

**О.А. БАРТЕНЕВ, В.В. МЕЗРИН, В.К. ЖУКОВ**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА  
И ТЕПЛОТЕХНИКА  
ЧАСТЬ II. ТЕПЛОМАССОБМЕН  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВО «УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА ИМ. М.С. ГУЦЕРИЕВА

Кафедра теплоэнергетики

**О.А. БАРТЕНЕВ, В.В. МЕЗРИН,  
В.К. ЖУКОВ**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА  
И ТЕПЛОТЕХНИКА  
ЧАСТЬ II. ТЕПЛОМАССООБМЕН  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**



Ижевск  
2020

УДК 536:62 (075.8)

ББК 31.311я73

Б262

*Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом УдГУ*

Рецензент: доцент кафедры Бурение УдГУ, к.т.н. Миловзоров В.Г.

Б262 Бартенева О.А., Мезрин В.В., Жуков В.К. Техническая термодинамика и теплотехника. Лабораторный практикум. Часть II. Тепломассообмен. / Под ред. канд. физ.-мат. О.А. Бартенева. – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2020. — 74 с.

В настоящем издании представлены методики проведения лабораторного практикума по процессам теплообмена и теплопередачи посредством механизмов теплопроводности, конвективного теплообмена и теплопередачи тепловым излучением в различных средах и телах. Измерения проводятся на оригинальных лабораторных установках (стендах). Кратко изложены теоретические сведения, описаны методы и приборы для проведения измерений и обработки результатов. В приложениях приведены необходимые для обработки результатов табличные данные.

Настоящее пособие предназначено для практического закрепления обучающимися теоретического материала по дисциплине “Тепломассообмен”, развития навыков и умения практического применения теоретических знаний теплотехники в лабораторных исследованиях, в том числе и по другим теплотехническим дисциплинам, например, в курсе “Вспомогательное и тепломеханическое оборудование ТЭС и АЭС”. Предназначено для студентов направления подготовки “Теплоэнергетика и теплотехника”, а также студентам других специальностей.

УДК 536:62 (075.8)

ББК 31.311я73

© О.А. Бартенева, В.В.Мезрин,  
В.К.Жуков, 2020

© ФГБОУ ВО “Удмуртский государственный университет”, 2020

## В В Е Д Е Н И Е

В настоящем пособии представлены методы экспериментальных исследований процессов теплопередачи посредством теплопроводности, конвективного теплообмена, теплообмена излучением между телами разной температурой, рассмотрены устройство и термодинамические процессы при работе теплообменных аппаратов. В большинстве лабораторных работ изучаются вопросы применения критериальных уравнений теории подобия, на практике проверяются эмпирические формулы, связывающие критериальные безразмерные величины (числа) теплового и гидродинамического подобия, в зависимости от условий процесса теплообмена.

В процессе обработки экспериментальных данных студенты получают навыки работы с экспериментальным оборудованием, таблицами теплофизических характеристик различных материалов, изучают зависимость свойств материалов и характеристик процессов теплообмена от температуры и физических свойств тел и сред, участвующих в теплообмене. Некоторые таблицы приведены в Приложениях.

Отчет по лабораторной работе должен содержать название и цель работы, теплотехническую схему лабораторной установки, таблицы с измеренными и вычисленными величинами, причем для одного из вариантов режима работы вычисления следует подробно показать со всеми формулами и подставленными значениями величин. Также отчет должен содержать необходимые графики, сравнение полученных результатов с табличными данными или формулами, анализ возможного отклонения от теоретических формул, графиков и табличных величин. В заключении необходимо сделать выводы о проделанной работе.

В содержание лабораторных работ включены контрольные вопросы для самоподготовки, задачи, которые нужно уметь решать при подготовке к лабораторному практикуму.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

## Определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов методом трубы

### 1. Цель работы.

Закрепление знаний по теории теплопроводности, изучение методики экспериментального определения коэффициента теплопроводности изоляционных материалов, получение навыков в проведении экспериментов и обработки результатов.

В результате лабораторной работы студент должен усвоить

- физическую природу и механизм процесса теплопроводности, влияние на теплопередачу физических параметров и структуры материала,
- содержание основного закона теплопроводности,
- понятие о коэффициенте теплопроводности и методах его определения,
- уметь составить и рассчитать поставленную в лабораторном практикуме теплотехническую задачу,
- владеть методами обработки результатов эксперимента.

### Задание на лабораторную работу:

1. Найти значение коэффициента теплопроводности исследуемого материала.
2. Определить зависимость коэффициента теплопроводности от температуры.
3. Составить отчет по выполненной лабораторной работе с соответствующими таблицами измеренных и вычисленных данных и построенными графиками,

### 2. Краткие теоретические сведения

Теплопроводность – один из трех способов передачи тепла. При теплопроводности перенос тепла осуществляется путем непосредственной передачи энергии между соседними частицами одного или нескольких контактирующих тел.

Согласно закону теплопроводности (закону Фурье) плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры  $\vec{q} = -\lambda \text{grad } t$ . Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  в этом выражении называется коэффициентом теплопроводности и является физическим параметром вещества и зависит от его состояния, в частности, зависит от его температуры и давления. Для твердых тел коэффициент теплопроводности зависит от типа вещества (металл, диэлектрик), структуры, наличия дефектов и температуры. Значения коэффициентов теплопроводности определяются из опыта и приводятся в справочниках для определенных состояний вещества [1, 3].

В настоящей работе коэффициент теплопроводности определяется методом стационарного теплового потока через цилиндрическую стенку

(трубу) достаточно большой длины. В этом случае влияние торцов трубы будет сведено к минимуму. Метод основан на использовании точных аналитических решений стационарных задач теплопроводности для тел простой геометрической формы ( пластины, цилиндра и шара).

Мощность теплового потока через цилиндрическую стенку длиной  $l$  с внутренним диаметром  $d_1$ , внешним –  $d_2$ , и разности температур внутренней и внешней стенок  $t_2-t_1$  определяется выражением

$$Q = \frac{2\pi\lambda l(t_1-t_2)}{\ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (1)$$

Эту формулу можно использовать для определения коэффициента теплопроводности, если режим теплопередачи будет стационарным, одномерным, а потерями тепла через торцы трубы можно пренебречь.

### 3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальная установка (рис.1) состоит трубы 1, изготовленной из теплоизоляционного материала – капролона, насаженной на металлическую трубку 3. Внутри трубы помещен электрический нагреватель 2. Металлическая трубка, обладающая высокой теплопроводностью, обеспечивает выравнивание температуры по всей длине внутренней поверхности теплоизоляционного материала. Для исключения боковых потерь тепла торцы рабочего участка защищены теплоизоляцией 4. Напряжение на нагревательный элемент подается от блока питания 6 (Б5-7), напряжение и ток контролируются приборами.

Внутренний диаметр теплоизоляционной трубы  $d_1=26\text{мм}$ , внешний –  $d_2=48\text{мм}$ , длина  $l=800\text{мм}$ .

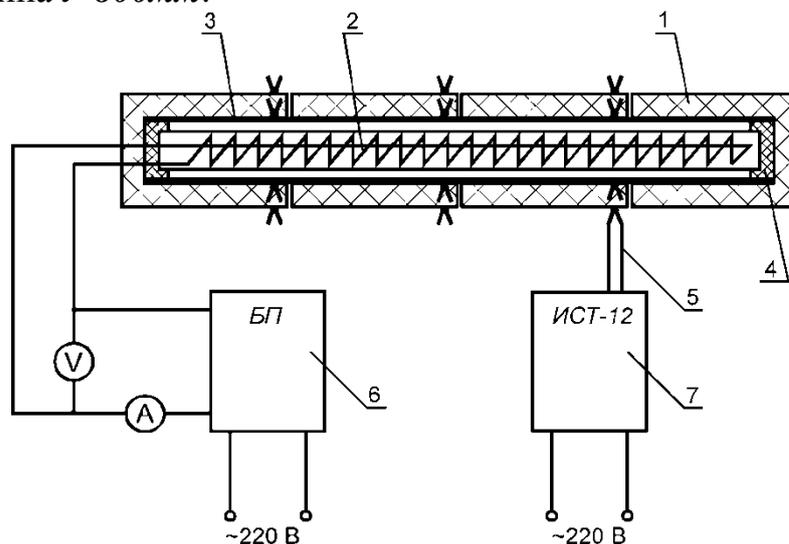


Рис.1. Схема установки. 1 – труба из исследуемого материала, 2 – нагревательный элемент, 3 – металлическая трубка, 4 – изолирующие крышки, 5 – термопары, 6 – источник питания Б5-7, 7 – многоканальный индикатор-сигнализатор температуры ИСТ-12.

Температура внутренней и внешней поверхности капролоновой трубы измеряется шестью парами термопар (рис.2). Термопары подключены

к прибору ИСТ-12 (электронный термометр), показания которого соответствует фактической температуре в измеряемой точке в градусах Цельсия. Переключение термопар производится кнопкой +1 на приборе ИСП-12. Как показано на рисунке, нечетные термопары расположены внутри трубы, четные – снаружи.

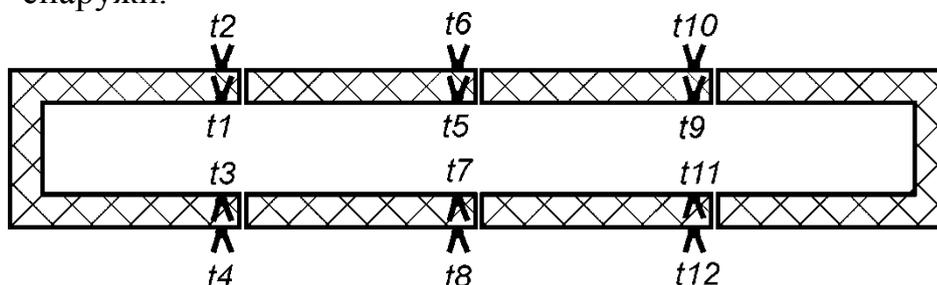


Рис.2. Схема закладки термопар на трубе.

Электропитание нагревателя осуществляется от регулируемого источника постоянного тока Б5-7, напряжение и ток которого измеряются приборами.

#### 4. Порядок выполнения работы.

До начала выполнения опытов следует ознакомиться со стендом и расположенными на нем приборами, подготовить таблицы для записи измеряемых значений и выписать формулы для обработки результатов измерения.

##### 4.1. Проведение эксперимента.

- включить тумблер “сеть”, при этом загорится индикаторная лампа,
- тумблером включить прибор ИСТ-12, на приборе загорится лампа включенного измерительного канала и значение измеряемой температуры,
- включить тумблер “сеть” на лицевой панели блока питания Б5-7,
- установить переключателем прибора ток нагрузки порядка 1А,
- наблюдая за показаниями прибора ИСТ-12, дождаться, когда в системе установится стационарный режим – в стационарном режиме показания термопар не будут изменяться в течении 5 минут (время достижения стационарного режима – порядка 25 минут),
- записать показания приборов в табл.1,
- произвести еще два подобных эксперимента при токах порядка 2А и 3А.

**Внимание:** перед записью показаний приборов убедиться, что имеет место стационарный режим, т.е. температура измеряемых точек остается неизменной в течение нескольких минут (порядка 5 минут).

Таблица 1.

## Результаты измерений

	опыт 1		опыт 2		опыт 3	
	внутри	снаружи	внутри	снаружи	внутри	снаружи
$I, A$						
$U,$						
$t_1, ^\circ C$		-		-		-
$t_2, ^\circ C$	-		-		-	
$t_3, ^\circ C$		-		-		-
$t_4, ^\circ C$	-		-		-	
$t_5, ^\circ C$		-		-		-
$t_6, ^\circ C$	-		-		-	
$t_7, ^\circ C$		-		-		-
$t_8, ^\circ C$	-		-		-	
$t_9, ^\circ C$		-		-		-
$t_{10}, ^\circ C$	-		-		-	
$t_{11}, ^\circ C$		-		-		-
$t_{12}, ^\circ C$	-		-		-	
$t_{вн.ср.}, ^\circ C$		-		-		-
$t_{нар.ср.}, ^\circ C$	-		-		-	
$Q, Вт$						
$\lambda, Вт/м\cdot K$						
$t_{капр.ср.}, ^\circ C$						
$\delta \lambda$						

**4.2.Обработка результатов измерения.**

Для каждого опыта найти среднее значение температуры на внутренней и внешней поверхностях трубы путем усреднения показаний по длине цилиндрической поверхности.

Полный тепловой поток находится по формуле  $Q = I \cdot U$ .

Значение коэффициента теплопроводности находится из основного уравнения теплопроводности (1)

$$\lambda = \frac{Q \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l (t_{вн.ср.} - t_{нар.ср.})} \quad (2)$$

Используя результаты трех опытов построить в масштабе зависимость коэффициента теплопроводности от средней температуры материала. Среднюю температуру материала ( $t_{капр.ср.}$ ) определить как полусумму средних температур внутренней и наружной поверхностей.

Определить относительную погрешность измерения

$$\delta \lambda = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \delta Q + \delta l + \frac{\Delta t_{вн.} + \Delta t_{нар.}}{t_{вн.} - t_{нар.}} + \frac{\delta d_1 + \delta d_2}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (3)$$

Погрешность измерения тока и напряжения, температуры и размеров определяется классом точности используемых приборов.

Сравнить полученные значения коэффициента теплопроводности со справочными данными для капролона (в отчете указать использованный справочник).

## 5. Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Схема установки.
- Таблицы измеренных данных.
- График зависимости  $\lambda(t)$ .
- Выводы.

### Контрольные вопросы.

1. Физическая сущность процесса теплопроводности отличие от остальных способов теплообмена.
2. Напишите и объясните основной закон теплопроводности.
3. Коэффициент теплопроводности и факторы, влияющие на его величину.
4. Что понимается под стационарным процессом?
5. Почему в качестве исследуемой конструкции была принята труба?
6. Как зависит коэффициент теплопроводности от температуры для разного класса веществ?
7. По стальному паропроводу диаметром 49/37мм транспонируется насыщенный водяной пар при давлении 9.8 бар. Требуется рассчитать толщину изоляции паропровода шлаковой ватой так, чтобы потери тепла составляли не более 300 кДж/ч на 1 м трубопровода, а температура наружной поверхности изоляции не превышала 55°C. Температуру на внутренней поверхности трубы принять равной температуре пара. Коэффициент теплопроводности стали 44.5Вт/м·К, шлаковой ваты – 0.07Вт/м·К.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.** **Теплоотдача горизонтальной трубы** **при свободном движении воздуха**

### **1. Цель работы.**

Определение экспериментальным путем на лабораторной установке коэффициента теплоотдачи в условиях свободной конвекции. Изучение методик обработки данных в теплотехнических измерениях с использованием теории подобия и анализа критериальных уравнений.

В результате лабораторной работы студент должен:

- уяснить суть процесса теплообмена между твердыми телами и флюидами (жидкими, газообразными средами);
- усвоить основные понятия: свободное движение жидкости, плотность теплового потока и коэффициент теплоотдачи как мера интенсивности конвективного теплообмена, его зависимость от температурного напора;
- представлять важность использования теории подобия и критериальных уравнений при практическом решении теплотехнических задач;
- уметь выбрать формулу (критериальное уравнение) для расчета критерия Нуссельта и коэффициента теплоотдачи применительно к условиям теплообмена;
- закрепить знания в области измерения температуры посредством термопар;
- владеть методами обработки результатов измерений, оценивать погрешность измерений.

### **Задание на лабораторную работу**

1. Определить значение среднего коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха около горизонтальной трубы и выявить его зависимость от температурного напора.
2. Результаты обработки опытных данных представить в критериальном виде и сравнить с существующей расчетной величиной по прямым измерениям, полученные при этом расхождения сопоставить с расчетной погрешностью эксперимента.
3. На основе проделанной работы составить отчет.

### **2. Краткие теоретические сведения**

Процесс теплообмена между жидкостью и стенкой, которую жидкость (газ) омывает, называется конвективным теплообменом. Различают свободное и вынужденное движение жидкости.

Свободным называется движение жидкости (газ, капельная жидкость), возникающее под воздействием массовых (объемных) сил, в частности, из-за зависимости плотности газа или жидкости от температуры.

Примером свободного движения служит движение жидкости в гравитационном поле вследствие различия плотности жидкости в разных точках пространства.

Если при этом жидкость контактирует с телом, имеющим температуру отличную от температуры жидкости, то движение сопровождается теплообменом между телом и жидкостью – теплоотдачей при свободной конвекции. Характер свободного движения жидкости зависит от многих факторов: геометрии, формы и положения в пространстве стенки, физических свойств жидкости и стенки, температурного напора. Вблизи одной стенки могут наблюдаться и ламинарное и турбулентное движение одновременно в разных местах.

Характерной особенностью рассматриваемого явления является взаимосвязь процессов движения и теплообмена.

Основное уравнение теплопередачи (теплообмена) уравнение Ньютона-Рихмана связывает плотность теплового потока  $q$  и температурный напор  $\Delta t$

$$q = k \cdot \Delta t \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности между плотностью теплового потока и температурным напором при конвективном теплообмене обозначается  $\alpha$  и называется коэффициентом теплоотдачи

$$\alpha = \frac{q_{с.к.}}{\Delta t}, \quad (2)$$

где  $q_{с.к.}$  – плотность теплового потока, связанного с конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>  
 $\Delta t$  – разность температур между стенкой и жидкостью, К.

Если при передаче тепла посредством теплопроводности коэффициент пропорциональности  $\lambda$  является характеристикой вещества (см. лабораторную работу 1), то значение коэффициента теплоотдачи зависит от многих факторов, а не только от свойств контактирующих веществ, и даже для простых случаев предложены различные эмпирические формулы. Таким образом, эта величина не является физическим свойством материала.

В теории подобия коэффициент теплоотдачи входит в выражение для критерия Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (3)$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,

$l$  – характерный определяющий размер, для трубы характерным размером является диаметр  $d$ ,

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности жидкости (газа).

Для теплообмена при свободной конвекции в широком диапазоне инженерных задач критерий Нуссельта связан с критериями Прандля

$Pr_{ж} = \frac{\nu_{ж}}{\alpha_{ж}}$  и Грасгофа  $Gr = \frac{\beta g l^3 \Delta T}{\nu^2}$  критериальным уравнением

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^n \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0.25} \quad (4)$$

В этих формулах

$\nu_{ж}$  – коэффициент кинематической вязкости,

$a_{ж}$  – коэффициент температуропроводности.

$\beta$  – коэффициент объемного расширения, для воздуха можно принять  $\beta = \frac{1}{T}$ , считая воздух идеальным газом.

$g$  – ускорение свободного падения,

индексы “ж” и “с” относятся к жидкости при ее средней температуре пограничного слоя и стенки соответственно.

Значения всех этих величин в зависимости от температуры для большинства применяемых жидкостей и газов протабулированы [1, 4, 5, 6].

Эмпирические коэффициенты  $C$  и  $n$  зависят от произведения  $Gr \cdot Pr$  и расположения поверхности стенки. Так, для горизонтальных труб и плит

при  $Gr \cdot Pr \in (10^{-3}, 10^3)$   $Nu = 1.18(Gr \cdot Pr)^{0.125} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{с}}\right)^{0.25}$  – ламинарный режим

при  $Gr \cdot Pr \in (10^3, 10^8)$   $Nu = 0.54(Gr \cdot Pr)^{0.25} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{с}}\right)^{0.25}$  – переходный режим

при  $Gr \cdot Pr \in (10^7, 10^{13})$   $Nu = 0.135(Gr \cdot Pr)^{0.33} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{с}}\right)^{0.25}$  – турбулентный режим.

при  $Gr \cdot Pr < 10^{-3}$  критерий Нуссельта практически сохраняет постоянное значение  $Nu \approx 0.5$ . В этих условиях процесс теплообмена всецело обусловлен явлениями теплопроводности.

