов ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) и геометрических форм излучающих поверхностей; F - излучающая поверхность, m^2 .

Если комплекс перед квадратными скобками обозначить через c , т.е.

$$c = \varepsilon c_0 \quad (6)$$

то с учетом равенства (6) соотношение (5) запишется в виде

$$\Phi = Fc \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (7)$$

Выражение (7) является типичной формой расчетной зависимости, которая искусственно вводится в рамки закона четвертой степени абсолютной температуры (для единообразия расчетных соотношений).

Вместе с тем представляет интерес установление фактической излучательной способности реальных тел как функции от температуры. Предположительно эта закономерность выражается соотношением

$$\Phi = Fc \left(\frac{T}{100} \right)^n \quad (8)$$

где ожидается $n > 4$. Проверка этого соотношения и является задачей лабораторной работы.

Существует ряд методов экспериментального определения n : метод теплового регулярного режима, метод сравнения реального излучения с излучением абсолютно черного тела, калориметрический метод и др.

В проводимой работе используется калориметрический метод, основанный на непосредственном измерении энергии, излучаемой исследуемым телом, а также его температуры и температуры окружающей среды. Обработка данных эксперимента проводится с учетом выражений (1)-(7).

Описание лабораторной установки

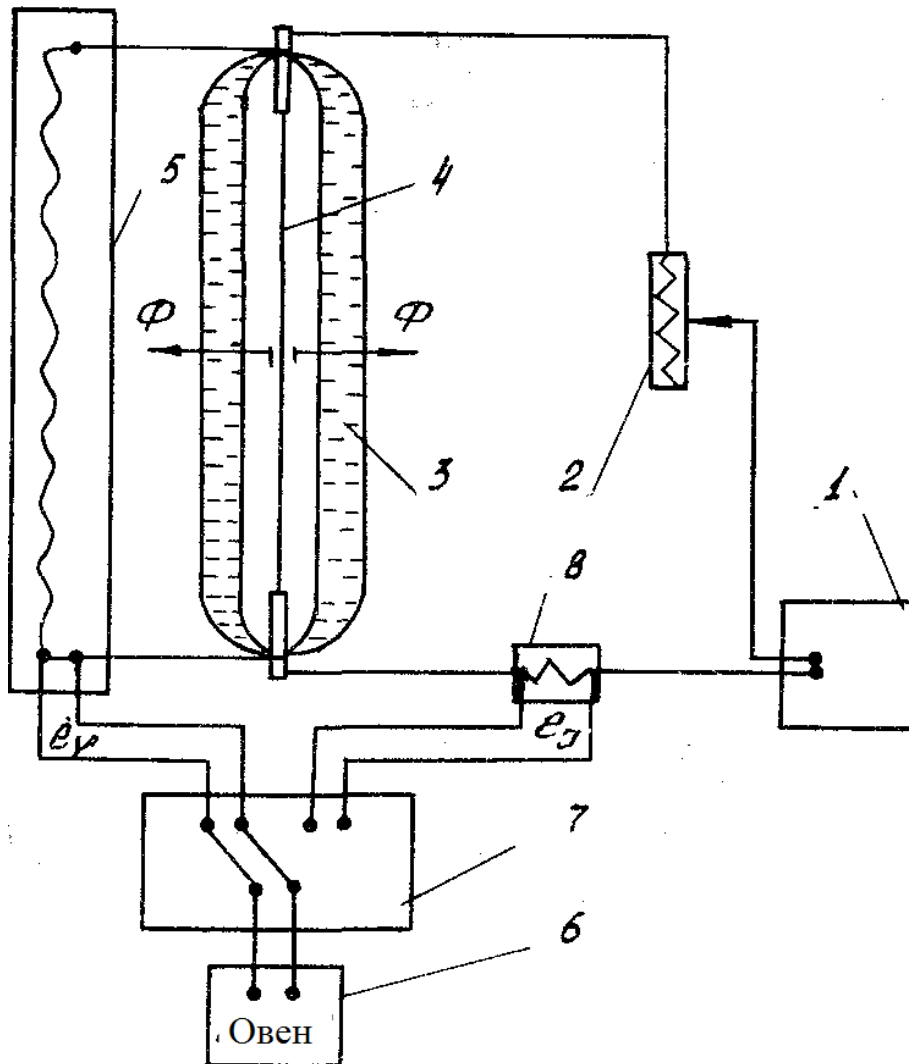


Рисунок 1 - Схема установки: 1 – выпрямитель, 2 – реостат, 3 – охлаждающий контур, 4 – излучающая вольфрамовая нить, 5 – делитель напряжения, 6 – потенциометр, 7 – переключатель, 8 – эталонное сопротивление

Схема установки показана на рисунке 1. В качестве излучателя энергии используется тонкая проволока из вольфрамового сплава длиной l и диаметром d , впаянная в стеклянный сосуд с двойными стенками. Полость стеклянного сосуда вакуумирована до давления 10^{-4} Па, что исключает конвективную передачу тепла от проволоки к стенке сосуда. Это означает, что перенос тепла от проволоки осуществляется только путем излучения Φ через вакуумную полость. В пространство между двойными стенками залита вода, поддерживающая температуру стенок, практически равную температуре окружающей среды.

К исследуемой проволоке подводится постоянный электрический ток от выпрямителя, подаваемая мощность регулируется реостатом. Подводимая электрическая мощность измеряется потенциометром по падению напряжения E на проволоке и току I , проходящему по ней.

