

**РОСЖЕЛДОР**  
**Государственное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Ростовский государственный университет путей сообщения»**  
**(РГУПС)**

---

Т. Л. Риполь-Сарагоси, А.Б. Кууск, А.М. Елманов

**ТЕПЛОМАССООБМЕН**

Учебно-методическое пособие  
к лабораторным работам

Ростов-на-Дону  
2019

УДК 536.7 : 621.1/(07) + 06

Т. Л. Риполь-Сарагоси Теплообмен : учебно-методическое пособие к лабораторным работам / Т. Л. Риполь-Сарагоси, А.Б. Кууск, А.М. Елманов .  
Рост. гос. ун-т. путей сообщения. – Ростов н/Д, 2019. – 38 с. : ил. Библиогр. : 7 назв.

Учебно-методическое пособие по дисциплине «Термодинамика и теплопередача» включает в себя методические указания к трем лабораторным работам по технической термодинамике и трем лабораторным работам по теплопередаче.

Темы лабораторных работ соответствуют ГОС и рабочей программе по дисциплине, а методические указания к каждой работе содержат краткие сведения по теории вопроса, порядке выполнения работы и примерную последовательность обработки результатов опытов.

Учебно-методическое пособие соответствует предъявляемым требованиям и рекомендованы к изданию.

Рецензент док. техн. наук, проф. В.А. Финоченко (РГУПС)

© Ростовский государственный университет  
путей сообщения, 2019

## Введение

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено для студентов направления 190300.65 Теплоэнергетика и теплотехника. Выполнение лабораторных работ должно расширить и закрепить знания по основным разделам курса «Тепломассообмен», полученные на лекционных занятиях. Пояснения к лабораторным работам предназначены не только для понимания физической природы изучаемых явлений, правильной последовательности выполнения работ и необходимых расчетов, но и для приобретения опыта постановки теплотехнического эксперимента и анализа его результатов.

В лабораторных работах используется имитационное моделирование, позволяющее получить измерительную информацию, аналогичную реальному эксперименту. До выполнения лабораторной работы студент должен ознакомиться с изучаемым процессом или установкой по рекомендуемой литературе, конспекту лекций и настоящему учебно-методическому пособию и подготовить протокол испытаний.

# Лабораторная работа № 1

## Изучение методов и средств измерения температуры

### 1 Цель работы

Изучение наиболее распространенных методов измерения температуры, приобретение практических навыков работы со средствами измерения температуры.

### 2 Пояснения к работе

Под измерением понимается процесс получения опытным путем соотношения между измеряемой величиной и некоторым ее значением, принятым за единицу измерения. Используемые при этом технические средства, имеющие нормированные метрологические характеристики (класс точности, чувствительность, вариация и др.), называются средствами измерения. Ниже приводятся принципиальные схемы и основные характеристики наиболее распространенных средств измерения температуры, которые будут использоваться при выполнении лабораторных работ.

#### 2.1 Средства измерения температуры

Методы измерения температуры разделяются на две группы – контактные и бесконтактные. При использовании контактных методов измерения первичный измерительный преобразователь (термоприемник) помещается непосредственно в среду, температуру которой необходимо измерить. В результате теплообмена между термоприемником и средой происходит выравнивание температур, и это гарантирует точность и достоверность результатов измерения. Если же выравнивания температур по каким-либо причинам не произошло (например, неправильно выбрано место установки, не обеспечен хороший тепловой контакт и т.п.), то реально будет измерена собственная температура термоприемника, а не действительная температура среды. В связи с этим при изучении конструкции средств измерения температуры особое внимание следует уделить выбору правильного способа установки термоприемника.

#### *Термометры стеклянные жидкостные*

Принцип действия жидкостного термометра (рис. 1) основан на различии теплового расширения термометрической жидкости и материала (стекла) резервуара, в который она помещена. В качестве термометрических жидкостей используются ртуть и некоторые органические жидкости (толуол, этиловый спирт и др.).