Таким образом, расчет теплоотдачи между твердой стенкой и жидкостью (газом) сводится к определению критерия Нуссельта по формуле (4) и коэффициента теплоотдачи по формуле (3) и вид критериального уравнения зависит от условий эксперимента.

В каждом конкретном случае коэффициент теплоотдачи может быть определен также на основе прямых измерений по формуле (2). Сравнение значений коэффициентов теплоотдачи, полученных в эксперименте, и вычисленных с использованием теории подобия, позволяет судить о применимости того или иного приближения.

### 3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальная установка (рис.1) включает цилиндрическую трубу (1) из нержавеющей стали аустенитного класса, включенную во вторичную цепь понижающего трансформатора (4). Первичная обмотка трансформатора питается от автотрансформатора (3), с помощью которого производится регулирование напряжения и тока нагрузки. Ток нагрузки измеряется амперметром с помощью трансформатора тока УТТ-5 (6). Прохождение по трубе тока сопровождается ее нагревом, равномерным по толщине трубы.

Температура поверхности трубы измеряется в 4 сечениях хромель-копелевыми термопарами, запаянными с внутренней поверхности трубы. Термопары подключены к вольтметру В7-28. Положение ручек и переключателей вольтметра следующее: форма сигнала – постоянный ток, пре-

дел – 0.1, нажата кнопка “фильтр”. Таблица перевода термо-эдс в градусы Цельсия прилагается (Приложение А). Выбор термопар производится переключателем, расположенным на панели стенда.

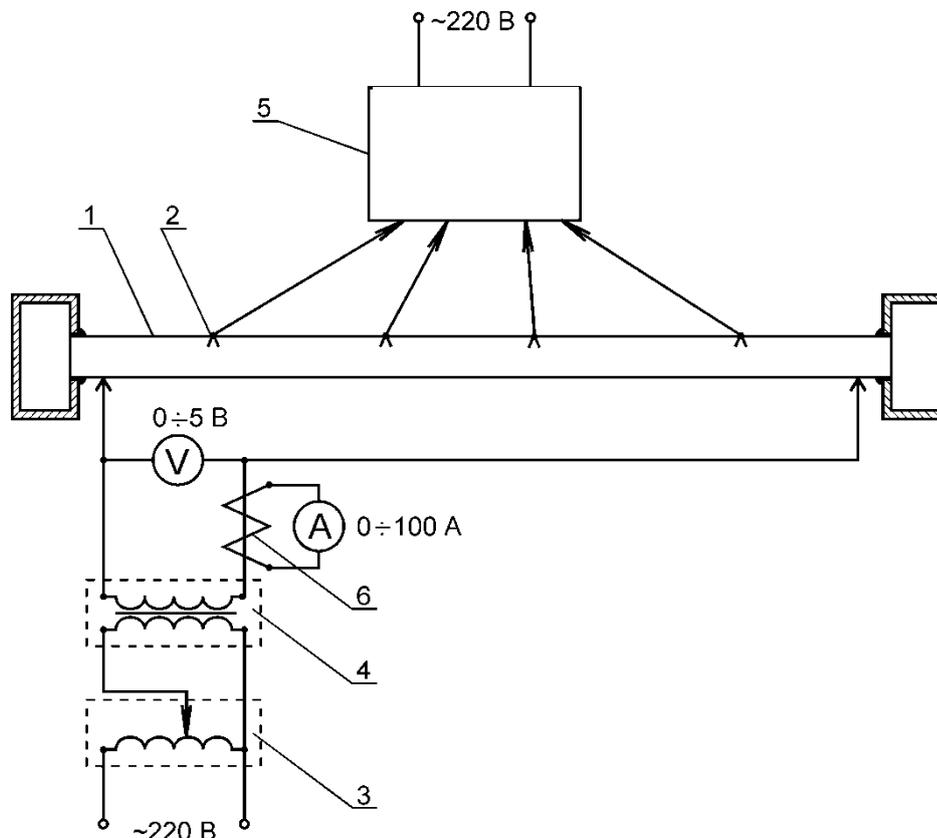


Рис.1. Принципиальная схема установки. 1 – опытная труба; 2 – термо-пары; 3 – ЛАТР; 4 – понижающий трансформатор; 5 – милливольтметр В7-28 для измерения термо-ЭДС; 6 – трансформатор тока УТТ-5

**Обратите внимание**, что с помощью термопар измеряется разность температур между горячим и холодным спаями. Холодный спай имеет температуру окружающей среды, что следует учитывать при определении температуры точек трубы. Схема закладки термопар представлена в табл.1.

Таблица 1.

Расположение термопар в исследуемой трубе.

№ термопары	1	2	3	4
Координата закладки от левого фланца, мм	160	360	530	780

Наружный диаметр трубы  $d=10.0\text{мм}$ , толщина стенки  $\delta=1.0\text{мм}$ , длина  $l=980\text{мм}$ .

#### 4. Порядок выполнения работы.

До начала выполнения опытов следует ознакомиться со стендом и расположенными на нем приборами, подготовить таблицы для записи измеряемых значений и выписать формулы для обработки результатов измерения, записать температуру воздуха в лаборатории  $t_{o.c.}$  по показаниям комнатного термометра и занести в табл.2.

##### 4.1. Проведение эксперимента.

– включить тумблер “220В”, при этом загорится индикаторная лампа.

– включить вольтметр В7-28 и дать прибору прогреться (на приборе установить: форма сигнала – постоянный ток, предел измерения – 0.1В, нажата кнопка “фильтр”).

– включить тумблер “нагрев” и автотрансформатором установить ток порядка 20А.

– переключатель терморпар установить в одно из положений и наблюдать за изменением температуры трубы.

– при достижении теплового равновесия, о чем будет свидетельствовать неизменность показаний прибора (стабилизация температуры устанавливается примерно через 15 мин. после включения соответствующего тока нагрева трубки), произвести измерения и данные занести в таблицу 2.

Таблица 2.

Результаты измерений

№ опыта	ток в образце $I, A$	Температура окружающей среды $t_{o.c.} = t_{ж.} =$							
		Температура трубы							
		$e_1, мВ$	$t_1, °C$	$e_2, мВ$	$t_2, °C$	$e_3, мВ$	$t_3, °C$	$e_4, мВ$	$t_4, °C$
1									
2									
3									
4									

– изменить режим нагрева, установив значение тока порядка 30А и произвести соответствующие измерения.

– повторить измерения при токе 40А.

– после проведения всех измерений снять напряжение с трубы, отключить приборы и стенд.

#### **ВНИМАНИЕ!**

1. При включенной установке во избежание **ожога** и **удара током ЗАПРЕЩАЕТСЯ** прикасаться к токоведущим элементам конструкции.

2. Перед включением установки в сеть ручку “режим нагрева” вывести влево до упора.

## 4.2. Обработка результатов измерения.

Для каждого из опытов найти

– среднее значение температуры трубы  $t_{\text{ср.с.}} = \frac{1}{4} \sum t_i$  и средний температурный напор  $\Delta t = t_{\text{ср.с.}} - t_{\text{ж}} = t_{\text{ср.с.}} - t_{\text{о.с.}}$ .

– плотность теплового потока с поверхности трубы, обусловленную прохождением тока по проводнику  $q_{\text{с.эл.}} = \frac{I^2 R_0}{\pi d l} \cdot \frac{R_t}{R_0}$ . Здесь электрическое сопротивление трубки при 20°C  $R_0 = 2.76 \cdot 10^{-2}$  Ом,  $\frac{R_t}{R_0}$  – поправочный коэффициент изменения сопротивления стальной трубы с температурой  $\frac{R_t}{R_0}$  находится по графику Приложения Б.

– рассчитать плотность теплового потока, связанного с излучением, используя формулу Стефана-Больцмана  $q_{\text{с.и.}} = c_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{ж}}}{100} \right)^4 \right]$ , где приведенный коэффициент излучения поверхности трубки  $c_{\text{пр}} = 2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$  установлен опытным путем.

– плотность теплового потока, связанного только с конвекцией  $q_{\text{с.к}} = q_{\text{с.эл.}} - q_{\text{с.и.}}$ .

– значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{экс.}} = \frac{q_{\text{с.к.}}}{\Delta t}$ .

Результаты расчетов следует свести в таблицу 3. Расчет должен содержать также промежуточные вычисления и ссылки на использованные формулы или выражения.

Таблица 3.

Обработка результатов измерений.

№ опыта	ток $I, A$	$q_{\text{с.эл.}}, \text{Вт/м}^2$	$t_{\text{ср.с.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, K$	$q_{\text{с.и.}}, \text{Вт/м}^2$	$q_{\text{с.к.}}, \text{Вт/м}^2$	$\alpha_{\text{экс.}}, \text{Вт/м}^2\text{K}$

## 4.3. Теоретический расчет коэффициента теплоотдачи на основе использования критериальных уравнений конвективного теплообмена.

Рассчитать для проведенных опытов коэффициент теплоотдачи, используя формулу (3). Для этого выписать из таблиц значения физических параметров воздуха при нормальном давлении и средней температуре пограничного слоя  $t_{\text{ж.ср}} = \frac{1}{2} (t_{\text{ст.}} + t_{\text{ж.}})$ . При определении значений физических величин при заданной температуре с помощью таблицы Приложения В следует воспользоваться принципом линейности (пример вычислений представлен ниже таблицы).

Далее для каждого опыта рассчитать критерий Грасгофа, значение критерия Прандтля можно взять из таблиц. По произведению  $Gr \cdot Pr$  вы-

брать коэффициенты уравнения (3) и рассчитать критерий Нуссельта. Затем, используя формулу (2) определить значение расчетного коэффициента теплоотдачи и сравнить его с экспериментальным, определив относительную погрешность  $\delta\alpha = \frac{|\alpha_{\text{экс.}} - \alpha_{\text{рас.}}|}{\alpha_{\text{экс.}}}$ . Результаты расчета следует свести в таблицу 4.

Таблица 4.

Расчет коэффициента теплоотдачи.

№ опыта	$t_{\text{ср.с}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ж.ср}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, \text{K}$	$\nu, \text{m}^2/\text{c}$	$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{K}$	$Gr$	$Pr_{\text{ж}}$	$Pr_{\text{ст}}$	$Gr \cdot Pr_{\text{ж}}$	$\alpha_{\text{рас.}}, \text{Вт/м}^2\text{K}$	$\delta\alpha$

В одной системе координат построить графики зависимости расчетного и экспериментального коэффициента теплоотвода от температуры воздуха.

**5. Содержание отчета.**

- Название и цель работы.
- Схема установки.
- Таблицы измеренных данных.
- Таблицы расчетных величин.
- График зависимости  $\alpha(t)$  по двум вариантам – прямое измерение и расчет по критериальному уравнению.
- Выводы.

**Контрольные вопросы.**

1. Физическая природа процесса теплоотдачи.
2. Различия свободной и вынужденной конвекции.
3. Физический смысл коэффициента теплоотдачи.
4. Почему значение коэффициента теплоотдачи нельзя найти в справочниках?
5. Сформулируйте теоремы подобия.
6. Что принимается за характерный размер в выражениях для критериев подобия?
7. Какой критерий характеризует процесс теплоотдачи?
8. Методика проведения лабораторной работы.
9. Почему в качестве теплоотдающей поверхности выбрана трубка из нержавеющей стали аустенитного класса?
10. Почему для проведения измерений необходимо, чтобы температура трубы оставалась неизменной в течение нескольких минут?
11. Перечислите источники погрешности при экспериментальном определении коэффициента теплоотдачи.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.**  
**Определение коэффициента теплоотдачи**  
**при свободной конвекции (метод вертикальной струны)**  
**Модельная компьютерная лабораторная работа**

**1. Цель работы.**

Определение экспериментальным путем на лабораторной установке коэффициента теплоотдачи в условиях свободной конвекции. Изучение методик обработки опытных данных с использованием теории подобия и составление критериального уравнения по результатам эксперимента.

В результате лабораторной работы студент должен :

- уяснить суть процесса теплообмена между твердыми телами и флюидами (жидкими, газообразными средами);
- представлять важность использования теории подобия и критериальных уравнений при решении теплотехнических задач;
- уметь выбрать формулу (критериальное уравнение) для расчета критерия Нуссельта и коэффициента теплоотдачи применительно к условиям теплообмена;
- владеть методами обработки результатов измерений.

**2. Краткие теоретические сведения**

Теплообмен между твердым телом и жидкостью (газом) в условиях естественной конвекции осуществляется при местном нагревании или охлаждении среды, находящейся в ограниченном или неограниченном пространстве. При этом никакие внешние силы, помимо силы тяжести, на жидкость не действуют. Этот вид конвективного переноса тепла играет преимущественную роль в процессах отопления помещений и имеет значение в различных областях техники. Например, нагревание комнатного воздуха отопительными приборами, теплообмен поверхностей с окружающей средой, в частности, труб теплотрасс, проложенных на открытом воздухе, солнечных модулей и коллекторов, осуществляется в условиях естественной конвекции или так называемого свободного потока.

Естественная конвекция возникает в неравномерно нагретом газе или жидкости и может влиять на конвективный перенос тепла в вынужденном потоке среды.

Характер свободного движения жидкости (газа) зависит от многих факторов: геометрии, формы и положения в пространстве стенки, физических свойств жидкости и стенки, температурного напора. Вблизи одной стенки могут наблюдаться и ламинарное и турбулентное движение одновременно в разных местах.

К настоящему времени достаточно хорошо изучен естественный конвективный теплообмен для тел простейшей формы (плита, цилиндр,

шар), находящихся в различных средах, заполняющих пространство бóльших размеров по сравнению с размерами самого тела.

Экспериментально коэффициент теплоотдачи может быть определен из основного уравнения теплоотдачи Ньютона-Рихмана

$$\alpha = \frac{q_{с.к.}}{\Delta t}, \quad (1)$$

где  $q_{с.к.}$  – плотность теплового потока, связанного с конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>

$\Delta t$  – разность температур между стенкой и жидкостью (температурный напор), К.

Если при передаче тепла посредством теплопроводности коэффициент пропорциональности  $\lambda$  является характеристикой вещества (см. лабораторную работу 1), то значение коэффициента теплоотдачи зависит от многих факторов и даже для простых случаев предложены различные эмпирические формулы.

В теории подобия коэффициент теплоотдачи входит в выражение для критерия Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (2)$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,

$l$  – характерный определяющий размер, для трубы характерным размером является диаметр  $d$ , в нашем эксперименте – внешний диаметр,

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности жидкости (газа).

Для теплообмена при свободной конвекции в широком диапазоне инженерных задач критерий Нуссельта связан с критериями Прандтля  $Pr_{ж} = \frac{\nu_{ж}}{a_{ж}}$  и Грасгофа

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

критериальным уравнением

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^n \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0.25} \quad (4)$$

В этих формулах

$\nu_{ж}$  – коэффициент кинематической вязкости,

$a_{ж}$  – коэффициент температуропроводности.

$\beta$  – коэффициент объемного расширения, для воздуха, считая его идеальным газом. можно принять

$$\beta = \frac{1}{T}, \quad (5)$$

$g$  – ускорение свободного падения,

индексы “ж” и “с” относятся к жидкости при ее средней температуре пограничного слоя и стенки соответственно.

Значения всех этих величин в зависимости от температуры для большинства применяемых жидкостей и газов протабулированы [1,2].

Эмпирические коэффициенты  $C$  и  $n$  зависят от произведения  $Gr \cdot Pr$  и расположения поверхности стенки.

Таким образом, расчет теплоотдачи между твердой стенкой и жидкостью (газом) сводится к определению критерия Нуссельта по формуле (4) и коэффициента теплоотдачи из формулы (2).

Теплообмен при свободной конвекции для горизонтальных труб изучается в лабораторной работе 2, настоящая работа посвящена теплообмену вертикально расположенной струны с окружающим воздухом.

Существенное различие процесса конвективного теплообмена от вертикальной и горизонтальной стенок состоит в следующем: на горизонтальной нагретой поверхности открытой сверху имеются нисходящие и восходящие потоки жидкости, характер свободного движения жидкости около вертикальной нагретой поверхности показан на рис.1. На нижнем участке трубы при малых температурных напорах наблюдается ламинарное течение воздуха, с повышением температурного напора движение принимает своеобразную “локонообразную” форму и затем эта переходная форма сменяется вполне развитым турбулентным движением, которое сохраняется уже на всем протяжении трубы. В соответствии с изменением режима движения изменяется и коэффициент теплоотдачи: на нижнем участке по мере увеличения толщины ламинарной пленки  $\alpha$  уменьшается с высотой, затем по мере турбулизации пограничного слоя  $\alpha$  возрастает и стабилизируется на участке развитого турбулентного движения.

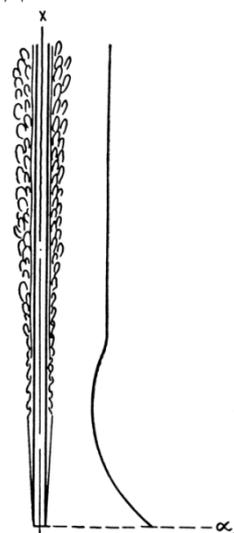


Рис.1. Характер течения среды и изменение коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции у вертикального цилиндра большой высоты.

Академиком М. А. Михеевым и И. М. Михеевой, на основании обобщения результатов экспериментального исследования, рекомендуются следующие формулы для расчета средних критериев теплообмена тел в свободном потоке.

Для вертикальных труб в диапазоне изменения  $Gr \cdot Pr$  от  $10^3$  до  $10^9$ , что отвечает ламинарному течению среднее значение критерия Нуссельта

$$\overline{Nu} = 0,5(Gr_{ж}Pr_{ж})^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,25} \quad (6)$$

и при турбулентном движении ( $Gr_{ж}Pr_{ж} > 10^9$ )

$$\overline{Nu} = 0,15(Gr_{ж}Pr_{ж})^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,25} \quad (7)$$

Этот режим отличается интересной особенностью в том отношении, что коэффициент теплоотдачи не зависит от определяющего геометрического размера тела. Действительно, подставим в формулу (7) выражения для критериев:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = 0,15 \left( \frac{\beta g d^3 \Delta T}{\nu^2} \cdot \frac{\nu_{ж}}{a_{ж}} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}$$

и отсюда  $\alpha = 0,15 \lambda \left( \frac{\beta g \Delta T}{\nu^2} \cdot \frac{\nu_{ж}}{a_{ж}} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}$ .

Для газов отношение  $\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}$  мало зависит от температуры и его можно принять за 1.

В области значений  $(Gr_{ж} \cdot Pr_{ж}) < 10^{-3}$ , для очень вязких сред. критерий конвективного теплообмена практически сохраняет постоянное значение[4]

$$Nu \approx 0,5 \tag{8}$$

Эти предельные наименьшие значения критерия  $Nu$  отвечают *неподвижному пограничному слою*, когда теплоотдачу можно вычислить непосредственно по формулам теплопроводности.

Между этим предельным состоянием полностью заторможенной среды в пограничном слое и рассмотренным выше режимом свободной конвекции, при которой в пограничном слое осуществляется течение среды с равноправным участием инерционных сил и сил внутреннего вязкостного трения, существует режим свободной конвекции с ползущим течением в пограничном слое. Для этого режима силами инерции можно пренебречь и решить задачу конвективного теплообмена в виде зависимости:

$$\overline{Nu} = C (Gr_{ж} Pr_{ж})^n \tag{9}$$

В уравнении (9) определяющим размером является диаметр проволоки  $d$ , а определяющей температурой – температура потока  $t_{ж}$ . Данная формула справедлива для потока воздуха, у которого критерий  $Pr \approx 0,7$  и практически не зависит от температуры.

Численные значения коэффициента  $C$  и показателя степени  $n$  в этой формуле можно принять по таблице 1.

Таблица 1.