Для регистрации падения напряжения и тока применяется потенциометр ОВЕН и набор шунтов. Полученные значения ЭДС на потенциометре необходимо умножить на переводные коэффициенты для определения истинных значений напряжения и тока:

$$V = e_v K_v, \quad (9)$$

$$I = e_i K_i \quad (10)$$

Температура исследуемой проволоки измеряется по ее сопротивлению, которое для определенного проводника имеет однозначную зависимость от температуры. Сопротивление проволоки R (Ом) на каждом тепловом режиме проводимого исследования может быть подсчитано по падению напряжения на ней и силе тока в цепи:

$$R = \frac{V}{I} \quad (11)$$

Температура проволоки T_l , К определяется по эмпирической формуле

$$T = 212R + 300$$

Порядок выполнения работы

Включить установку в электрическую сеть 220 В. Опыты проводятся при нескольких значениях температуры излучателя T_l , для чего с помощью реостата меняется ток, проходящий через излучатель. Первоначально устанавливается питающее напряжение, равное 50...60 В.

После 3-5 мин выдержки наступает стабилизация режима, на что показывает стабильность ЭДС потенциометра, после этого можно проводить измерения. В зависимости от положения переключателя (см. рис.) потенциометром измеряются e_0 или e_I или в милливольтках. На этом измерения на данном режиме заканчиваются.

Затем питающее напряжение увеличивается до 70 В, и после выдержки проводятся те же измерения. Следует провести измерение на 6...7 режимах для напряжений $V = 50, 60, 70, 75, 80, 85, 90$ В.

При выключении установки вначале необходимо вывести в нулевое положение ручку регулирования реостата и обесточить установку.

Обработка результатов эксперимента

1. По выражениям (9)-(11) подсчитываются значения I, V, R для каждого режима.

2. Электрическая мощность, подаваемая на нагрев проволоки, находится по формуле

$$\Phi = IV \quad (12)$$

При установившемся режиме все тепло, выделенное излучателем, полностью передается охлаждающей воде, т.е. в окружающую среду.

3. По рассчитанным значениям R определяется абсолютная температура проволоки T_I , К. Эту операцию определения T_I по R следует выполнить с наибольшей точностью.

4. Температура окружающей среды определяется комнатным термометром.

5. По выражению

$$c_p = \frac{\Phi}{F \left[\left(\frac{T_I}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_H}{100} \right)^4 \right]} \quad (13)$$

определяются расчетные значения коэффициента излучения проволоки при $n=4$.

6. Экспериментальное значение показателя n_3 можно определить графически, откладывая на графике опытные значения Φ, T_I в координатах

$$\lg(\Phi) = f \left\{ \lg \left(\frac{T_1}{100} \right) \right\}.$$

Из уравнения (8) следует, что на графике получится прямая линия, тангенс угла наклона которой равен показателю n_{Φ} . Через точки графика проводится осредняющая прямая. Значение n_{Φ} определяется выражением

$$n_{\Phi} = \frac{\lg(\Phi)_A - \lg(\Phi)_B}{\lg \left(\frac{T_1}{100} \right)_A - \lg \left(\frac{T_1}{100} \right)_B},$$

где A и B - любые две точки, лежащие на осредняющей прямой.

7. Определяется экспериментальное значение коэффициента излучения:

$$c_{\Phi} = \frac{\Phi}{F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^{n_{\Phi}} - \left(\frac{T_H}{100} \right)^{n_{\Phi}} \right]},$$

где F - излучающая поверхность проволоки.

8. Определяются значения приведенной степени черноты поверхности проволоки для обоих случаев:

$$\varepsilon_p = \frac{c_p}{c_0},$$

9. В заключение составляется аналитическое выражение излучательной способности проволоки для обоих случаев по уравнению

$$\varphi = \varepsilon_n c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^n - \left(\frac{T_H}{100} \right)^n \right].$$

Здесь $\varepsilon_n = \varepsilon_p$ или $\varepsilon_n \approx \varepsilon_{\Phi}$.

10. По результатам расчетов строятся графики φ_p и φ_{Φ} , как функции температуры излучателя, в одних осях координат.

Содержание отчёта

1. Принципиальная схема установки.
2. Протокол записи показаний измерительных приборов (таблица).
3. Обработка результатов опыта.
4. Графики зависимости.

Протокол записи измерений

$B =$ _____

Номер опыта	$E_v, мВ$	$E_l, мВ$	$V, В$	$I, А$	$R, Ом$	$T_l, К$	$\Phi, Вт$

$t_H =$ _____ °C

Номер опыта	$\frac{c_p, Вт}{м^2 \cdot К^4}$	$n_{\text{Э}}$	$\frac{c_{\text{Э}}, Вт}{м^2 \cdot К^4}$	ε_p	$\varepsilon_{\text{Э}}$	$\Phi_p, Вт/м^2$	$\Phi_{\text{Э}}, Вт/м^2$

Контрольные вопросы к зачёту

1. Что такое тепловое излучение?
2. Является ли вакуум преградой для передачи тепла излучением?
3. Является ли газовая прослойка преградой для передачи тепла излучением?
4. Что называется результирующим излучением?
5. Для чего выкачивается воздух из полости между излучающей нитью и охлаждающим контуром?
6. Какие тела называются абсолютно черными?
7. Значения температур каких тел T_1 и T_2 подставляются в выражение $\Phi = c \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$?
8. Как определяется в опыте количество тепла Φ , переданное излучением?
9. Какой слой металла по толщине участвует в лучистом теплообмене?
10. Как контролируется в опыте температура излучающей нити?

Учебное издание

Составители: ***Белозерцев Виктор Николаевич***
Бирюк Владимир Васильевич
Довгялло Александр Иванович
Кудрявцева Наталья Александровна

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО КУРСУ ТЕПЛОМАСООБМЕНА**

Методические указания

Редактор Н. С. К у п р и я н о в а
Компьютерная верстка Т. Е. П о л о в н е в а

Подписано в печать 29.04.2008. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 3,5.
Тираж 100 экз. Заказ .

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Для заметок