Ртутные термометры используются для измерения температур в диапазоне  $-35 \dots 600$  °С. Если предел измерения термометра выше 200 °С, то про-

странство над ртутным столбиком заполняется газом (например, азотом) под избыточным давлением. Это делается для того, чтобы исключить возможность закипания ртути. Выпускаются ртутные термометры для точных измерений (погрешность 0,01 – 0,1 °С) и лабораторные (погрешность 1 – 5 °С). При точных измерениях к показаниям ртутного термометра приходится вводить несколько поправок, усложняющих процесс измерения. Тем не менее, возможность непосредственного отсчета температуры и простота конструкции делают ртутный термометр очень удобным для измерения невысоких температур. Недостатки ртутных термометров – довольно большая инерционность, невозможность измерить температуру в данной точке, невозможность представления показаний термометра в виде электрического сигнала.

Термометры с органическими жидкостями используются для измерения температур в диапазоне – 185...300 °С. Они имеют меньшую точность и используются в основном для метеорологических измерений, в сельском хозяйстве и в быту.

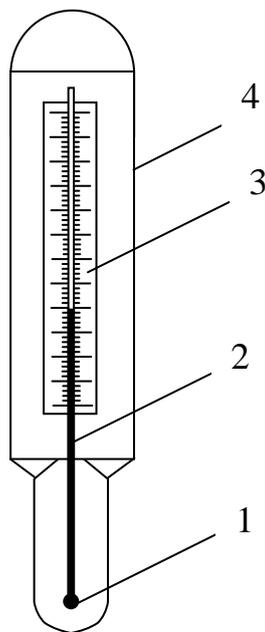


Рис. 1. Стеклянный жидкостный термометр:  
1 – резервуар; 2 – капиллярная трубка; 3 – шкала; 4 – оболочка

### *Термоэлектрические термометры*

Принцип действия этих термометров основан на термоэлектрическом эффекте, открытом Зеебеком в 1821 году. Сущность этого эффекта заключается в следующем: если соединить два проводника из разнородных металлов (А и В) и поддерживать разные температуры мест соединения, то в образовавшейся цепи возникает электрический ток (рис. 2, а). Если цепь разомкнуть (рис. 2, б), то в месте разрыва цепи появляется интегральная электродвижущая сила, величина

которой определяется температурами мест соединения проводников ( $t$  и  $t_0$ ). Это может быть записано в виде:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0), \quad (1)$$

где  $E_{AB}(t, t_0)$  – интегральная термоЭДС;  $e_{AB}(t), e_{AB}(t_0)$  – контактные термоЭДС.

Если температура  $t_0$  поддерживается постоянной, то  $e_{AB}(t_0) = c = const$  и уравнение (1) можно переписать в виде:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - c = F(t). \quad (2)$$

Вид функциональной зависимости (градуировочной характеристики)  $F(t)$  устанавливается опытным путем и представляется в виде таблиц или графиков. В процессе градуировки термоэлектрических термометров температура  $t_0$  поддерживается равной  $0^\circ\text{C}$ .

Конструктивное выполнение термоэлектрических термометров (термоэлектрических преобразователей) определяется условиями их применения. Термоэлектроды, как правило, соединяются сваркой или пайкой, и это соединение образует рабочий конец термометра, который при измерениях должен находиться в тепловом контакте с измеряемой средой. По всей остальной длине термоэлектроды изолируются друг от друга и в таком виде помещаются в защитную гильзу с головкой. Гильза предохраняет термоэлектроды от механических повреждений и вредных воздействий измеряемой среды, а головка обеспечивает соединение термоэлектродов с удлиняющими или соединительными проводами. Свободные концы термоэлектродов, или концы удлиняющих проводов при измерениях должны быть термостатированы.