Значения коэффициентов в формуле (9)

Характер или режим теплообмена	$Gr_{ж} \cdot Pr_{ж}$	$C$	$n$
псевдотеплопроводность	$1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
ламинарный	$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
переходный и турбулентный	$> 2 \cdot 10^7$	0,135	0,33

### 3. Описание лабораторного оборудования.

В экспериментальной лабораторной установке (рис.2) теплоотдающей стенкой является нихромовая проволока 3(струна) длиной 1540 мм и

диаметром 0,5 мм, по которой пропускается электрический ток напряжением до 30 в. Таким образом, размеры струны определяют теплоотдающую поверхность  $F = 2,419 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ . Струна удерживается в вертикальном положении стойкой 1 с двумя кронштейнами. В верхнем кронштейне 2, изолированном от массы установки, неподвижно закреплен один конец струны. Другой конец струны зажат в головке индикатора часового типа 5. Головка

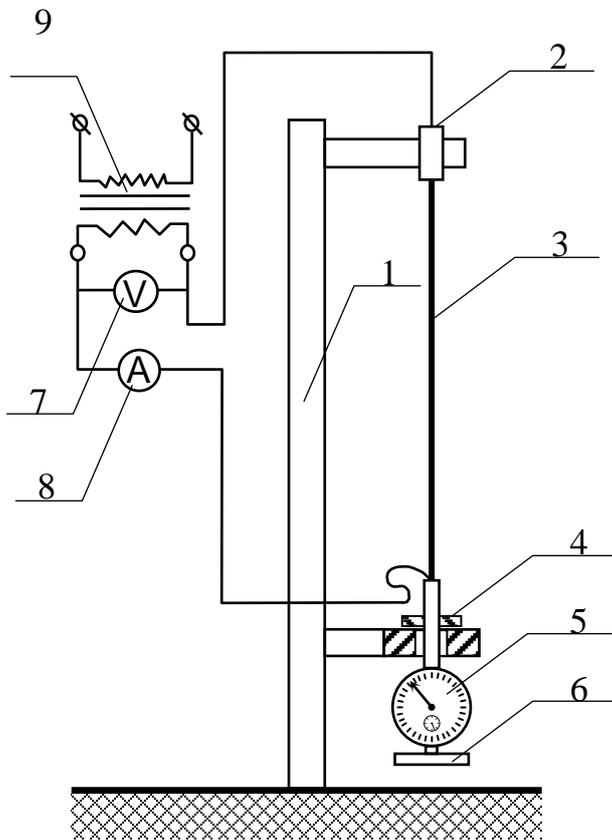


Рис. 2 Схема лабораторной установки

индикатора свободно перемещается в изоляторе-держателе 4 нижнего кронштейна. Груз 6 обеспечивает постоянное по величине натяжение струны. Напряжение от сети 220В подводится через автотрансформатор к держателю 2 и головке индикатора 5. Для определения мощности теплового потока служат вольтметр 7 и амперметр 8.

При подаче напряжения, по струне протекает ток и в ней выделяется тепло мощностью

$$Q_{\text{э}} = I \cdot U, \text{ Вт} \quad (10)$$

В результате нагрева на величину  $\Delta t_m$  струна удлиняется на величину  $\Delta l$ . Разность температур струны и окружающей среды (температурный

напор) можно определить по эмпирической формуле, учитывающей зависимость коэффициента линейного расширения нихрома от температуры и исходную длину струны

$$\Delta t_m = 0,2736 + 42,603\Delta l + 0,2723\Delta l^2, \text{ }^\circ\text{C}, \quad (11)$$

здесь удлинение струны подставляется в мм.

Выделяющееся в струне тепло передается в окружающую среду излучением и конвекцией. При наступлении теплового баланса

$$Q_{\text{э}} = Q_{\text{и}} + Q_{\text{к}}. \quad (12)$$

Мощность теплового потока через поверхность струны в окружающую среду за счет теплового излучения определяется по закону Стефана-Больцмана:

$$Q_{\text{и}} = \varepsilon c_0 F \left[ \left( \frac{t_{\text{ст}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

где  $c_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $\varepsilon = 0,64 \dots 0,76$  – степень черноты нихромовой проволоки,  $F = 2,419 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  – теплоотдающая поверхность струны.

Таким образом, с учетом числовых значений постоянных, мощность

теплового потока излучением

$$Q_{\text{и}} = 9,63 \cdot 10^{-3} \left[ \left( \frac{t_{\text{ст}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт.} \quad (13)$$

#### 4. Порядок выполнения работы.

Лабораторная работа проводится на компьютере. Показания измерительных приборов выведены на табло.

Исходное состояние воздуха окружающей среды задается программой случайным образом. Режим нагрева струны задается кнопками мыши.

До начала выполнения опытов следует ознакомиться со стендом и расположенными на нем приборами, подготовить таблицы для записи измеряемых значений и выписать формулы для обработки результатов измерения.

##### 4.1. Проведение эксперимента.

Для включения стенда выбрать опцию “выполнение работы”. При этом установится некоторое состояние окружающей среды.

Включить питание трансформатора и выставить некоторое значение напряжения (тока).

Подождать некоторое время, пока в системе не установится стационарный режим, и записать показания приборов в табл. 2.

Показания приборов можно перенести в таблицу с помощью курсора, наведя изображение курсора в виде ручки на значение измеряемой величины.

Изменить режим нагрева струны посредством изменения напряжения и произвести повторные измерения. Для изменения исходного состояния воздуха следует выбрать опцию “новый опыт”.

Таблица 2.

Результаты измерений.

№ п/п	измеряемая величина	обозначение	ед. измерения	Номер опыта					
				1	2	3	4	5	6
1	температура окружающей среды	$t_{\text{окр}}$	$^{\circ}\text{C}$						
2	показания барометра	$B$	$\text{мбар}$						
3	напряжение	$U$	$\text{В}$						
4	сила тока	$I$	$\text{А}$						
5	удлинение струны	$\Delta l$	$\text{мм}$						

После окончания измерений таблицу с результатами измерений следует показать преподавателю и, если потребуется произвести повторные измерения, выйти из программы и отключить компьютер.

##### 4.2. Обработка результатов измерения.

###### 4.2.1. Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи.

Для каждого из опытов найти

– температурный напор  $\Delta t_m$ , формула (11).

- среднюю температуру струны  $t_{ст} = t_{окр} + \Delta t_m$
- количество тепла, выделяемого электрическим током, формула (10)
- количество тепла, отданного излучением, формула (13)
- количество тепла, отданного конвекцией  $Q_k = Q_э - Q_и$
- значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha = \frac{Q_k}{F \cdot \Delta t_m}$ .

Результаты расчетов следует свести в таблицу 3 (строки 1 – 6).

Таблица 3

Расчет коэффициента теплоотдачи и коэффициентов формулы (9)

№ п/п	измеряемая величина	обозначение	ед. измерения	Номер опыта					
				1	2	3	4	5	6
1	температурный напор	$\Delta t_m$	$^{\circ}C$						
2	средняя температура струны	$t_{ст}$	$^{\circ}C$						
3	количество тепла, выделенное электрическим током	$Q_э$	$Bm$						
4	количество тепла, отданного излучением	$Q_и$	$Bm$						
5	количество тепла, отданного конвекцией	$Q_k$	$Bm$						
6	коэффициент теплоотдачи	$\alpha$	$Bm/m^2 \cdot K$						
7	средняя температура пограничного слоя	$t_ж$	$^{\circ}C$						
8	коэффициент теплопроводности	$\lambda$	$Bm/m \cdot K$						
9	коэффициент кинематической вязкости	$\nu_ж$	$m^2/c$						
10	критерий Прандтля	$Pr$							
11	коэффициент объемного расширения воздуха	$\beta$	$K^{-1}$						
12	критерий Нуссельта	$Nu$							
13	критерий Грасгофа	$Gr$							
14	произведение	$GrPr$							
15	y	$lnNu$							
16	x	$ln(Gr \cdot Pr)$							

4.2.2. Определение коэффициентов уравнения (9) и сравнение их со значениями, предложенными в Табл. 1.

Логарифмируя уравнение (9) получим уравнение прямой вида  $y=kx+b$ , где  $y=lnNu$ ,  $x=ln(Gr \cdot Pr)$ ,  $k=n$ ,  $b=lnC$ . Для построения прямой следует для каждого опыта:

- рассчитать среднюю температуру воздуха пограничного слоя

$$t_ж = \frac{1}{2} (t_{окр} + t_{ст})$$

- для этой температуры выписать из справочной литературы физические параметры сухого воздуха (см. также Приложение В), а именно: коэффициент теплопроводности  $\lambda$ ,
- коэффициент кинематической вязкости  $\nu_{ж}$ ,
- критерий Прандтля  $Pr$ ,
- коэффициент объемного расширения воздуха  $\beta$  рассчитать по формуле (5)
- используя вычисленное значение коэффициента теплоотдачи, рассчитать критерий Нуссельта, формула (2)
- определить значение критерия Грасгофа, формула (3), и произведение  $Gr_{ж}Pr_{ж}$
- рассчитать логарифмы  $\ln Nu$  и  $\ln(Gr \cdot Pr)$
- нанести в координатах  $x - y$  рассчитанные точки и построить по ним прямую, написать уравнение прямой  $y=kx+b$  и определить коэффициенты уравнения (9)  $n=k, C=e^b$ . Полученные значения сравнить со значениями Табл.1.

### 5. Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Схема установки.
- Таблицы измеренных данных.
- Таблицы вычисленных величин.
- График зависимости  $\ln Nu=f(\ln(Gr \cdot Pr))$  и уравнение прямой.
- Экспериментально определенные коэффициенты уравнения (9) и сравнение их значений, предложенных в табл.1.
- Выводы.

### Контрольные вопросы.

1. Сформулируйте цель работы и поясните, как она достигается.
2. Физическая природа процесса теплоотдачи.
3. Различия свободной и вынужденной конвекции.
4. Физический смысл коэффициента теплоотдачи.
5. Почему значение коэффициента теплоотдачи не указывается в справочниках?
6. Что такое критерий подобия?
7. Что принимается за характерный размер в выражениях для критериев подобия?
8. Какой критерий характеризует процесс теплоотдачи?
9. Назовите основные узлы экспериментальной установки и укажите их назначение.
10. Перечислите источники погрешности при экспериментальном определении коэффициента теплоотдачи.
11. Как на практике определяется коэффициент теплоотдачи при решении конкретных задач?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.**

### **Местная теплоотдача при турбулентном движении воздуха в трубе**

#### **1. Цель работы.**

Определение экспериментальным путем на лабораторной установке коэффициента теплоотдачи в условиях вынужденной конвекции при движении воздуха внутри трубы. Изучение методик обработки данных с использованием теории подобия и определение коэффициентов критериального уравнения [2, 3, 4].

В результате лабораторной работы студент должен

– уяснить суть процесса теплообмена при вынужденном движении газа внутри трубы, его особенностях, отражающиеся в том числе на выборе критериального уравнения;

– представлять значение применения теории подобия и методов построения критериальных уравнений при решении теплотехнических задач и определения входящих в них коэффициентов и безразмерных параметров сред, участвующих в теплообмене или теплоперелаче;

– уметь выбрать формулу для расчета критерия Нуссельта и коэффициента теплоотдачи применительно к условиям теплообмена;

– овладеть методами обработки результатов измерений.

#### **Задание по лабораторной работе**

1. Провести измерения и рассчитать местные и средний коэффициенты теплоотдачи нагреваемой током горизонтальной трубы с движущейся в ней воздухом.

2. Найти входящие в критериальное уравнение коэффициенты и построить в логарифмическом масштабе критериальное уравнение описывающее данный теплообмен.

3. Оформить отчет с требуемыми таблицами и графиками.

#### **2. Краткие теоретические сведения**

Процесс теплообмена между жидкостью и стенкой, которую жидкость омывает, называется конвективным теплообменом. Различают свободное и вынужденное движение жидкости. Примером вынужденного движения служит движение жидкости под воздействием внешних сил в различных теплообменных аппаратах, когда жидкость имеет на входе одну температуру  $t_1$ , обтекает нагретые (холодные) поверхности и нагревается (охлаждается) до температуры  $t_2$ .

Интенсивность теплообмена между стенкой и жидкостью характеризуется коэффициентом теплоотдачи [1]

$$\alpha = \frac{q_{с.к.}}{\Delta t}, \quad (1)$$

где  $q_{с.к.}$  – плотность теплового потока, связанного с конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>

$\Delta t$  – разность температур между стенкой и жидкостью, К.

Характер теплообмена между твердым телом (стенкой) и жидкостью (газом) зависит от многих факторов, в частности, от скорости движения жидкости, размеров и формы контактных поверхностей, температурного напора, физических свойств жидкости.

Поскольку коэффициент теплоотдачи не является физическим параметром материала и для каждого конкретного случая имеет свое значение, которое можно определить экспериментально, для расчета коэффициента теплоотдачи применяются соотношения теории подобия.

В теории подобия коэффициент теплоотдачи входит в выражение для критерия Нуссельта [4]

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (2)$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,

$l$  – характерный размер, для трубы характерным размером является диаметр  $d$ ,

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности жидкости.

Предложено несколько формул, связывающих критерий Нуссельта с другими критериальными величинами в зависимости от расположения и формы стенок, характера течения жидкости и свойств самой жидкости.

Так, при движении жидкости в прямых гладких достаточно длинных трубах предложены следующие формулы [4]:

при ламинарном течении  $Nu = 0,15Re^{0.33}Pr^{0.43}Gr^{0.1} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0.25}$

при турбулентном течении  $Nu = 0,021Re^{0.8}Pr^{0.43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0.25} \quad (3)$

для воздуха, если принять критерий Прандтля  $Pr \approx 0.7$ , а последний множитель  $\approx 1$ , последняя формула принимает вид

$$Nu = 0.018Re^{0.8} \quad (3')$$

При вычислении числа Рейнольдса  $Re = \frac{wd}{\nu}$  значение кинематической вязкости берется при средней температуре пограничного слоя, а в качестве характерного размера принимается внутренний диаметр трубы.

Целью настоящей лабораторной работы является также проверка возможности использования формулы (3) при турбулентном движении жидкости в прямых трубах.

### 3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальная установка (рис. 1) включает тонкостенную трубу (1) из нержавеющей стали аустенитного класса, к которой подводится переменное напряжение вторичной обмотки понижающего трансформатора (5). Первичная обмотка трансформатора подключена к автотрансформатору (6), с помощью которого производится регулирование напряжения и тока нагрузки. Ток нагрузки измеряется амперметром с помощью трансформатора тока УТТ-5 (6). Прохождение по трубе тока сопровождается ее нагревом, равномерным по сечению и длине трубы.

Длина трубы  $l_0=578$  мм, внутренний диаметр  $d=8,5$  мм, электрическое сопротивление при  $20^\circ\text{C}$   $R_0=0,022$  Ом.

Вентилятором (4) через входную камеру (2) в трубу подается воздух комнатной температуры. Расход воздуха в трубе можно регулировать, изменяя режимы работы вентилятора, подключенного к регулируемому источнику постоянного тока (10). Воздух, проходя через трубу, нагревается, а температура трубы становится неравномерной по длине. Из трубы воздух попадает в выходную камеру, откуда выводится в атмосферу.

Температура воздуха и точек трубы измеряется хромель-копелевыми термопарами, показания которых (в градусах Цельсия) выводятся на цифровой многоканальный индикатор ИСТ-12 (8). Переключение каналов измерения производится вручную кнопкой “+1” на индикаторе или автоматически при нажатой кнопке “уст.”.

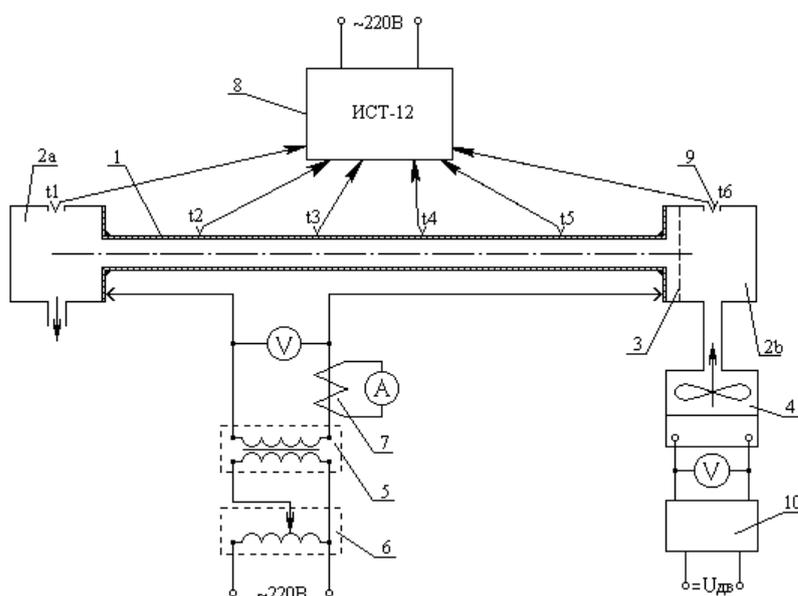


Рис.1. Принципиальная схема установки.

В позиции 1 подключена термопара, измеряющая температуру воздуха на входе  $t_1=t_{вх}$ , в позиции 11 – термопара, измеряющая температуру воздуха на выходе  $t_{11}=t_{вых}$ , к остальным позициям подключены термопары, измеряющие температуру трубы. Координаты закладки термопар по длине трубы показаны в табл. 1.

Таблица 1.

Координаты закладки термопар по длине трубы.

термопара	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{11}$
координата, мм	0	25	70	140	195	252	347	407	483	550	578

#### 4. Порядок выполнения работы.

До начала выполнения опытов следует ознакомиться со стендом и расположенными на нем приборами, подготовить таблицы для записи из-

меряемых значений и выписать формулы для обработки результатов измерения, записать температуру воздуха в лаборатории  $t_{о.с.}$ .

Проверить, что ручка ЛАТР “режим нагрева” находится в крайнем левом положении.

#### 4.1. Проведение эксперимента

– включить тумблер “сеть 220В”, при этом загорится индикаторная лампа.

– включить тумблер “вентилятор”, одновременно с сигнальной лампочкой происходит включение прибора ИСТ-12. Включить источник питания вентилятора и переключателем, расположенным в верхнем правом углу стенда, установить один из режимов его работы.

– включить тумблеры “ЛАТР” и “нагрев” и автотрансформатором установить ток порядка 25А.

– переключатель термопар установить в одно из положений в середине трубы и наблюдать за изменением температуры в выбранной точке трубы.

– при достижении теплового равновесия, о чем будет свидетельствовать неизменность показаний прибора в течение порядка 5 минут (время стабилизации температурного режима порядка 15 минут), произвести измерения и данные занести в таблицу 2.

Таблица 2.

Протокол измерений

номер опыта		1	2	3
ток в трубе $I, A$				
Температура, °С	$t_1$			
	$t_2$			
	$t_3$			
	$t_4$			
	$t_5$			
	$t_6$			
	$t_7$			
	$t_8$			
	$t_9$			
	$t_{10}$			
	$t_{11}$			

**Внимание:** перед записью показаний приборов убедиться, что установился стационарный режим (время выдержки порядка 15 минут).

– изменить режим нагрева, установив значение тока порядка 30А, а затем 40А и произвести соответствующие измерения.

– после проведения всех измерений снять напряжение с трубы, отключить приборы и стенд.

## ВНИМАНИЕ!

1. При включенной установке во избежание ожога и удара током **ЗАПРЕЩАЕТСЯ** прикасаться к токоведущим элементам конструкции.
2. Перед включением установки в сеть ручку “режим нагрева” вывести влево до упора.

### 4.2. Обработка результатов измерения.

#### 4.2.1. Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи.

Для каждого из опытов следует вычислить коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции

$$\alpha = \frac{q_c}{\Delta t} \quad (4)$$

здесь  $q_c$  – местная плотность теплового потока,

$\Delta t = t_c - t_{ж}$  – местный температурный напор – разность температуры стенки и жидкости (воздуха) в данном сечении.

В настоящей работе можно приближенно считать, что местная плотность теплового потока равна средней

$$q_c = \frac{Q}{\pi d l_0}, \quad (5)$$

где тепловой поток от внутренней поверхности трубы к нагреваемому воздуху  $Q = W - Q_{ном}$  равен разности электрической мощности  $W = I^2 R = I^2 R_0 \frac{R_t}{R_0}$  и потерь тепла в атмосферу, связанные с излучением и свободной конвекцией. При вычислении электрической мощности следует учесть изменение сопротивления стали с температурой, поправочный коэффициент  $\frac{R_t}{R_0}$  определяется по графику Приложения Б для средней температуры трубы. Потери тепла в атмосферу пропорциональны температурному напору

$$Q_{пот} = A(\bar{t}_c - t_{ат}), \quad (6)$$

где  $t_{ат}$  – температура воздуха в лаборатории (может отличаться от температуры воздуха на входе в трубу),  $A = 0.08$  Вт/К – опытный коэффициент.

Для определения средней температуры стенки  $\bar{t}_c$  следует по показаниям термопар  $t_2 - t_{10}$  построить график распределения температуры трубы по ее длине  $t_c(x)$ , на графике выделить линейный участок и принять значение температуры трубы на середине линейного участка как среднее  $\bar{t}_c = t_{ср}$ .<sup>1</sup> Выбрав эту точку в качестве расчетной, определить координату середины линейного участка  $x_p$ . Для дальнейших расчетов на графике отметить координаты начала  $x_n$  и конца  $x_k$  линейного участка, определить его длину  $l = x_k - x_n$  и температуру трубы в начале  $t_{сн}$  и конце  $t_{ск}$  выбранного участка.

---

<sup>1</sup> На начальном и конечном участках трубы возможно влияние торцов и зависимость  $t_c(x)$  может быть нелинейной.

Таблица 3.

## Расчет коэффициента теплоотдачи.

Номер опыта	1	2	3
ток $I, A$			
координата расчетной точки $x_p, м$			
температура стенки $t_{cp}, °C$			
температура воздуха $t_{жр}, °C$			
температурный напор $\Delta t_p, K$			
электрическая мощность $W, Вт$			
потери мощности $Q_{пот}, Вт$			
плотность теплового потока $q_c, Вт/м^2$			
коэффициент теплоотдачи $\alpha, Вт/м^2 \cdot K$			
координата начала линейного участка $x_n, м$			
координата конца линейного участка $x_k, м$			
длина линейного участка $l = x_k - x_n, м$			
температура станки в начале участка $t_{cn}, °C$			
температура стенки в конце участка $t_{ck}, °C$			

Для расчетной точки с координатой  $x_p$  и температурой стенки  $t_{cp}$  вычислить коэффициент теплоотдачи по формуле (4) значение температуры воздуха в расчетном сечении определим из условия, что температура воздуха по длине трубы изменяется линейно

$$t_{жр} = t_1 + (t_{11} - t_1) \cdot \frac{x_p}{l_0} \quad (7)$$

Результаты расчета следует свести в таблицу 3.

#### 4.2.2. Проверка практической формулы для определения $\alpha$ .

В настоящем разделе следует проверить возможность применения формулы (3') для расчета критерия Нуссельта для прямых гладких труб при установившемся движении жидкости. Если представить формулу (3') в виде

$$Nu = C \cdot Re^n, \quad (8)$$

то задача сводится к определению коэффициентов  $C$  и  $n$  по результатам нашего эксперимента – табл. 4.

Таблица 4.

## Расчет коэффициентов уравнения (8)

номер опыта	1	2	3
температура пограничного слоя $t_b, °C$			
коэффициент кинематической вязкости $\nu, м^2/с$			
коэффициент теплопроводности $\lambda, Вт/м \cdot K$			
скорость воздуха $w, м/с$			
Критерий Рейнольдса $Re$			
Критерий Нуссельта $Nu$			
$\ln Re$			
$\ln Nu$			

Прологарифмировав выражение (8), получим

$$\ln Nu = \ln C + n \cdot \ln Re \quad (9)$$

линейную зависимость между логарифмами критериев Рейнольдса и Нуссельта. Построив график этого выражения по результатам трех опытов, легко определить коэффициенты и сравнить их со значениями в формуле (3').

Для вычисления критерия Рейнольдса  $Re = \frac{wd}{\nu}$  необходимо определить скорость движения воздуха в трубе. Так как воздух можно считать идеальным газом, среднюю скорость течения воздуха на расчетном участке рассчитаем по формуле

$$w = \frac{4G}{\rho \pi d^2} = \frac{4Q}{\rho \pi d^2 c_p (t_{\text{ск}} - t_{\text{сн}})} \cdot \frac{l}{l_0} \quad (10)$$

Физические параметры воздуха (Приложение В) для каждого опыта взять при средней температуры пограничного слоя  $t_B = \frac{1}{2}(t_{\text{ср}} + t_{\text{жр}})$  расчетной точки.

По трем точкам значений логарифмов следует построить прямую  $\ln Nu = f(\ln Re)$ , или  $y = ax + b$ , определить коэффициенты уравнения прямой  $a$  и  $b$  и значения коэффициентов уравнения (8). Сравнить полученные значения со значениями формулы (3').

### 5. Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Схема установки.
- Таблицы измеренных данных.
- Таблицы расчетных величин.
- Графики изменения температуры трубы по ее длине  $t_c(l)$ .
- Значения коэффициента теплоотдачи и график зависимости  $\alpha(w)$
- Прямая (9), построенная по табл.4 и вычисление коэффициентов уравнения (8).
- Выводы.

### Контрольные вопросы.

1. Физическая природа процесса теплоотдачи.
2. Различия свободной и вынужденной конвекции.
3. Физический смысл коэффициента теплоотдачи.
4. Почему значение коэффициента теплоотдачи нельзя найти в справочниках?
5. Сформулируйте теоремы подобия.
6. Что принимается за характерный размер в выражениях для критериев подобия?
7. Какой критерий характеризует процесс теплоотдачи?
8. Методика проведения лабораторной работы.

9. Почему в эксперименте в качестве теплоотдающей поверхности выбрана трубка из нержавеющей стали аустенитного класса?
10. Почему для проведения измерений необходимо, чтобы температура трубы оставалась неизменной в течение нескольких минут?
11. Перечислите источники погрешности при экспериментальном определении коэффициента теплоотдачи.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Нестационарная теплопроводность

### 1. Цель работы.

Целью настоящей работы является углубление знаний по теории нестационарной теплопроводности, а также освоение одного из методов экспериментального определения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности.

### Задание по выполнению лабораторной работы

1. Экспериментальное определение темпа нестационарной теплопроводности и коэффициентов теплопроводности и температуропроводности изучаемого материала (речной песок).
2. Провести сравнение измеренных физических параметров с табличными данными.
3. Построить требуемые графики и таблицы.
4. Составить отчет

### 2. Краткие теоретические сведения

В различных областях техники довольно часто приходится иметь дело с процессами нагревания и охлаждения тел. Основные задачи, которые приходится решать при нагревании (охлаждении) тел – это за какое время температура тела изменится с одного значения до другого, или с какой скоростью будет происходить изменение температуры точек тела. В частности, подобные задачи актуальны в термической обработке.

В твердых телах процесс передачи тепла осуществляется посредством теплопроводности. При этом разные точки тела изменяют свою температуру с разной скоростью. Для простых тел – плоская стенка, цилиндр, шар задачи нестационарной теплопроводности решены при наличии определенных допущений, для тел более сложной формы аналитическое решение уже невозможно.

В общем виде задача нестационарной теплопроводности формулируется следующим образом: твердое тело, имеющее температуру  $t_a$  помещается в среду с постоянной температурой  $t_0$ , требуется определить распределение температурного поля внутри тела и изменение его со временем. Решение подобной задачи – решение уравнения теплопроводности Фурье

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t . \quad (1)$$

Подобные уравнения в частных производных, как показано в курсе Уравнения математической физики, удобно решать относительно безразмерных величин. Решение для безразмерной относительной избыточной температуры можно представить в виде

$$\frac{\theta_{r,\tau}}{\theta_0} = U(\mathbf{r}) e^{-m\tau} . \quad (2)$$

Здесь  $a$  – коэффициент температуропроводности материала тела,  
 $\theta_{r,\tau} = t - t_0$  – избыточная температура точек тела с координатой  $r$  в момент времени  $\tau$ ,

$\theta_0 = t_a - t_0$  – избыточная температура тела в начальный момент времени  $\tau=0$ ,

$U(r)$  – безразмерная функция координат точек тела,

$m = -\frac{1}{\theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$  – темп охлаждения (нагрева) точек тела.

Для решения уравнения Фурье необходимо задать начальные и граничные условия, в том числе и характер интенсивности теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Эту интенсивность теплообмена характеризует критерий Био

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \delta = \frac{\alpha}{\lambda/\delta} \quad (3)$$

Критерий Био представляет собой количественную меру интенсивности теплоотдачи с поверхности тела  $\alpha$  по сравнению с интенсивностью притока тепла изнутри тела к его поверхности  $\lambda/\delta$ ,

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду,

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала тела,

$\delta$  – характерный размер тела.

Числовое значение критерия Био имеет большое значение при решении любой задачи теории теплопроводности.

Если  $Bi \ll 1$ , то либо мала теплоотдача с поверхности, либо велика тепловая проводимость материала. В этом случае температуру по всему сечению тела можно принять одинаковой.

Если  $Bi \gg 1$  можно считать, что температура поверхности тела становится практически равной температуре окружающей среды, и весь процесс в основном обуславливается явлением теплопроводности.

Промежуточный случай является наиболее сложным и никакие допущения здесь не применимы.

Следует заметить, что по написанию критерий Био одинаков с критерием Нуссельта (см. лаб. работы 2, 3, 4), но по физическому смыслу они глубоко различны. В критерий Био входит коэффициент теплопроводности  $\lambda$  материала твердого тела, а в критерий Нуссельта коэффициент теплопроводности среды, омывающей тело.

Процесс охлаждения (остывания) однородного изотропного тела в среде с постоянной температурой  $t_0$  и при постоянном коэффициенте теплоотдачи  $\alpha$  можно разделить на две стадии. В начальной стадии распределение температуры точек тела в его объеме от однородного переходит в соответствие с функцией  $U(r)$ , а затем температура всех точек изменяется уже по экспоненциальному закону (2). Эта вторая стадия называется регулярным тепловым режимом 1-го рода.

Теория регулярного режима разработана профессором Г.М. Кондратьевым. Им же была установлена связь между темпом охлаждения тела,

его физическими и геометрическими свойствами, а также внешними условиями теплообмена. Для случая, когда критерий  $Bi \rightarrow \infty$  (практически при  $Bi > 100$ ), темп охлаждения прямо пропорционален коэффициенту температуропроводности материала  $a$  тела:

$$a = km_{\infty}, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент формы, характеризующий геометрическую форму и размеры тела: например, для цилиндра радиуса  $R$  и длиной  $l$ :

$$k = \frac{1}{(2,4048/R)^2 + (\pi/l)^2}. \quad (5)$$

Как следует из теории регулярного режима и уравнения (2) темп охлаждения точек тела не зависит от расположения местоположения исследуемой точки внутри тела и уравнение (4) может быть использовано для определения коэффициента температуропроводности тел – плохих проводников тепла. Зная величину  $a$ , можно определить коэффициент теплопроводности  $\lambda$  тела, если известно значение теплоемкости и плотности, по выражению:

$$\lambda = a \cdot c \cdot \rho. \quad (6)$$

### 3. Описание лабораторного оборудования.

На рис.1 показана схема установки для проведения эксперимента. Основным элементом установки является акалориметр 2, представляющий собой латунный цилиндр диаметром  $2R=32$  мм и высотой  $l=63$  мм, полностью заполненный испытуемым материалом – сухим мелким песком. Внутри цилиндра для измерения температуры песка помещен “горячий” спай хромель-копелевой термопары 3.

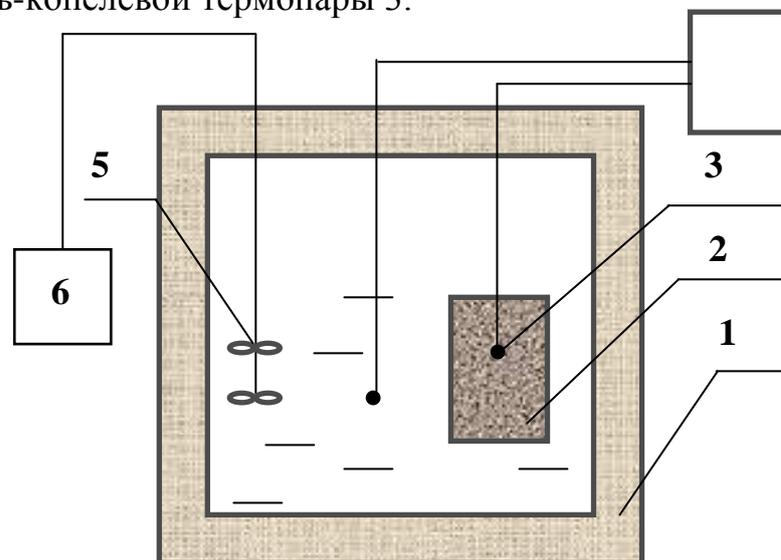


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

1 – термостат, 2 – акалориметр, 3 – термопара, 4 – электронный измеритель 2ТРМ0, 5 – мешалка, 6 – электродвигатель.

Акалориметр нагревается в водяной бане (на схеме не показана) до температуры  $70 \div 80^\circ\text{C}$  и переносится в водяной термостат 1, где и произ-

водится его охлаждение. Поскольку теплоемкость термостата много больше теплоемкости акалориметра, можно считать, что температура воды в термостате остается неизменной, то есть выполняется условие постоянства температуры  $t_0$ . Температура воды в термостате измеряется также хромель-копелевой термопарой, обе термопары подключены к многоканальному цифровому измерителю 2ТРМ0. К каналу I подключена термопара, измеряющая температуру воды в термостате, к каналу II – термопара, измеряющая температуру песка внутри акалориметра, переключение каналов производится нажатием соответствующей кнопки измерителя. Для перемешивания воды в термостат помещена мешалка 5, соединенная с электродвигателем 6.

Условие постоянства коэффициента теплоотдачи  $\alpha = \text{const}$  при незначительных интервалах теплового напора  $t - t_0 \approx 10 \div 50^\circ\text{C}$  приближенно выполняется.

Значение критерия Био в условиях эксперимента  $Bi > 100$ , таким образом можно считать, что условия регулярного теплового режима Г.М.Кондратьева выполняются за исключением короткого начального отрезка времени.

#### **4. Порядок выполнения работы.**

##### **4.1. Проведение эксперимента.**

Поместить акалориметр в водяную баню (нагревающую среду).

Переключателем “сеть” подать электропитание стенда.

Переключатель ВЗ, расположенным с левой стороны стенда, перевести в положение “вкл”.

Тумблером “мешалка” подать напряжение на двигатель мешалки.

Измерить и записать температуру воды в термостате  $t_0$  (положение I измерителя температуры).

Переключателем “подогрев” включить нагрев водяной бани.

Измеритель температуры перевести в положение II, при этом он будет показывать температуру песка внутри акалориметра.

При достижении температуры образца внутри акалориметра порядка  $80 \div 90^\circ\text{C}$  быстро перенести акалориметр из водяной бани в термостат и производить измерение температуры акалориметра через каждые 30с. Результаты измерений занести в таблицу 1. Измерения закончить, когда разность температур акалориметра и воды в термостате будет составлять  $3 \div 5^\circ\text{C}$ .

Повторить опыт еще два раза, помещая остывший цилиндр с изучаемым образцом в водяную баню для нагрева.

Таблица 1.

## Результаты измерений.

$\tau, c$	$t_0, ^\circ C$	$t, ^\circ C$	$\theta, ^\circ C$	$\theta/\theta_0$	$\ln(\theta/\theta_0)$	$m$
	измерено		вычислено			
	опыт 1					
0						
30						
60						
90						
.....						
	опыт 2					
0						
30						
60						
90						
.....						
	опыт 3					
0						
30						
60						
90						
.....						

**4.2. Обработка результатов измерения.**

По измеренным значениям температуры воды в калориметре и исследуемого материала определить избыточную температуру  $\theta = t - t_0$  и относительную избыточную температуру  $\theta/\theta_0$ .  $t_0$  – температура среды, в которую помещается тело.

Логарифмируя уравнение (2), получим, что логарифм относительной избыточной температуры в регулярном тепловом режиме прямопропорционален времени охлаждения (нагрева)

$$\ln \frac{\theta}{\theta_0} = C - m\tau \quad (7)$$

Для определения темпа охлаждения  $m$  следует построить график зависимости  $\ln \frac{\theta}{\theta_0}$  от  $\tau$  (рис.2), выделить на графике линейный участок и

определить тангенс угла наклона прямой  $m = \frac{\ln \frac{\theta_1}{\theta_0} - \ln \frac{\theta_2}{\theta_0}}{\tau_2 - \tau_1}$ .

Для более точного определения темпа охлаждения  $m$  следует построить график в ручную, выделить точки, которые укладываются на прямую, и по этим точкам, используя компьютерные технологии и метод наименьших квадратов, написать уравнение прямой (7), из которого и найти значение величины  $m$ .

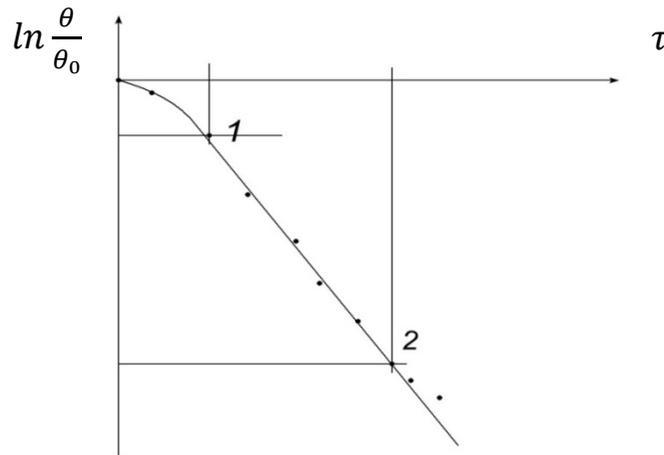


Рис.2. График изменения логарифма относительной температуры со временем.

По трем опытам рассчитать среднее значение темпа охлаждения  $\bar{m}$ .

Рассчитать коэффициент температуропроводности  $a$  (формула 4) исследуемого материала – мелкого песка и сравнить эти значения со справочными данными.

Выписав из справочников значения теплоемкости  $c$  и плотности  $\rho$  мелкого сухого песка, определить значение коэффициента теплопроводности (формула 6) и также сравнить с табличным значением.

Относительную среднеквадратичную ошибку в определении коэффициента температуропроводности находим по формуле

$$\delta a = \frac{\Delta a}{a} = \sqrt{(\delta k)^2 + (\delta m)^2} . \quad (8)$$

Относительную ошибку в определении коэффициента формы  $k$  получаем дифференцируя формулу (5)

$$\delta k = \frac{\Delta k}{k} = 2k \sqrt{\left(\frac{2,4048^2}{R^2} \cdot \delta R\right)^2 + \left(\frac{\pi^2}{l^2} \cdot \delta l\right)^2} .$$

Относительная погрешность в определении размеров цилиндра определяется точностью измерений  $\delta R = \delta D = \frac{\Delta D}{D} = \frac{0,5}{32}$  и  $\delta l = \frac{\Delta l}{l} = \frac{0,5}{63}$ .