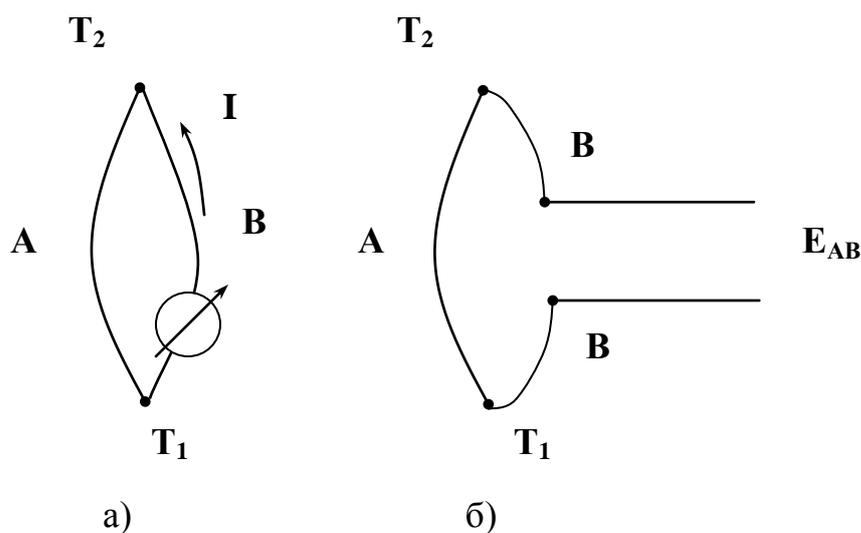


Рис. 2. Схема соединения двух проводников из разнородных материалов: а) замкнутая цепь, б) разомкнутая цепь

В таблице 1 приведены основные характеристики стандартных термоэлектрических термометров.

Таблица 1 – Характеристики стандартных термоэлектрических термометров

Тип термоэлектрического термометра	Материал термоэлектродов	Диапазон измерения температуры, °С	Допускаемая кратковременная температура, °С
ТВР	Вольфрамрений (5 % рения) – вольфрамрений (20 % рения)	0 – 2 200	2 500
ТПР	Платинородий (30 % родия) – платинородий (6 % родия)	300 – 1 600	1 800
ТПП	Платинородий (10 % родия) – платина	0 – 1 300	1 600
ТХА	Хромель – алюмель	– 200 – 1 000	1 300
ТХК	Хромель – копель	– 200 – 600	800
ТМК	Медь – копель	– 200 – 100	100