Относительную ошибку в определении  $m$  находим, используя методы статистической обработки результатов измерения как отношение стандартного отклонения в определении  $m$  к среднему значению

$$\delta m = \frac{\sigma_m}{\bar{m}} = \frac{\sqrt{Dm}}{\bar{m}} .$$

## 5. Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Схема установки.
- Таблицы измеренных данных.
- Таблицы расчетных величин.

- Графики изменения логарифма относительной температуры со временем.
- Измеренное значение темпа охлаждения  $m$  и коэффициента температуропроводности  $a$ .
- Теплофизические характеристики песка из справочной литературы.
- Сравнение измеренных величин со справочными.
- Выводы.

### **Контрольные вопросы.**

1. Поясните различие в критериях Нуссельта и Био.
2. Приведите примеры технологических процессов, требующих расчетов нестационарной теплопроводности.
3. Составьте предложения по усовершенствованию лабораторной работы.
4. Как практически решаются задачи нагрева и охлаждения тел?
5. Покажите, что в настоящей работе значение критерия Био  $Bi \gg 1$ .
6. Стальную деталь, имеющую начальную температуру  $28^\circ\text{C}$  помещают в печь, в которой поддерживается температура  $820^\circ\text{C}$ . Через 10 минут сердцевина детали прогрелась до  $320^\circ\text{C}$ . За какое время вся деталь прогреется до температуры печи?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.**

### **Теплопередача в пароводяном теплообменнике**

#### **1. Цель работы.**

Целью настоящей работы является углубление знаний по теории процессов теплопередачи в теплообменниках, ознакомление с методами их опытного исследования на натуральных образцах и моделях и получение навыков в проведении эксперимента.

В результате работы изучаются конструкции пароводяных теплообменников, влияние различных факторов на интенсивность их работы, основы теории теплового и гидромеханического расчета теплообменных аппаратов.

Опытным путем установить влияние скорости движения охлаждающей воды на коэффициент теплопередачи в теплообменнике.

#### **Задание на выполнение лабораторной работы**

1. Экспериментально определить коэффициент теплопередачи для пароводяного теплообменника в заданных условиях теплообмена.
2. Выполнить теоретический расчет коэффициента теплопередачи на основе теории подобия с выбранным критериальным уравнением и сравнить с экспериментально полученным результатом .
3. Составить отчет с выводами по работе

#### **2. Краткие теоретические сведения.**

Устройство, служащее для осуществления передачи тепла от одного тела к другому, называется теплообменным аппаратом или теплообменником. При этом, если процесс теплопередачи от горячего тела к холодному происходит непрерывно и через разделяющую стенку – поверхность теплообмена, то такие теплообменники называются рекуперативными или поверхностными теплообменниками непрерывного действия.

Греющее и нагреваемое рабочие тела могут иметь различные физические свойства, агрегатное состояние, температуру, давление, скорость движения, а также различное направление движения как относительно поверхности теплообмена, так и относительно друг друга. Сама поверхность теплообмена также может различаться по размерам, форме и компоновке. Вследствие всех этих обстоятельств будут различными как частные термические сопротивления теплоотдачи для каждой из двух рабочих сред, так будет различным и общее термическое сопротивление теплопередачи, зависящее от них. Следовательно, будет различной и интенсивность теплопередачи в теплообменнике. Интенсивность теплопередачи определяется коэффициентом теплопередачи.

Средний коэффициент теплопередачи между греющей и нагреваемой рабочими жидкостями определяется формулой

$$k = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{\text{л}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловой поток между средами, Вт,  
 $F$  – расчетная поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>,

$\overline{\Delta t_{\text{л}}}$  – средняя логарифмическая разность между температурами рабочих жидкостей (полный температурный напор), К.

Под средним логарифмическим температурным напором понимается величина

$$\overline{\Delta t_{\text{л}}} = \frac{\theta_{\text{макс}} - \theta_{\text{мин}}}{\ln \frac{\theta_{\text{макс}}}{\theta_{\text{мин}}}}, \quad (2)$$

где  $\theta_{\text{макс}} = t'_1 - t'_2$  – наибольшая разность температур горячего и холодного теплоносителей,  $\theta_{\text{мин}} = t''_1 - t''_2$  – наименьшая разность температур теплоносителей, индекс “1” относится к горячему, а индекс “2” – к холодному теплоносителю, с одним штрихом обозначена температура теплоносителя на входе, двумя штрихами – температура на выходе теплообменного аппарата.

В настоящей работе в теплообменник поступает насыщенный пар и в процессе передачи тепла изменяется только степень сухости пара, поэтому температура пара в теплообменнике остается постоянной  $t'_1 = t''_1 = t_{\text{н}}$  и формулу (2) можно переписать в виде

$$\overline{\Delta t_{\text{л}}} = \frac{(t_{\text{н}} - t'_2) - (t_{\text{н}} - t''_2)}{\ln \frac{t_{\text{н}} - t'_2}{t_{\text{н}} - t''_2}}, \quad (2')$$

Часто полезно знать величины отдельных частных тепловых сопротивлений для того, чтобы иметь возможность сделать правильные выводы по мерам эффективного увеличения коэффициента теплопередачи. С этой целью наряду с экспериментальным определением коэффициента теплопередачи производится еще измерение коэффициентов теплоотдачи по обеим сторонам поверхности теплообмена.

Процесс переноса тепла в теплообменниках состоит из трех частей: теплоотдача от горячей жидкости стенке, средний коэффициент теплоотдачи

$$\overline{\alpha}_1 = \frac{Q}{F_1 \cdot \Delta t_1}, \quad (3)$$

теплопередача от одной поверхности стенки к другой посредством теплопроводности с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  материала стенки,

теплоотдача от стенки к холодной жидкости, средний коэффициент теплоотдачи

$$\overline{\alpha}_2 = \frac{Q}{F_2 \cdot \Delta t_2}, \quad (4)$$

$F_1$  и  $F_2$  – площади поверхностей со стороны греющей и нагреваемой среды соответственно,

$\overline{\Delta t}_1$  и  $\overline{\Delta t}_2$  – средние температурные напоры между жидкостями и стенкой.

Таким образом, для определения фактических значений коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи, требуется знать величину теплового потока, площади контактирующих поверхностей и средние температурные напоры на участках теплообмена.

### 3. Описание лабораторного оборудования.

Установка для изучения теплопередачи состоит из пароводяного теплообменника непрерывного действия, уравнительного бачка, системы соединительных трубопроводов и ряда измерительных приборов (рис.1).

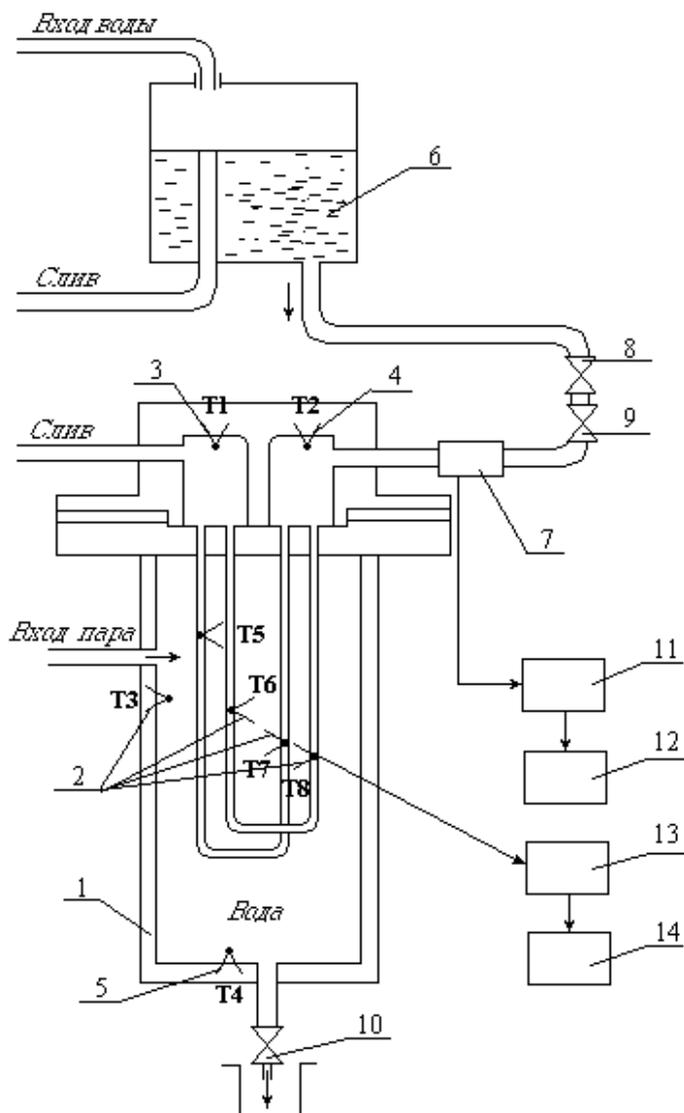


Рис.1. Схема опытной установки. 1 – теплообменник; 2 – термопары для определения температуры стенки; 3 – термопара для определения температура выходящей воды; 4 – термопара для определения температуры входящей воды; 5 – термопара для определения температуры конденсата; 6 – уравнительный бачок; 7 – преобразователь расхода ТПР-6; 8,9,10 – вентили; 11 – преобразователь масштабный БМП-2; 12 – дозатор-счетчик количества ДСК-1; 13 – переключатель термопар Т1 – Т8; 14 – цифровой показывающий прибор.

Теплообменник вертикальный двухходовой с двумя трубками в каждом ходе. Трубки выполнены из латуни. Внутренний диаметр каждой из них  $d_2=8\text{мм}$ , наружный  $d_1=10\text{мм}$ , длина  $l=808,8\text{мм}$ .

В качестве греющей жидкости здесь применяется водяной пар, который конденсируется на внешней поверхности трубок, а в качестве нагреваемой – вода, которая протекает внутри трубок.

Для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду теплообменник покрыт тепловой изоляцией.

Сухой насыщенный пар из парогенератора поступает в верхнюю часть теплообменника, а конденсат отводится из нижней его части через вентиль 10.

Охлаждающая вода поступает в теплообменник из водопровода через уравнильный бачок, который обеспечивает постоянство напора. Из теплообменника вода отводится в канализацию.

Расход пара и воды регулируется с помощью вентиля таким образом, чтобы температура конденсата на выходе из теплообменника была близка к температуре насыщения при данном давлении.

Количество образовавшегося конденсата определяется путем сбора конденсата в мерную емкость за известный промежуток времени.

Для измерения расхода воды служит турбинный преобразователь ТПР-6 7 в комплекте с преобразователем масштабным БМП-2 11 и дозатором счетчиком количества ДСК 12. Показания счетчика проградуированы в единицах л/с.

Температура пара, конденсата, входящей и выходящей воды измеряется с помощью хромель-копелевых термопар Т3, Т4, Т2 и Т1 соответственно, горячие спаи которых установлены в соответствующих штуцерах.

Температура поверхности измеряется с помощью четырех термопар Т5 – Т8, заложенных в каждой из четырех трубок теплообменника. Холодные спаи всех термопар выведены на многополюсный переключатель термопар 13, с помощью которого термопары последовательно подключаются к цифровому измерительному прибору 14, показания которого проградуированы в градусах Цельсия.

#### **4. Порядок выполнения работы.**

Для выполнения работы требуется включить парогенератор и заполнить водой уравнильный бачок. Эти операции выполняются преподавателем.

##### **4.1. Проведение эксперимента.**

Открыть вентиль, установленный на сливе охлаждающей воды из теплообменника. Вентиль позволяет регулировать расход охлаждающей воды (на схеме не показан, расположен с левой стороны стенда).

Открыть паровой вентиль, установленный на основной магистрали паропровода перед теплообменником. При заданном расходе воды подачу пара необходимо отрегулировать так, чтобы температура конденсата была

близка к температуре насыщения. Чтобы обнаружить наступление установившегося теплового состояния в теплообменнике, производится запись показаний приборов через каждые 5-10 мин. Обычно оно наступает через 20-30 мин. после включения установки и характеризуется неизменностью показаний приборов во времени.

При наступлении равновесия произвести следующие измерения

- температуру воды на входе  $t_2'$  (термопара Т2) и на выходе  $t_2''$  (термопара Т1),
- температуру пара на входе  $t_1'$  (термопара Т3) и на выходе  $t_1''$  (термопара Т4),
- температуру поверхности трубок теплообменника (термопары Т5 – Т8),
- объемный расход воды  $V_в$ , л/с, который следует перевести в массовый расход  $G_в$ , кг/с,
- используя мерный сосуд, определить объем получаемого конденсата  $V_к$  за время  $\tau$  порядка 3 – 10 минут и массовый выход конденсата  $G_к = \rho \frac{V_к}{\tau}$ .

Результаты измерений занести в табл.1.

Таблица 1

Результаты измерений

			порядковый номер опыта		
			1	2	3
объемный расход воды	$V_в$	л/с			
массовый расход воды	$G_в$	кг/с			
температуру воды на входе	$t_2'$	°C			
температуру воды на выходе	$t_2''$	°C			
температуру пара на входе	$t_1'$	°C			
температуру пара на выходе	$t_1''$	°C			
температура поверхности трубок	$t_5$	°C			
	$t_6$	°C			
	$t_7$	°C			
	$t_8$	°C			
средняя температура поверхности трубок	$\bar{t}_c$	°C			
объем конденсата	$V_к$	мл			
время измерения	$\tau$	с			
массовый выход конденсата	$G_к$	кг/с			

Повторить измерения при других расходах охлаждающей воды.

#### 4.2. Обработка результатов измерения.

Для определения среднего коэффициента теплопередачи (1) теплообменника необходимо рассчитать тепловой поток  $Q$ , передаваемый от конденсирующегося пара к воде. Согласно уравнению теплового баланса

$$Q = G_B \cdot c_{pB}(t_2'' - t_2') = G_K(h_{п} - h_{к}) - \Delta Q, \quad (5)$$

где  $c_{pB}$  – средняя удельная теплоемкость воды,

$h_{п}$  – энтальпия пара на входе в теплообменник,

$h_{к}$  – энтальпия конденсата,

$\Delta Q$  – потери теплового потока в окружающую среду.

При наличии хорошей изоляции в теплообменнике можно принять, что потери тепла  $\Delta Q = 0$ .

Таблица 2

Расчет коэффициента теплопередачи

			порядковый номер опыта		
			1	2	3
средняя температура воды	$\bar{t}_B$	$^{\circ}C$			
удельная теплоемкость воды	$c_{pB}$	$кДж/кг \cdot K$			
плотность воды	$\rho$	$кг/м^3$			
тепловой поток	$Q$	$Вт$			
энтальпия пара на входе	$h_1''$	$кДж/кг$			
энтальпия конденсата на выходе	$h_1'$	$кДж/кг$			
потери тепла в теплообменнике	$\Delta Q$	$Вт$			
полный логарифмический температурный напор	$\overline{\Delta t}_L$	$K$			
Расчетная поверхность теплообмена	$F_2$	$м^2$			
коэффициент теплопередачи по формуле (1)	$k$	$Вт/м^2 \cdot K$			
скорость движения воды	$w$	$м/с$			
температурный напор от пара к стенке	$\overline{\Delta t}_1$	$K$			
средний коэффициент теплоотдачи пар – стенка (7)	$\overline{\alpha}_1$	$Вт/м^2 \cdot K$			
температурный напор от стенки к пару	$\overline{\Delta t}_2$	$K$			
средний коэффициент теплоотдачи стенка – вода (9)	$\overline{\alpha}_2$	$Вт/м^2 \cdot K$			
коэффициент теплопередачи по формуле (6)	$k$	$Вт/м^2 \cdot K$			

Физические свойства воды по температуре представлены в таблице Приложения Г, а свойства сухого насыщенного водяного пара по давлению – в таблице приложения Д.

В качестве расчетной поверхности теплообмена  $F$  в формуле (1) принимается поверхность теплообменника  $F_2$ , подсчитанная по внутреннему диаметру труб.

Результаты расчета коэффициента теплопередачи представить в табл.2. Значения физических величин принимаются по соответствующим таблицам, напр., Приложения Г и Д.

Коэффициент теплопередачи находится по формуле (1) по вычисленным значениям теплового потока и логарифмического температурного напора.

Следует оценить влияние скорости движения охлаждающей воды на коэффициент теплопередачи и построить график зависимости  $k=f(w)$ . Скорость движения воды находится через расход  $w = \frac{V_{и}}{\frac{\pi d_2^2 \cdot z}{4}}$ , где  $z=2$  – количество параллельных труб в теплообменнике (см. рис.1).

### 4.3. Теоретический расчет коэффициента теплопередачи.

Формула (1) для коэффициента теплопередачи применима в том случае, когда площади со сторон теплоотдачи и теплопоглощения одинаковы. В случае теплопередачи через цилиндрическую стенку площади поверхностей различны –  $F_1=\pi d_1$  и  $F_2=\pi d_2$  соответственно. Поэтому и коэффициенты теплопередачи, рассчитанные со стороны внешней или внутренней поверхности, будут различны. В этом случае часто используется линейный коэффициент теплопередачи, т. е., количество тепла передаваемого через единицу длины цилиндрической стенки в единицу времени при температурном напоре 1К

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\pi \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi d_2 \alpha_2}}. \quad (6)$$

Разделив правую часть на  $F_1=\pi d_1$ , получим выражение для коэффициента теплопередачи относительно внешней поверхности трубы

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{d_1}{d_2}} \quad (7)$$

Расчетный коэффициент теплопередачи через цилиндрическую стенку, приведенный к внутреннему диаметру трубы

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (8)$$

Здесь  $d_2$  и  $d_1$  – внутренний и наружный диаметры трубы соответственно,  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи со стороны греющей жидкости,  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи со стороны нагреваемой жидкости,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стенки трубы, для нержавеющей стали  $\lambda=47 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ .

Значения коэффициентов теплоотдачи можно определить по результатам эксперимента и теоретически (см. лабораторные работы 3 и 4).

Средний коэффициент теплопередачи от пара к стенке

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{q}{\Delta t_1 \cdot \pi d_1 \cdot l \cdot n}, \quad (9)$$

где  $\bar{\Delta t}_1 = t_n - \bar{t}_c$  – средний температурный напор в системе пар – стенка,  
 $n = 2$  – количество параллельных труб в теплообменнике.

Это значение следует сравнить с расчетным значением при ламинарном течении конденсата по поверхности трубы ( $Re < 100$ )

$$\alpha_1 = 1,01 \left( \frac{g}{\nu_k^2} \right)^{1/3} Re_1^{-1/3}, \quad (10)$$

критерий Рейнольдса в этом случае находится по формуле

$$Re_1 = \frac{q_1 H_T}{r \rho_k \nu_k},$$

где  $q_1 = Q/F_1$  ( $Bm/m^2$ ) – удельный тепловой поток на наружной поверхности,

$H_T$  (м) – высота теплообменной поверхности трубки, можно принять равной половине длины трубки.

$r$  (Дж/кг) – теплота парообразования при давлении насыщенного пара,

$\rho_k$  ( $кг/м^3$ ) – плотность конденсата,

$\nu_k$  ( $м^2/с$ ) – кинематическая вязкость конденсата.