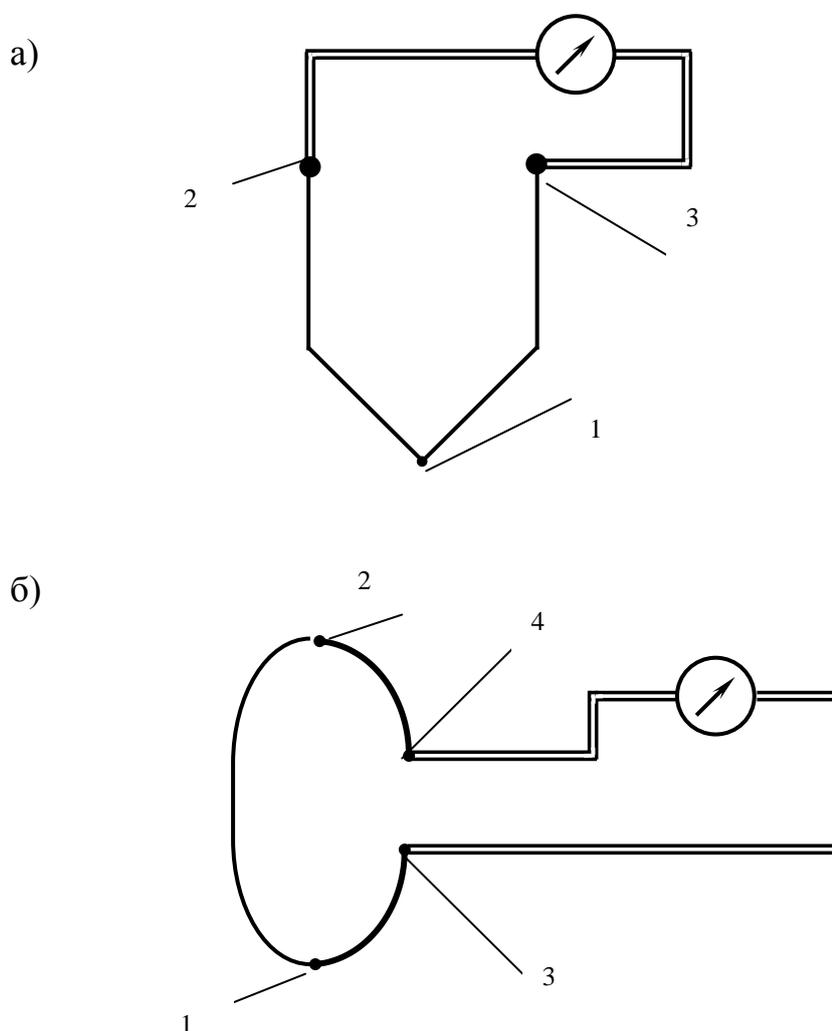


Рис. 3 Схемы подключения термоэлектрического термометра  
 а) термоэлектрический термометр с одним рабочим и двумя свободными концами; б) с одним рабочим, одним свободным и двумя нейтральными концами

При известной градуировочной характеристике измерение температуры сводится к измерению  $E_{AB}(t, t_0)$ , для чего в цепь термоэлектрического термометра включается измерительный прибор (милливольтметр или потенциометр). При включении прибора по схеме, приведенной на рис. 3, а) термоэлектрический преобразователь имеет рабочий конец 1 и два свободных конца 2 и 3, а по схеме на рис. 3, б) – рабочий конец 1, свободный конец 2 и два нейтральных конца 3 и 4. Температуры нейтральных концов термоэлектрического преобразователя в процессе измерения обязательно должны поддерживаться одинаковыми. Свободные концы термометров желательно термостатировать при 0 °С. Если такой возможности нет, то следует защитить свободные концы от воздействия разного рода тепловых потоков (в том числе лучистых), способных изменить их температуру. В этом случае необходимо измерять температуру свободных концов с помощью, например, стеклянного жидкостного термометра, а затем вводить поправку на измеренную температуру, как это показано на рис. 4. Термоэлектрические преобразователи отличаются простотой конструкции и изготовления, малыми размерами рабочего конца (спая), что позволяет измерять температуру почти в точке с высокой точностью и стабильностью. Измерительный сигнал от термоэлектрических преобразователей можно передавать на достаточно большие расстояния.

К недостаткам следует отнести:

- а) необходимость использования специальных удлиняющих проводов;
- б) необходимость термостатирования свободных концов.