Таблица 3

Теоретический расчет коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи

			порядковый номер опыта		
			1	2	3
Теплопередача от пара к стенке					
средняя температура конденсата	$\bar{t}_k$	$^{\circ}C$			
удельный тепловой поток	$q_1$	$Bm/m^2$			
плотность конденсата	$\rho_k$	$кг/м^3$			
теплота парообразования	$r$	$Дж/кг$			
кинематическая вязкость конденсата	$\nu_k$	$м^2/с$			
критерий Рейнольдса	$Re_k$				
коэффициент теплоотдачи	$\alpha_1$	$Bm/m^2K$			
Теплоотдача от стенки к воде					
кинематическая вязкость воды	$\nu_в$	$м^2/с$			
коэффициент теплопроводности воды	$\lambda_в$	$Bm/m \cdot K$			
скорость движения воды	$w$	$м/с$			
критерий Рейнольдса	$Re_в$				
коэффициент теплоотдачи	$\alpha_2$	$Bm/m^2 \cdot K$			
коэффициент теплопередачи по формуле (6)	$k$	$Bm/m^2 \cdot K$			

Средний коэффициент теплопередачи от стенки к воде

$$\bar{\alpha}_2 = \frac{Q}{\Delta t_2 \cdot \pi d_2 \cdot l \cdot n}, \quad (11)$$

средний напор в этой формуле находится как логарифмический

$$\bar{\Delta t}_2 = \frac{(\bar{t}_c - t'_2) - (\bar{t}_c - t''_2)}{\ln \frac{\bar{t}_c - t'_2}{\bar{t}_c - t''_2}}$$

$n=2$  – количество параллельных трубок.

Теоретическое значение коэффициента теплопередачи в этом случае при турбулентном режиме течения воды ( $Re_2 > 10^4$ ) – см. лабораторную работу 4

$$\alpha_2 = 0,021 \frac{\lambda_B}{d_2} Re_2^{0,8} Pr^{0,43} \quad (12)$$

Критерий Рейнольдса вычисляется по общей формуле  $Re = \frac{w d_2}{\nu_B}$ .

Значения физических величин для воды, пара и конденсата находят по таблицам Приложений Г и Д, пример расчета показан в Приложении В.

Результаты расчета желательно свести в табл. 3.

Полученные значения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи следует сравнить с экспериментальными значениями (табл.2).

### 5. Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Схема установки.
- Таблицы измеренных данных.
- Таблицы расчетных величин.
- Расчетные значения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи и сравнение их с теоретическими значениями.
- Графики зависимости коэффициента теплопередачи от скорости воды.
- Выводы.

### Контрольные вопросы.

1. Классификация теплообменных аппаратов.
2. Уравнения теплопередачи и теплового баланса.
3. Приведите примеры рекуперативных теплообменников.
4. В чем вы видите недостатки настоящей лабораторной работы?
5. Почему для теоретического расчета коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в настоящей работе применяются разные формулы?
6. В формуле (9) для определения коэффициента теплоотдачи температурный напор определяется как разность температур, а в формуле (11) – как логарифмический температурный напор. Почему?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7.

### Определение коэффициента теплоотдачи излучением методом цилиндрической трубы

#### 1. Цель работы.

В настоящей работе изучаются процессы передачи тепла посредством излучения, производится экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи излучением, проверяется закон Стефана-Больцмана.

#### Задание по выполнению лабораторной работы

1. Определить средний коэффициент теплоотдачи излучением между двумя цилиндрическими поверхностями (теплоотдающей и тепловоспринимающей) используя метод цилиндрической трубы.
2. Проверить, как результаты измерений согласуются с законом Стефана-Больцмана и критериальные уравнения конвективной части теплообмена при свободном движении воздуха.
3. Составить отчет с приведением требуемых графиков, таблиц в том числе из приложений.

#### 2. Краткие теоретические сведения.

Тепловое излучение – явление переноса энергии в виде электромагнитных волн между двумя и более взаимно излучающими поверхностями. При этом на поверхности излучающего тела происходит превращение тепловой энергии в лучистую, а на поверхности поглощающего тела – превращение лучистой энергии в тепловую.

Поглощательная способность  $A$  – это отношение потока излучения, поглощенного телом, к потоку излучения, падающего на него  $A = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}}$ .

Отражательная способность  $R$  – отношение отраженного поверхностью тела потока излучения к потоку излучения, падающего на эту поверхность  $R = E_{\text{отр}}/E_{\text{пад}}$ .

Пропускательная способность  $D$  – отношение потока пропущенного телом излучения к потоку излучения, падающему на поверхность тела  $D = E_{\text{проп}}/E_{\text{пад}}$ .

Из закона сохранения энергии  $A + R + D = 1$ .

Подобные величины, относящиеся к монохроматическому излучению называются спектральными и обозначаются  $A_\lambda$ ,  $R_\lambda$ ,  $D_\lambda$ .

Если  $D = 1$ ,  $D_\lambda = 1$  – среда полностью пропускает тепловое излучение.

Случай  $D = 0$  характерен для многих тел, тогда  $A + R = 1$ . Вводится понятие абсолютно черного тела, для которого  $A = 1$  и  $A_\lambda = 1$ .

Как показывает квантовая теория излучения Планка, любое тело, имеющее температуру отличную от абсолютного нуля, испускает электромагнитные волны. Спектральная плотность потока излучения абсолютно черного тела устанавливается законом Планка и зависит только от температуры тела  $T$

$$E_{\lambda,0} = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (1)$$

Здесь  $C_1=3,7 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$ ,  $C_2=0,0144 \text{ м} \cdot \text{К}$  – постоянные, зависящие от универсальных констант – скорость света в вакууме, постоянная Больцмана, постоянная Планка.

Максимум интенсивности излучения согласно закону смещения Вина приходится на длину волны  $\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \text{ мкм} \cdot \text{К}$ .

Интегральную плотность излучения абсолютно черного тела получим, проинтегрировав уравнение (1) – закон Стефана-Больцмана

$$E_0(T) = \sigma_0 T^4, \quad (2)$$

где  $\sigma_0 = 5,57 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – константа излучения абсолютно черного тела. Для практических расчетов более удобна следующая запись уравнения:

$$E_0(T) = c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (3)$$

где константа  $c_0=5,57 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ .

Абсолютно черное тело – идеальное понятие. Для реальных тел вводится понятие степени черноты – отношение плотности потока собственного излучения тела  $E_{соб}$  к плотности потока излучения абсолютно черного тела той же температуры

$$\varepsilon = \frac{E_{соб}}{E_0} \quad (4)$$

Для серого тела справедливо равенство  $\varepsilon = A$  как в равновесном случае, так и для неравновесного теплового излучения.

Таким образом, помимо конвективного теплообмена (см. лабораторные работы 2, 3, 4) твердого тела с окружающей средой имеет место и теплообмен излучением. Полный коэффициент теплоотдачи для такого сложного теплообмена

$$\alpha = \frac{Q}{F \Delta T} = \alpha_k + \alpha_l \quad (5)$$

складывается из коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha_k$  и коэффициента теплоотдачи излучением  $\alpha_l$ .

### 3. Описание лабораторного оборудования.

Лабораторная установка (рис.1) включает стальную трубу 5, внутри которой помещен цилиндрический стальной тэн 6 (внутренняя труба), нагреваемый с помощью электрического тока. Внешний диаметр внутренней трубы  $d_1=0,013\text{м}$ , внутренний диаметр внешней трубы  $d_2=0,049\text{м}$ , длина тэна  $l=0,991\text{м}$ . Внутреннее пространство трубы заполнено воздухом под атмосферным давлением. Торцы трубы имеют теплоизоляцию от внешней среды. Внешняя труба охлаждается проточной водой, которая в результате нагревается.

Степень нагрева внутренней трубы регулируется автотрансформатором 2, ручка которого выведена на лицевую панель стенда, напряжение и потребляемый ток измеряются приборами 3 и 4.

Вода для охлаждения подается из водопровода через регулирующий вентиль 18, давление в трубопроводе измеряется манометром 17. Температура охлаждающей воды на входе  $t_{вх}$  и на сливе  $t_{сл}$  измеряется (в градусах Цельсия) термопарами, подключенными через переключатель, расположенный на лицевой панели стенда, к цифровому измерительному прибору 2ТРМ0.

На теплоотдающей поверхности внутренней трубы установлены 5 хромель-копелевых термопар (7 – 11), термо-эдс которых измеряется прибором Ф283М1 (13). Таблица перевода термо-эдс в градусы Цельсия приведена в Приложении А. Установка номера измеряемой термопары производится переключателем 12 “Температура горячей стенки”.

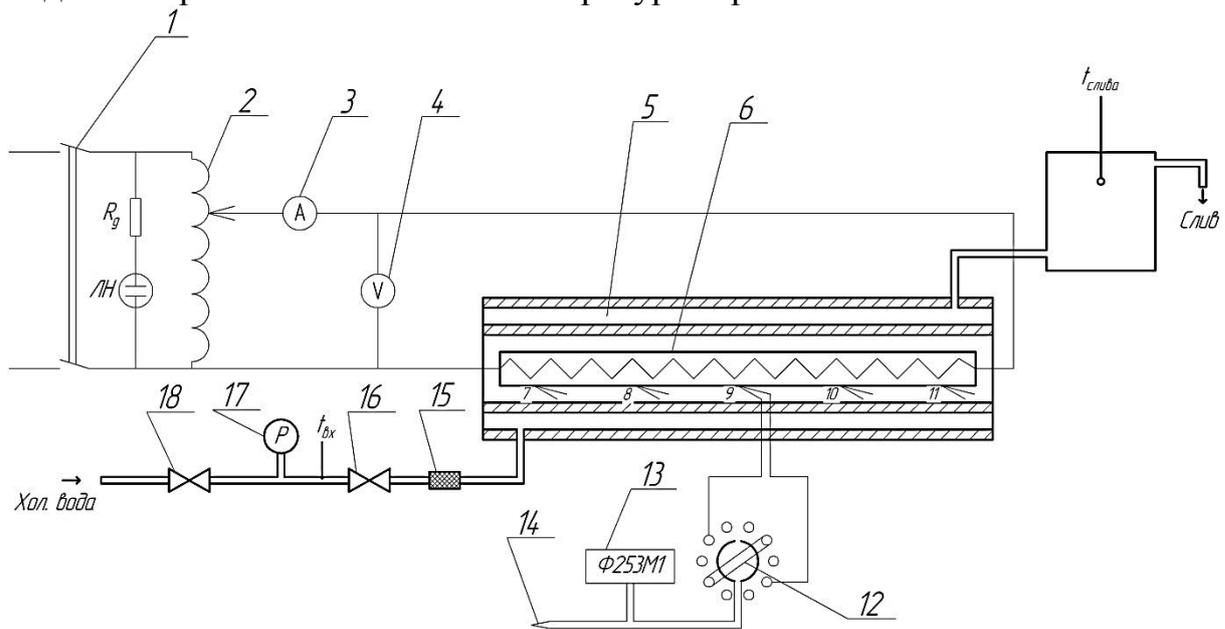


Рис.1. Схема стенда для проведения экспериментов. 1 – выключатель электропитания, 2 – автотрансформатор, 3 – амперметр, 4 – вольтметр, 5 – наружная труба, охлаждаемая водой, 6 – внутренний подогреваемый цилиндр, 7 ÷ 11 – термопары на внутренней трубе, 12 – переключатель, 13 – милливольтметр, 15 – фильтр, 16, 18 – вентили, 17 – манометр.

В настоящем эксперименте тепло, выделяющееся на внутренней трубе, отводится посредством конвекции через воздушную прослойку и излучением на внутреннюю поверхность внешней трубы, откуда отводится охлаждающей водой. В стационарном режиме в условиях теплового равновесия тепло от нагревателя

$$Q_{н} = U \cdot I = Q_{к} + Q_{л}, \quad (6)$$

где  $Q_{к}$  – тепловой поток, переносимый конвекцией и теплопроводностью воздуха,  $Q_{л}$  – тепловой поток, переносимый излучением.

Уравнение теплообмена конвекцией и теплопроводностью воздушного слоя между цилиндрическими поверхностями при свободном движении воздуха (естественной конвекции) имеет вид

$$Q_k = \frac{\pi(t_{гор} - t_{хол})l}{\frac{1}{2\lambda_{эКВ}} \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (7)$$

Здесь  $t_{гор}$  – средняя температура горячей, отдающей тепло стенки,  $t_{хол}$  – средняя температура теплопринимающей поверхности,  $\lambda_{эКВ} = \varepsilon_k \lambda_g$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности воздуха с учетом конвекции.  $\lambda_g$  – собственно коэффициент теплопроводности воздуха,  $\varepsilon_k$  – коэффициент, зависящий от произведения  $(Gr \cdot Pr)_g$ :

$$\text{при } 10^3 < (Gr \cdot Pr)_B < 10^6 \quad \varepsilon_k = 0,105 (Gr \cdot Pr)_B^{0,3} \quad (8)$$

$$\text{при } 10^6 < (Gr \cdot Pr)_B < 10^{10} \quad \varepsilon_k = 0,4 (Gr \cdot Pr)_B^{0,2} \quad (9)$$

При расчетах значение критерия Прандтля, как и значения других теплофизических характеристик воздуха (см. Приложение В), следует принимать для средней температуры воздуха в пространстве между трубами.

#### 4. Порядок выполнения работы.

##### 4.1. Проведение эксперимента.

1. Открыть вентили на водопроводе охлаждающей воды.
2. Тумблером “сеть” включить электропитание стенда, при этом загорится сигнальная лампа и установится индикация измерительных приборов.
3. Ручкой автотрансформатора выставить режим электроподогрева, установив ток порядка 2 – 3 А.

Таблица 1

Результаты измерений

	Измеряемые величины		Номер опыта		
			1	2	
1	Давление воды	$p$	$кГ/см^2$		
2	Напряжение	$U$	$B$		
3	Сила тока	$I$	$A$		
4	Показания термопар	$E_1$	$мВ$		
		$E_2$	$мВ$		
		$E_3$	$мВ$		
		$E_4$	$мВ$		
		$E_5$	$мВ$		
5	Температура теплоотдающей стенки	$t_1$	$^{\circ}C$		
		$t_2$	$^{\circ}C$		
		$t_3$	$^{\circ}C$		
		$t_4$	$^{\circ}C$		
		$t_5$	$^{\circ}C$		
6	Температура воды на входе	$t_{вх}$	$^{\circ}C$		
7	Температура слива	$t_{сл}$	$^{\circ}C$		
8	Температура окружающей среды	$t_{o.c.}$	$^{\circ}C$		

4. Переключателем 12 вывести на индикацию одну из термопар на середине внутренней трубы и наблюдать за изменением термо-эдс (температурой трубы).

5. При наступлении теплового равновесия, о чем будет свидетельствовать неизменность показания милливольтметра в течении 3 – 5 минут, произвести измерения. Данные записать в табл.1.

6. Изменить ток электронагревателя и/или расход охлаждающей воды, произвести повторные измерения при новом режиме работы установки.

#### 4.2. Обработка результатов измерения.

По измеренным значениям температур следует рассчитать среднюю температуру теплоотдающей стенки

$$t_{\text{гор}} = \frac{1}{5} \sum t_i, \quad (10)$$

среднюю температуру тепловоспринимающей поверхности, считая, что температура внешней трубы равна температуре охлаждающей воды

$$t_{\text{хол}} = \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{сл}}}{2} \quad (11)$$

и среднюю температуру воздуха в пространстве между трубами

$$t_{\text{в}} = \frac{1}{2} (t_{\text{гор}} + t_{\text{хол}}). \quad (12)$$

Для этой температуры выписать из таблицы Приложения В теплофизические параметры воздуха:

коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{в}}$ ,

коэффициент кинематической вязкости  $\nu_{\text{в}}$ ,

критерий Прандтля  $Pr$ .

Коэффициент объемного расширения воздуха, считая воздух идеальным газом, рассчитывается по формуле

$$\beta = \frac{1}{T}. \quad (13)$$

Далее следует рассчитать значение критерия Грасгофа

$$Gr = \frac{g\beta(t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}})\delta^3}{\nu_{\text{в}}^2}, \quad (14)$$

произведение  $(Gr \cdot Pr)_{\text{в}}$ , и выбрав формулу для расчета коэффициента  $\epsilon_{\text{к}}$ , определить эквивалентный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{экв}}$  и рассчитать тепловой поток через воздух  $Q_{\text{к}}$  (7). В формуле (8)  $\delta = 0,5(d_2 - d_1)$  – толщина воздушной прослойки.

По формуле (6) определяется тепловой поток излучением  $Q_{\text{л}}$ ,

Значение коэффициента теплоотдачи излучением

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{л}}}{F_1 \Delta T}, \quad (15)$$

где  $F_1 = \pi d_1 l$  – площадь излучающей поверхности.

Результаты расчета следует свести в табл.2.

Далее следует оценить, в какой мере полученные опытные данные согласуются с теорией. Для этого нужно найти значение множителя  $A$  в

критериальном уравнении, характеризующем теплоотдачу при свободном движении воздуха (см. лабораторную работу 2)

$$Nu = A(Gr \cdot Pr)^{0.25} \left( \frac{Pr_B}{Pr_c} \right)^{0.25} \quad (16)$$

Значение критерия Нуссельта находится по определяющей формуле  $Nu = \frac{\alpha_k \delta}{\lambda_B}$ , коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k$  рассчитывается аналогично  $\alpha_l$ .

При хорошем согласии с теорией коэффициент  $A \approx 0,5$ .

Таблица 2

Расчет коэффициента теплоотдачи излучением

	Величины			Номер опыта	
				1	2
1	Мощность нагревателя	$Q_n$	$Вт$		
2	Температура теплоотдающей поверхности	$t_{гор}$	$^{\circ}C$		
3	Температура тепловоспринимающей поверхности	$t_{хол}$	$^{\circ}C$		
4	Средняя температура воздуха	$t_{с}$	$^{\circ}C$		
5	Коэффициент теплопроводности	$\lambda_{с}$	$Вт/м \cdot K$		
6	Коэффициент кинематической вязкости	$\nu_{с}$	$м^2/с$		
7	Коэффициент объемного расширения	$\beta_{с}$	$K^{-1}$		
8	Критерий Прандтля	$Pr_{с}$			
9	Критерий Грасгофа	$Gr$			
10	Произведение	$Pr \cdot Gr$			
11	Эквивалентный коэффициент теплопроводности	$\varepsilon_k$	$Вт/м \cdot K$		
12	Тепловой поток конвекцией и теплопроводностью	$Q_k$	$Вт$		
13	Тепловой поток излучением	$Q_l$	$Вт$		
14	Коэффициент теплоотдачи излучением	$\alpha_l$	$Вт/м^2 \cdot K$		
15	Критерий Прандтля при температуре теплоотдающей поверхности	$Pr_{cm}$			
16	Коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha_k$	$Вт/м^2 \cdot K$		
!7	Критерий Нуссельта	$Nu$			
18	Коэффициент в уравнении (16)	$A$			

#### 4.3. Проверка закона Стефана-Больцмана.

Температуры, до которых нагревается внутренний цилиндр (200 -

300°С), еще не приводит к значительному изменению оптических свойств его поверхности, следовательно, степень черноты практически остается неизменным во всех опытах.

В нашем эксперименте горячее тело с температурой  $T_{гор}$  (внутренний цилиндр) полностью окружено холодным телом, имеющим температуру  $T_{хол}$  (внешний цилиндр). Горячее тело не только излучает тепловую энергию, но и поглощает. Используя равенство степени черноты и поглощательной способности, можно записать, что суммарный тепловой поток излучением горячего тела

$$Q_{л} = \varepsilon_1 c_0 F_1 \left[ \left( \frac{T_{гор}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{хол}}{100} \right)^4 \right] \quad (17)$$

и отношение лучистых потоков в разных опытах

$$\frac{Q_{л1}}{Q_{л2}} = \frac{\left[ \left( \frac{T_{гор1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{хол1}}{100} \right)^4 \right]}{\left[ \left( \frac{T_{гор2}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{хол2}}{100} \right)^4 \right]}. \quad (18)$$

Левая и правая части уравнения (18) должны получиться примерно одинаковыми.

### 5. Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Схема установки.
- Таблицы измеренных данных.
- Таблицы расчетных величин.
- Расчетные значения коэффициентов теплоотдачи
- Проверка закона Стефана-Больцмана
- Выводы.

### Контрольные вопросы.

1. Можно ли используя результаты эксперимента определить коэффициент теплоотдачи излучением для поверхности внешней трубы?
2. Определите коэффициент черноты поверхностей внутренней и внешней труб.
3. Рассчитайте, на какую частоту приходится максимум теплового излучения поверхностей, участвующих в теплообмене.
4. Оцените погрешность определения коэффициента теплоотдачи излучением.
5. Найдите плотность потока солнечного излучения  $E_c$  вблизи Земли за пределами атмосферы считая поверхность Солнца абсолютно черным телом. Температура на поверхности Солнца  $T=6000$  К, диаметр Солнца  $D=1,391 \cdot 10^6$  км, расстояние от Земли до Солнца  $l=149,5 \cdot 10^6$  км.
6. Чему равна степень черноты серого тела и плотность собственного излучения  $E_{соб}$  при температуре 300°С, если при плотности потока падающего излучения  $E_{пад}=60$  Вт/м<sup>2</sup> поглощается  $E_{погл}=48$  Вт/м<sup>2</sup>?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8.

### Определение углового коэффициента излучения методом светового моделирования

#### 1. Цель работы.

Используя метод светового моделирования, определить средний угловой коэффициент излучения плоскости на ряд длинных параллельных труб. Сравнить полученное в эксперименте значение углового коэффициента излучения с теоретическим.

#### Задание по выполнению лабораторной работы

1. На основе измерения интенсивности светового излучения проходящего через ряд трубных поверхностей рассчитать интегральный (средний) угловой коэффициент излучения используя метод планиметрии.

2. Подготовить отчет по лабораторной работе, включив график по освещенности на миллиметровке для применения метода планиметрии.

#### 2. Краткие теоретические сведения.

Поскольку тепловое излучение, так же как и свет, представляет собой электромагнитные волны, к нему применимы все законы оптики и оптические конструкции, изучающие распространение света, могут быть хорошими моделями изучения тепловых потоков.

В системе, состоящей из нескольких тел, непрерывно происходит теплообмен излучением между телами. Для учета той части потока излучения от поверхности (или элементарной площадки) одного тела, которая попадает на поверхность другого тела, используют понятие **углового коэффициента излучения**. Если рассматривают поток излучения от элементарной площадки одного тела на всю поверхность другого, угловой коэффициент излучения называется **локальным**, а когда – от всей поверхности одного тела на всю поверхность другого, угловой коэффициент называется **средним**.

По определению (см. выше), средний угловой коэффициент излучения  $\varphi_{ik}$  – отношение потока излучения  $Q_{ik}$  от поверхности  $F_i$  на поверхность  $F_k$  к полному потоку собственного полусферического излучения  $Q_i$ , выходящему с  $F_i$

$$\varphi_{ik} = \frac{Q_{ik}}{Q_i} \quad (1)$$

Угловые коэффициенты излучения обладают рядом свойств: свойство взаимности – для любой произвольно взятой пары тел с поверхностями  $F_i$  и  $F_k$  имеет место равенство

$$\varphi_{ik}F_i = \varphi_{ki}F_k$$

свойство замкнутости

$$\sum_{k=1}^n \varphi_{ik} = 1.$$

В лабораторной работе исследуется поток излучения плоскости на

пучок труб. Средний угловой коэффициент излучения неограниченной плоскости (тело 1) на однорядный пучок труб (тело 2), параллельный плоскости [1]

$$\varphi_{12} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{s}\right)^2} + \frac{d}{s} \operatorname{arctg} \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр труб,  $s$  – шаг расположения труб (расстояние между осями).

### 3. Лабораторная установка.

Лабораторная установка, моделирующая исследование теплового излучения, представляет собой (рис.1) камеру, разделенную матовым светорассеивающим стеклом 3 на две части.

В одной части камеры расположены электрические лампы 2, питающиеся от автотрансформатора 1. Ручка автотрансформатора выведена на лицевую панель стенда. Изменением напряжения питания лампы моделируется мощность потока излучения.

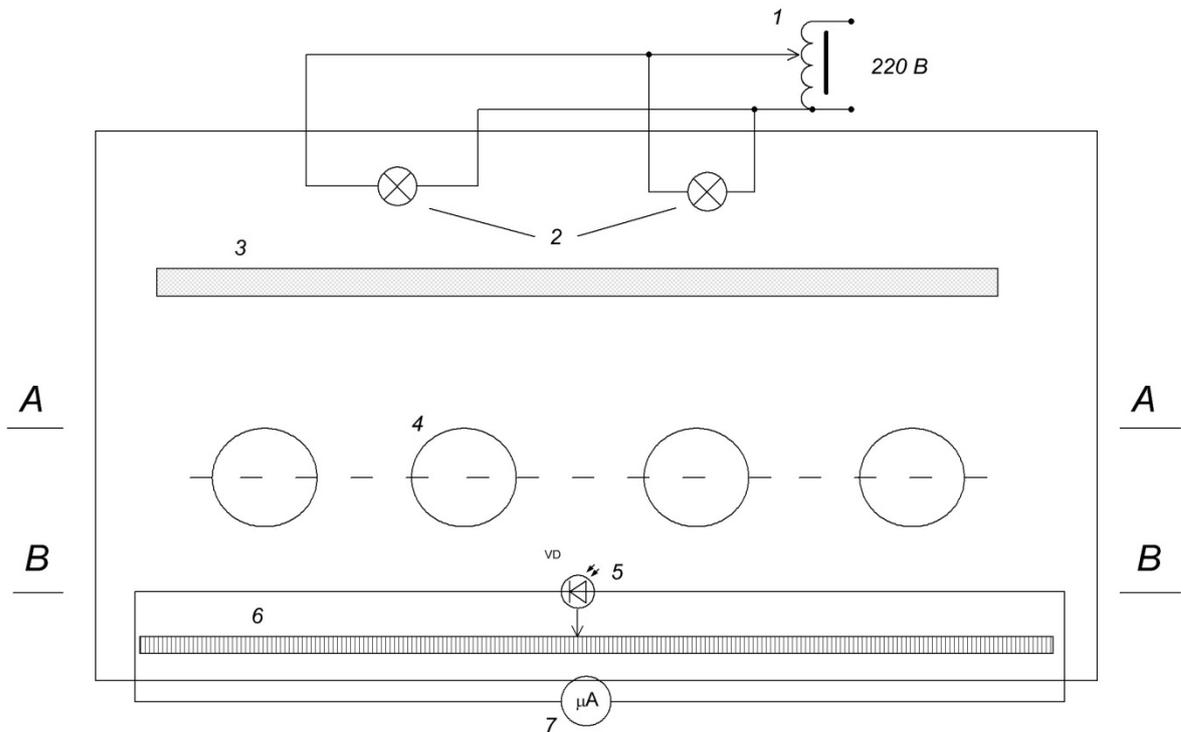


Рис.1. Схема лабораторной установки. 1 – автотрансформатор, 2 – электрические лампы, 3 – матовое стекло, 4 – ряд параллельных труб, 5 – фотодиод, 6 – мерительная линейка, 7 – микроамперметр.

В другой части камеры – шесть параллельных труб 4. Трубы покрыты черной краской для достижения эффекта абсолютно черного тела. Внешний диаметр труб  $d=25$  мм, расстояние между осями труб (шаг)  $s=45$  мм. Матовое стекло моделирует светоизлучающую во всех направлениях с одинаковой интенсивностью плоскость.

Для регистрации светового потока предназначен фотодиод Ф256 (5) чувствительностью  $0,6$  мкА/лк. Ток короткого замыкания фотодиода, прямопропорциональный плотности светового потока, измеряется микроам-

перметром 7. Фотодиод можно перемещать вдоль плоскости измерения В – В, положение фотодиода фиксируется координатной линейкой 6.

Также предусмотрена возможность перемещения фотодиода на уровень плоскости касательной к трубам наиболее близкой к излучающей модельной поверхности плоскость А – А (см. рис.1).

#### **4. Порядок выполнения работы.**

##### **4.1. Проведение эксперимента.**

– Тумблером на лицевой панели установки включить питание.

– Автотрансформатором подать напряжение на лампы не более 120В по вольтметру, установленному на панели.

– Выждать порядка 5 минут для того, чтобы в системе установилось тепловое и световое равновесие.

– Произвести измерения интенсивности падающего излучения на уровне плоскости В – В, расположенной за трубами по отношению к источнику, в фиксированных точках, перемещая датчик вдоль измерительной линейки. Желательный шаг измерения – 0,5 см. Интенсивность падающего излучения (I) измеряется стрелочным микроамперметром в относительных единицах – эта величина является аналогом плотности потока излучения  $Q_{12}$ . Результаты измерений занести в табл. 1.

– Параллельно измерить интенсивность падающего излучения на уровне плоскости, касательной трубам (плоскость А – А). Для этого в координатах, соответствующих середине межтрубного пространства, датчик следует вводить в глубь прибора на уровень плоскости А – А.

*Замечание.* Для бесконечной излучающей плоскости интенсивность излучения в любой точке плоскости А – А будет одинакова. В реальном же эксперименте с ограниченной излучающей плоскостью интенсивность излучения будет зависеть от координаты (см. рис.2).

– Изменить уровень освещенности, уменьшив напряжение питания лампы примерно на 10%, и произвести повторные измерения. Рекомендуется провести 3 опыта при разных световых интенсивностях.

Таблица 1.

## Измерение интенсивности излучения

Координата х, см	Световой поток I, о.е.					
	Опыт 1		Опыт 2		Опыт 3	
	плоскость В – В, I <sub>12</sub>	плоскость А – А, I <sub>1</sub>	плоскость В – В, I <sub>12</sub>	плоскость А – А, I <sub>1</sub>	плоскость В – В, I <sub>12</sub>	плоскость А – А, I <sub>1</sub>
11,0		-		-		-
11,5		-		-		-
12,0		-		-		-
12,5		-		-		-
13,0		-		-		-
13,5		измерить		измерить		измерить
14,0		-		-		-
14,5		-		-		-
15,0		-		-		-
15,5		-		-		-
16,0		-		-		-
16,5		-		-		-
17,0		-		-		-
17,5		-		-		-
18,0		измерить		измерить		измерить
18,5		-		-		-
19,0		-		-		-
19,5		-		-		-
20,0		-		-		-
20,5		-		-		-
21,0		-		-		-
21,5		-		-		-
22,0		-		-		-
22,5		измерить		измерить		измерить
23,0		-		-		-
23,5		-		-		-
24,0		-		-		-
24,5		-		-		-
$Q_I$						
$Q_B$						
$\varphi_{12экс}$						
$\varphi_{12теор}$						

**4.2. Обработка результатов измерения.**

По результатам эксперимента следует построить графики изменения фактического уровня освещенности на уровне плоскостей А – А и В – В (рис.2).

Для определения  $Q_I$  (в относительных единицах) в формуле (1) следует рассчитать площадь под кривой освещенности для плоскости А – А

$$Q_1 = \int_{x_1}^{x_2} I_{AA} dx.$$

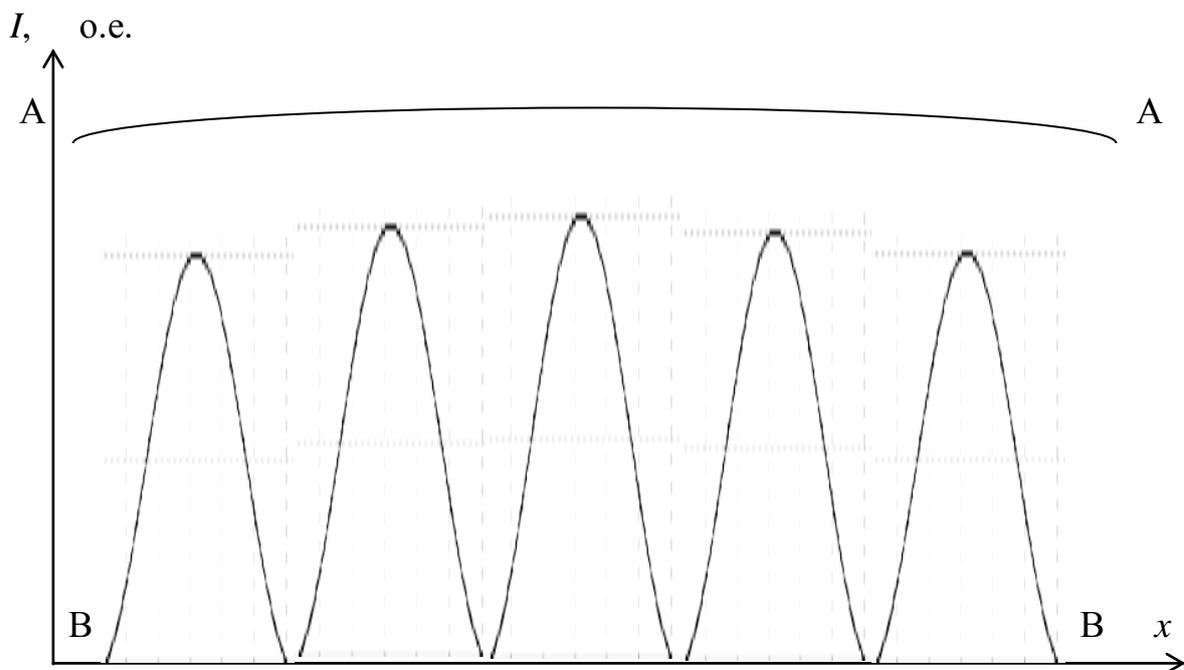


Рис.2. Примерный график зависимости интенсивности светового потока от координаты. Пики графика соответствуют положению между трубами, а впадины – за трубами.

Для определения  $Q_{I2}$  следует сначала определить световое излучение, не задержанное трубами – площадь под кривой освещенности на уровне плоскости В – В

$$Q_B = \int_{x_1}^{x_2} I_{BB} dx,$$

а затем  $Q_{I2}$  определить как разность  $Q_{I2} = Q_I - Q_B$ ,

Далее по формуле (1) находится угловой коэффициент излучения, полученный в эксперименте  $\varphi_{I2экс}$ .

Интегрирование следует проводить графически, выбрав интервал, кратный шагу расположения труб и включающий 2 – 3 трубы. При определении площади рекомендуется разбить фигуры на простые, площади которых легко считаются - прямоугольник, трапецию, треугольник, фигура, ограниченная параболой.

Теоретическое значение углового коэффициента излучения определяется по формуле (2).

Далее следует сравнить экспериментальные и теоретические значения углового коэффициента и объяснить возможное различие.

## 5. Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Схема установки.
- Таблицы измеренных данных.
- Графики изменения интенсивности светового потока.
- Расчетные значения углового коэффициента излучения.
- Выводы.

### **Контрольные вопросы.**

1. Покажите, что экспериментальная установка является хорошей моделью для изучения теплообмена излучением между двумя телами.
2. В чем разница между локальным и средним угловым коэффициентом?
3. Используя свойство взаимности для одного из опытов по значению  $\varphi_{12экc}$  определите значение углового коэффициента излучения  $\varphi_{21}$ .
4. Используя принцип взаимности и формулу (2), выведите формулу для расчета углового коэффициента излучения однорядного пучка труб на бесконечную плоскость  $\varphi_{21}$ .
5. Поясните метод нитей для определения углового коэффициента излучения.

## Правила оформления отчета

Текстовая часть отчета должна быть написана на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (297x210). Текст отчета печатается на принтере через полтора межстрочных интервала. Шрифт – 14, Times New Roman. Выравнивание – по ширине.

Заголовки разделов печатаются прописными буквами, шрифт 14, полужирный; подзаголовки строчными с заглавной буквы, шрифт 14, полужирный.

Текст отчета следует писать, соблюдая следующие размеры полей: левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее – 20 мм, нижнее – 15 мм.

Опечатки и графические неточности, обнаруженные в отчете в процессе оформления или проверки ее руководителем практики, допускается исправлять подчисткой или закрашиванием белой специальной краской и нанесением на том же месте исправленного текста черной тушью (чернилами) рукописным или машинописным способом. При внесении поправок количество строк на странице не должно меняться. На одной странице допускается не более 5 поправок.

При написании текста отчета необходимо добиваться наиболее точного, законченного и в то же время наиболее простого и понятного построения фраз с соблюдением правил орфографии и пунктуации русского языка.

На протяжении всего текста должно строго соблюдаться единообразие терминов, обозначений, условных сокращений и символов. Не допускается применять одинаковые термины и обозначения для различных понятий без указания их смыслового значения.

При выполнении расчетов предпочтительно должна использоваться международная система единиц измерения - СИ (ГОСТ 8.417-81; СТ СЭВ 1052-78). При пользовании других единиц измерения, желательно значения величин переводить в систему СИ.

В текстовой части отчета допускаются следующие сокращения русских слов и словосочетаний согласно ГОСТ 7.12-77, ГОСТ 7.11-78 и ГОСТ 2.316-68: общепринятые сокращения словосочетаний, например: т.е. (то есть), и т.д. (и так далее), и т.п. (и тому подобное), и др. (и другие), и пр. (и прочие); буквенные аббревиатуры, например: РФ, УдГУ, ВУЗ; сокращения без гласных, например: млн., млрд; сложные термины, например: коэффициент полезного действия – КПД, центр тяжести – ц.т. (пишутся строчными буквами с точками), специальные сокращения, т.е. принятые в определенных областях науки и техники.

Не допускаются сокращения: т.к. – так как, т.н. – так называемый, т.о. – таким образом, напр. – например, ф-ла – формула, ур-е – уравнение, и др.

Сокращения, не являющиеся общепринятыми, рекомендуется применять лишь при частом повторении их в тексте. Допускается при первом

упоминании писать полное слово и в скобках – сокращенное.. В дальнейшем можно применять сокращенное их написание без скобок.

Математические знаки ( $=$ ,  $>$ ,  $<$  и т.п.) следует применять лишь в формулах. Не допускается употребление в тексте символов и условных обозначений без словесной расшифровки, например, следует писать: «температура повышается на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ », а не «Т повышается на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ».

Знаки %,  $\sin$ ,  $\lg$  и т.д. применяют только при цифровых или буквенных величинах ( $45\%$ ,  $\sin \alpha$ ,  $\lg t$  и т.д.)

При изложении текста необходимо придерживаться официальной терминологии.

Текстовая часть отчета (там, где это необходимо для ясности) должна иллюстрироваться по тексту аккуратно выполненными схемами, эскизами, чертежами, фотографиями.

Эскизы, схемы и чертежи в отчете выполняются с помощью компьютера в графическом редакторе или с помощью чёрных чернил (пасты) и линейки, аккуратно, в соответствии с требованиями на выполнение эскизов.

Титульный лист, листы текста, иллюстрации, таблицы и приложения должны быть надежно сшиты и должны иметь обложку.

### *Рубрикация текста, нумерация страниц, содержание*

Текст отчета должен разделяться на разделы, подразделы (вопросы раздела), пункты (дробные части вопросов раздела).

Разделы и подразделы нумеруются арабскими цифрами с точкой в конце. Разделы нумеруются в пределах всего отчёта, а подразделы – в пределах каждого раздела. Если раздел имеет, например, номер 2, то подраздел нумеруется как 2.1. – первый подраздел второго раздела. Введение и заключение не нумеруются.

Пункты нумеруются также арабскими цифрами. В этом случае добавляется номер пункта, например: 3.1.2. – второй пункт первого подраздела третьего раздела.

Разделы, подразделы и пункты должны иметь заголовки, кратко и ясно характеризующие содержание следующего за ними текста. Заголовки разделов пишутся симметрично тексту прописными буквами; заголовки подразделов и пунктов – строчными (кроме первой прописной). В конце заголовка точку не ставят.

Подчеркивать заголовки и переносить слова в заголовках не допускается. Расстояние между заголовком и последующим текстом должно быть равно 8-10 мм, а расстояние между заголовком и последней строкой предыдущего текста (для тех случаев, когда конец одного и начало другого подразделов или пунктов размещаются на одной странице) – 15-17 мм.

Нумерация страниц отчета должна быть сквозной: первой страницей является титульный лист, второй – содержание и т.д.

Номер страницы проставляется цифрами в правом верхнем углу без точки и черточек. На первой странице (титульный лист) номер страницы не ставят. Список использованных источников и приложения необходимо включать в сквозную нумерацию.

Иллюстрации (таблицы, чертежи, схемы, графики), которые располагаются на отдельных страницах отчета, также включаются в общую нумерацию страниц. Иллюстрации, размеры которых больше формата А4, учитывают как одну страницу.

Перечисления требований, указаний, положений, содержащиеся в тексте подраздела или пункта, обозначаются арабскими цифрами со скобкой, например: 1), 2) и т.д. и записываются с абзаца.

В содержании последовательно перечисляют заголовки разделов, подразделов, пунктов и приложений и указывают номера страниц, на которых они помещены. Содержание должно включать все заголовки, имеющиеся в отчете.

### *Оформление иллюстраций (рисунков)*

Количество иллюстраций в отчете определяется их содержанием и должно быть достаточным для того, чтобы придать излагаемому тексту ясность и конкретность.

В отчете все иллюстрации, независимо от их содержания (чертеж, схема, график, и т.д.) именуется рисунками. Рисунки нумеруются последовательно в пределах всей записки арабскими цифрами (знак № перед цифрой не ставится). Слово «рисунок» пишется на иллюстрации сокращенно, например: Рис. 2.

Эскизы и схемы допускается вычерчивать в произвольном масштабе.

Все рисунки должны иметь наименование (заголовки). Наименование рисунка должно быть кратким и соответствовать содержанию. Заголовок пишется под рисунком с прописной буквы. Если рисунок имеет поясняющие данные, то их оформляют под рисуночным текстом. Номер иллюстрации располагают ниже поясняющей надписи.

В тексте при ссылках на номер рисунка его следует писать сокращенно, например: рис.5, рис.6 и т.д. Рисунки должны размещаться сразу после ссылки на них в тексте записки.

Повторные ссылки на рисунки следует давать с сокращенным словом «смотри», заключенными в круглые скобки, например: (см. рис.3)

Рисунки следует размещать так, чтобы их можно было рассматривать без поворота записки. Если такое размещение невозможно, рисунки располагают так, чтобы для их рассмотрения надо было повернуть текст отчета по часовой стрелке. Допускается на одном листе помещать два рисунка.

На графиках экспериментальных кривых обязательно нанесение точек, соответствующих экспериментальным данным. На графиках расчетных кривых и усредненных значений такие точки не ставятся.

При оформлении рисунков не допускается переносить слова, подчеркивать и ставить точку в конце наименования (заголовка), а также писать прямо на графике обозначения кривых и прочие данные.

### *Оформление таблиц*

Цифровой материал, помещаемый в отчет, как правило, оформляется в виде таблиц. Таблицу размещают после первого упоминания о ней в тексте отчета таким образом, чтобы ее можно было читать без поворота отчета или с поворотом по часовой стрелке. Таблицы должны нумероваться в пределах всего отчета арабскими цифрами (без знака № перед цифрой).

Надпись «Таблица» с указанием порядкового номера помещается над правым верхним углом таблицы, например: Таблица 1, Таблица 2.

Каждая таблица должна иметь содержательный заголовок. Заголовки помещают под словом «Таблица». Слово «Таблица» и заголовок начинают с прописной буквы. Заголовки не подчеркивают.

Заголовки граф таблицы должны начинаться с прописных букв и иметь размерность величин. Размерность при числах в строках таблицы не допускается. Числовые значения в одной графе должны иметь одинаковое количество десятичных знаков.

Подзаголовки граф таблицы должны начинаться со строчных букв, если они составляют продолжение заголовка, и с прописных, если они самостоятельные.

Высота строк в таблице должна быть не менее 8мм. Не следует в таблице включать графу «№№ п.п.». Делить головку таблицы по диагонали не допускается. Если в графе текст состоит из одного слова, его допускается заменять кавычками. Если повторяющийся текст состоит из двух и более слов, то при первом повторении его заменяют словом «то же», а далее кавычками. Ставить кавычки вместо повторяющихся цифр, знаков, математических символов не допускается. Если цифровые или иные данные в какой-либо строке таблицы не приводят, то в ней ставят прочерк.

При переносе таблицы на следующую страницу отчета, заголовок таблицы следует повторить и над ней написать «Таблица 5 (продолжение)». Если заголовок таблицы громоздкий, допускается его не повторять. В этом случае пронумеровываются графы и повторяют их нумерацию на следующей странице. Заголовок таблицы не повторяют.

Таблицы с большим количеством граф допускается делить на части и помещать одна под другой в пределах одной страницы. Если строки или графы выходят за формат таблицы, то в первом случае в каждой части таблицы повторяется ее заголовок.

В отчете при ссылке на таблицу указывают ее номер и слово «Таблица» пишут в сокращенном виде, например: табл.5, табл. 5 и 6. Повторные ссылки на таблицу следует давать с сокращенным словом «смотри», например: (см. табл. 5, см. табл. 5 и 6).

Если отчет содержит один рисунок и одну таблицу, то номер им не присваивается и слово «Рис.» под рисунком и «Таблица» над таблицей не пишутся.

### *Оформление расчетных формул*

Изложение расчетного материала рекомендуется вести от первого лица множественного числа, например: преобразуем, вычисляем, определяем и т.д. При этом может быть использована и неопределенная форма, например: принимается, определяется и т.д.

Уравнения и формулы не должны смешиваться с текстом отчета и пишутся на середине строки, а связующие их слова (следовательно, откуда, так как, или) - в начале строки.

Выше и ниже каждой формулы должно быть оставлено не менее одной свободной строки. Если формула (уравнение) не уместится в одну строку, то она переносится на следующую строку после знака (=) или после знаков (+), минус (-), умножения (x), деления (:). Эти знаки проставляются в конце одной строки и в начале следующей.

Формулы в пределах всего отчета нумеруются арабскими цифрами. Номер формулы следует заключать в скобки и помещать на правом поле, на уровне нижней строки формулы, к которой она относится. В многострочной формуле номер ставится против последней строки.

Размерность формулы (если она необходима) в скобки не заключается, отделяется от нее пробелом, например,

$$K_{np} = \frac{Q}{\Delta p_{nl}}, \text{ м}^3/\text{сут} * \text{МПа}.$$

При использовании формулы в первый раз необходимо записать ее в буквенном виде, и затем дать полную расшифровку входящих в нее величин.

Пояснение буквенных значений и символов следует проводить непосредственно под формулой в той же последовательности, в какой они даны в формуле. Первую строку объяснения начинают со слова «где», и запятую после него не ставят.

Пояснение каждого символа следует давать с новой строки, отделяя его размерность от текста запятой и заканчивая точкой с запятой. После последней расшифровки ставится точка.

Пример оформления формулы:

$$PV = mRT$$

где P- абсолютное давление, Па; T – абсолютная температура, К

$R$  – газовая постоянная, кДж/(кг×К);  $V$  – объём газа, м<sup>3</sup>;  
 $m$  – масса газа, кг.

Если формула записана в СИ, то размерность входящих в нее величин не указывается.

При подстановке в формулу числовых значений расчетных величин их размерность не указывается. Размерность должна обязательно даваться в результирующих числах. Символ и размерность одного и того же параметра должны сохраняться в пределах всего отчета.

Ранее расшифрованные величины повторно не расшифровываются. После расшифровки новых обозначений необходимо писать: «остальные величины известны из предыдущего» или «остальные величины расшифрованы ранее».

Если какая-нибудь формула используется несколько раз подряд, достаточно произвести подстановку числовых значений только один раз, а затем оговорить, что вычисления производятся аналогично, дать результаты расчетов в виде таблицы.

При использовании одной и той же формулы в разных разделах отчета не следует повторно записывать ее в общем виде. Достаточно сделать ссылку на страницу, на которой она записана впервые, или на порядковый номер формулы, например, «диаметр вычисляем по формуле (3)».

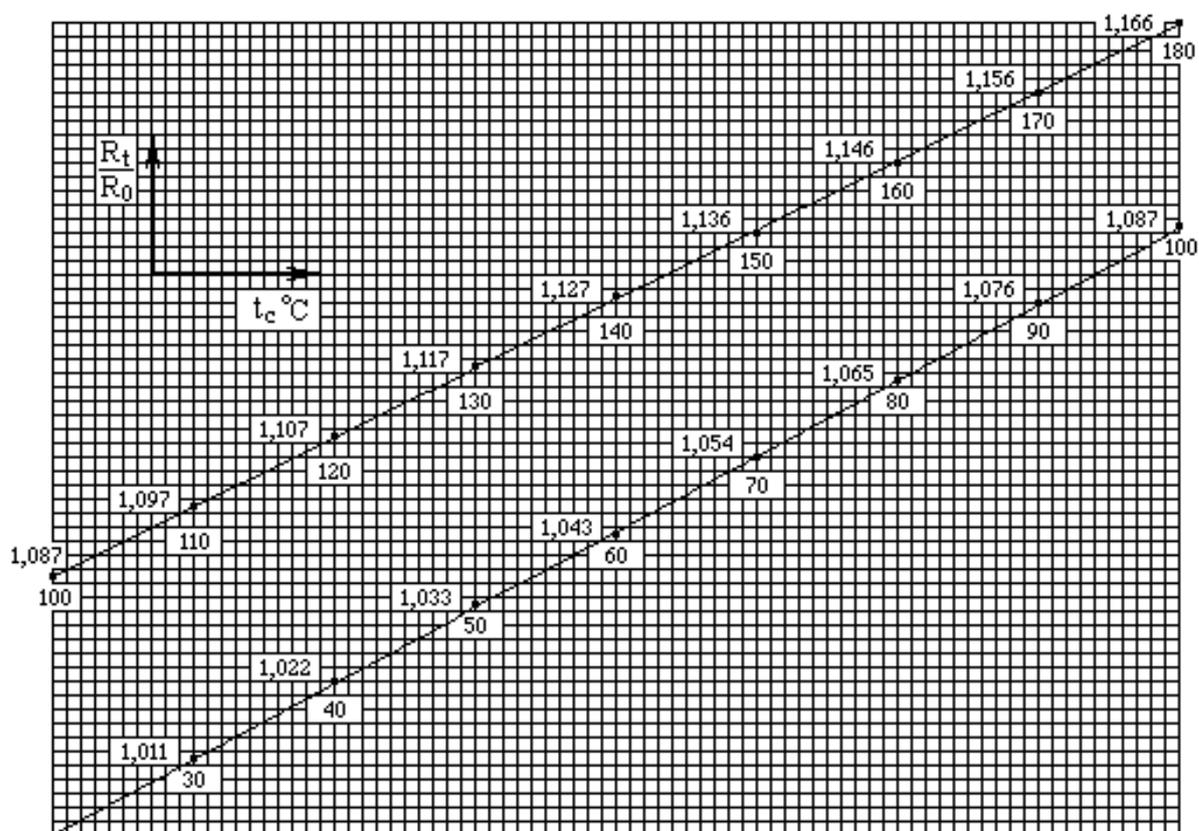
## Список литературы

1. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: Учебное пособие для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2005.
2. Мирам А.О., Павленко В.А. Техническая термодинамика. Тепломассообмен. – М.: Издательство АСВ. 2017.
3. Исаченко В.В., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981
4. Лариков Н.Н. Общая теплотехника. – М. Издательство литературы по строительству. 1966
5. Александров А.А., Зубарев В.Н., Охотин В.С. Практикум по технической термодинамике: Учеб. пособие для вузов, 3-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов. – М.: Энергия, 1973
7. Александров А.А., Ривкин С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980
8. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. М.: Энергия, 1980
9. Кириллин В.А. Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Наука, 1979.

Приложение А.

Таблица перевода термо-эдс хромель-копелевой термопары.

ТЭДС в мВ при температуре свободного конца 0°C										
t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,063	0,127	0,190	0,254	0,318	0,382	0,446	0,510	0,575
10	0,639	0,704	0,768	0,833	0,898	0,963	1,028	1,093	1,159	1,224
20	1,290	1,355	1,421	1,421	1,553	1,619	1,685	1,752	1,818	1,885
30	1,951	2,018	2,085	2,152	2,210	2,286	2,354	2,421	2,488	2,556
40	2,624	2,692	2,759	2,828	2,896	2,964	3,032	3,101	3,169	3,238
50	3,306	3,375	3,444	3,513	3,582	3,652	3,721	3,790	3,860	3,929
60	3,999	4,069	4,139	4,209	4,279	4,349	4,419	4,490	4,560	4,631
70	4,701	4,772	4,843	4,914	4,985	5,056	5,127	5,198	5,270	5,341
80	5,413	5,484	5,556	5,628	5,700	5,772	5,844	5,916	5,988	6,060
90	6,133	6,205	6,278	6,351	6,423	6,496	6,569	6,642	6,715	6,788
100	6,862	6,935	7,008	7,082	7,155	7,229	7,303	7,377	7,451	7,525
110	7,599	7,673	7,747	7,821	7,896	7,970	8,045	8,119	8,194	8,269
120	8,344	8,419	8,494	8,569	8,644	8,719	8,794	8,870	8,945	9,021
130	9,096	9,172	9,248	9,324	9,400	9,476	9,552	9,628	9,704	9,780
140	9,857	9,933	10,010	10,086	10,163	10,239	10,316	10,393	10,470	10,547
150	10,624	10,701	10,778	10,956	10,933	10,010	11,088	11,165	11,243	11,321
160	11,398	11,476	11,554	11,632	11,710	11,788	11,866	11,944	12,023	12,101
170	12,179	12,258	12,336	12,415	12,494	12,572	12,651	12,730	12,809	12,888
180	12,067	13,046	13,125	13,204	13,294	13,363	13,442	13,522	13,601	13,681
190	13,761	13,840	13,920	14,000	14,080	14,160	14,240	14,320	14,400	14,480



Зависимость относительного электрического сопротивления трубы от температуры.

Физические свойства сухого воздуха при давлении  $1.01 \cdot 10^5$  Па.

$t_{ж}, ^\circ C$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$Pr$	$\beta, \text{К}^{-1}$
10	1.247	2.51	20.05	14.16	0.705	$1/T$
20	1.205	2.59	21.42	15.06	0.703	
30	1.165	2.67	22.86	16.00	0.701	
40	1.128	2.76	24.30	16.96	0.699	
50	1.093	2.83	25.72	17.95	0.698	
60	1.060	2.91	27,1	18,97	0.606	
70	1.029	2.97	28,6	20,02	0.694	
80	1,000	3,06	30,1	21,09	0.692	
90	0,972	3,11	32,0	22,10	0.690	
100	0,946	3,22	33,6	23,13	0.688	
120	0,898	3,35	37,0	25,45	0.686	
140	0,854	3,49	40,4	27,80	0.684	
160	0,815	3,64	44,0	30,00	0.682	
180	0,799	3,78	47,6	32,49	0.681	
200	0,746	3,93	51,1	34,85	0.680	
250	0,674	4,37	61,0	40,61	0.677	
300	0,615	4,60	71,6	48,33	0.674	
350	0,566	4,91	81,8	55,46	0.676	
400	0,524	5,21	93,0	63,00	0.678	

**Пример.** Расчет плотности воздуха при температуре  $46^\circ\text{C}$ .

$$\begin{aligned} \rho(46^\circ) &= \rho(40^\circ) + (\rho(50^\circ) - \rho(40^\circ)) \frac{46 - 40}{50 - 40} = \\ &= 1.128 + (1.093 - 1.128) \frac{6}{10} = 1.107 \text{кг/м}^3 \end{aligned}$$

Приложение Г

Физические свойства воды в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$p,$ <i>бар</i>	$c_p,$ <i>кДж/(кг·град)</i>	$\rho,$ <i>кг/м<sup>3</sup></i>	$\lambda,$ <i>Вт/м·К</i>	$\nu \cdot 10^6,$ <i>м<sup>2</sup>/с</i>	$Pr$
0	1,013	4,212	999,9	0,551	1,789	13,67
10	1,013	4,191	999,7	0,574	1,306	9,52
20	1,013	4,183	998,2	0,599	1,006	7,02
30	1,013	4,174	995,7	0,618	0,805	5,42
40	1,013	4,174	992,2	0,638	0,659	4,31
50	1,013	4,174	988,1	0,648	0,556	3,54
60	1,013	4,179	983,2	0,659	0,478	2,98
70	1,013	4,187	977,8	0,668	0,415	2,55
80	1,013	4,195	971,8	0,675	0,365	2,21
90	1,013	4,208	965,3	0,680	0,326	1,95
100	1,013	4,220	958,4	0,683	0,295	1,75
110	1,43	4,233	951,0	0,685	0,272	1,60

Приложение Д

Физические свойства сухого насыщенного пара

$p,$ <i>бар</i>	$t,$ <i>°C</i>	$h',$ <i>кДж/кг</i>	$h'',$ <i>кДж/кг</i>	$r,$ <i>кДж/кг</i>
0,95	98,2	411,49	2673,5	2262,0
1,00	99,2	417,51	2675,7	2258,2
1,1	102,32	428,84	2680,0	2251,2
1,2	104,81	439,36	2683,8	2244,4
1,3	107,13	449,19	2687,4	2238,2
1,4	109,32	458,42	2690,8	2232,4

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФГБОУ ВО «УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**

**Институт нефти и газа  
Кафедра «Теплоэнергетика»**

**ОТЧЕТ  
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

-----**(наименование и №)**-----

По дисциплине: Теплообмен.

Лабораторный практикум.

**Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
профиль «Тепловые электрические станции»**

Студента группы \_\_\_\_\_ ФИО

Руководитель практикума \_\_\_\_\_ ФИО

Отчет проверил «\_\_» \_\_\_\_\_ 20...г. \_\_\_\_\_

Отчет защищен «\_\_» \_\_\_\_\_ 20...г.  
с оценкой \_\_\_\_\_

Ижевск

20...

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
Лабораторная работа №1. Определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов методом трубы	4
Лабораторная работа №2. Теплоотдача горизонтальной трубы при свободном движении воздуха	9
Лабораторная работа №3. Определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции (метод струны)	16
Лабораторная работа №4. Местная теплоотдача при турбулентном движении воздуха в трубе	24
Лабораторная работа №5. Нестационарная теплопроводность	32
Лабораторная работа №6. Теплопередача в пароводяном теплообменнике	39
Лабораторная работа №7. Определение коэффициента теплоотдачи излучением методом цилиндрической трубы	48
Лабораторная работа №8. Определение углового коэффициента излучения методом светового моделирования	55
Правила оформления отчета	61
Список литературы	67
Приложение А. Таблица перевода термо-эдс хромель-копелевой термопары	68
Приложение Б. Зависимость относительного электрического сопротивления трубы от температуры	69
Приложение В. Физические свойства сухого воздуха при давлении $1.01 \cdot 10^5$ Па	70
Приложение Г. Физические свойства воды на линии насыщения	71
Приложение Д. Физические свойства сухого насыщенного пара	71
Приложение Е. Титульный лист отчета	72

*Учебное издание*

**Бартенев Олег Архипович  
Мезрин Владимир Васильевич  
Жуков Владимир Константинович**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА**  
Лабораторный практикум.  
Часть II. Тепломассообмен.  
Под ред. канд. физ.-мат. наук О.А. Бартенева.

*Авторская редакция*

Подписано в печать 00.00.00. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 0,00. Уч.-изд. л. 0,00.  
Тираж 00 экз. Заказ № 0000.

Издательство «Удмуртский университет»  
426034, Ижевск, Университетская, д. 1, корп. 4, каб. 207  
Тел./факс: + 7 (3412) 500-295 E-mail: editorial@udsu.ru