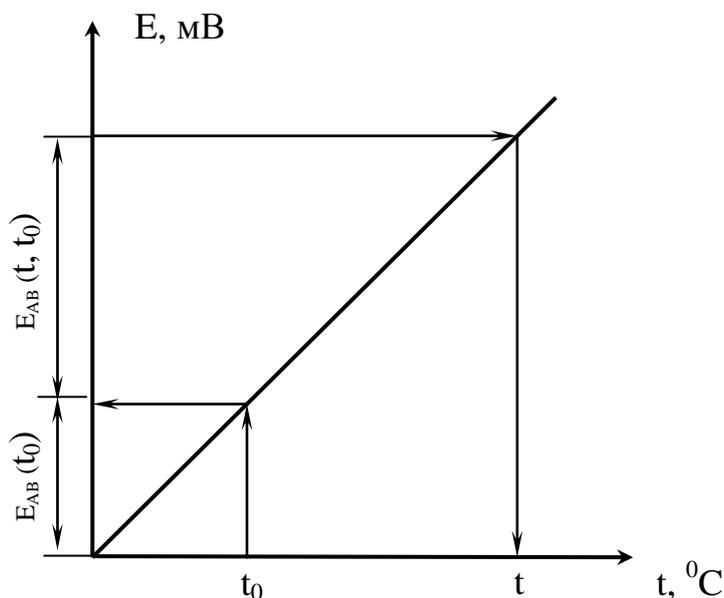


Рис. 4 Градуировочная характеристика термоэлектрического термометра

## Термометры сопротивления

Принцип действия этих термометров основан на свойстве различных материалов (металлов и полупроводников) изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. Конструкция термометра с металлическим термопреобразователем сопротивления приведена на рис. 5. Тонкая проволока или лента 1 из платины или меди наматывается бифилярно на каркас 2 из керамики, слюды, кварца или другого материала. Медная проволока предварительно покрывается эмалевой изоляцией, платиновая проволока либо помещается в тонкие каналы, выполненные на каркасе, и засыпается специальным электроизолирующим порошком, либо каркас вместе с проволокой покрывают слюдой. Каркас для защиты от повреждений помещают в тонкостенную алюминиевую гильзу 3, а для улучшения теплообмена между средой, температура которой измеряется, и термопреобразователем в гильзу устанавливаются упругие металлические пластинки 4. Гильзу с ее содержимым помещают в стальной чехол 5, который устанавливается на объекте измерения с помощью штуцера 6. Выводы от намотки пропускаются через изоляционные бусы 9 и закрепляются в изоляционной колодке 7, размещенной в соединительной головке 8.

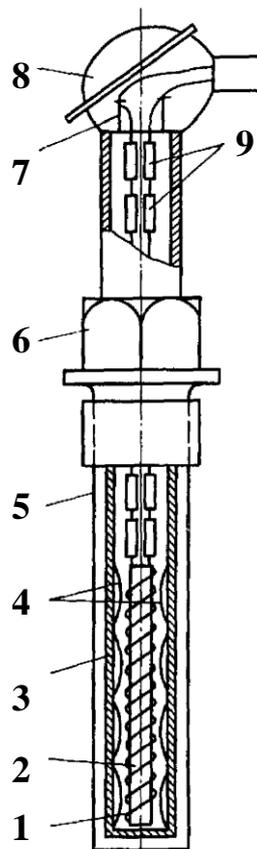


Рис. 5 Конструкция термометра сопротивления:

- 1 – проволока; 2 – каркас; 3 – алюминиевая гильза; 4 – упругие металлические пластинки; 5 – стальной чехол; 6 – штуцер; 7 – изоляционная колодка;
- 8 – соединительная головка; 9 – изоляционные бусы

Через эти выводы термопреобразователь сопротивления подключается к измерительному прибору (измерительный мост, логометр или другой нормирующий преобразователь).

Платиновые термопреобразователи сопротивления являются наиболее точными первичными преобразователями в том диапазоне температур, где они могут быть использованы ( $-260 \dots 1100$  °С). С помощью платинового термометра осуществляется воспроизведение международной шкалы температур в диапазоне от  $-182,97$  до  $630,5$  °С. Медные термопреобразователи сопротивления предназначены для измерения температур в диапазоне от  $-50$  до  $200$  °С и используются в основном как рабочие термометры.

К достоинствам термометров сопротивления следует отнести высокую точность и стабильность, возможность измерять криогенные температуры. К недостаткам можно отнести большие размеры чувствительного элемента, что затрудняет измерение температуры в ограниченном пространстве или точке поверхности.

## **Лабораторная работа №2**

### **Определение коэффициента теплопроводности твердого конструкционного материала методом пластины**

#### **1 Цель работы**

Экспериментальное изучение закономерностей процессов переноса теплоты теплопроводностью в твердых телах.

#### **2 Пояснения к работе**

В лабораторной работе используется имитационное моделирование процессов теплообмена теплопроводностью в твердых телах. Такое моделирование основано на основных положениях теории теплопроводности и позволяет получать информацию, аналогичную реальному эксперименту. В данном случае моделирование основывается на методе неограниченного плоского слоя, который часто используется при опытным определении коэффициента теплопроводности низкотеплопроводных материалов. Образец испытуемого материала изготавливается в форме тонкой круглой или квадратной пластины (толщина пластины должна быть в 7 – 10 раз меньше диаметра или стороны квадрата). В процессе опытов на поверхностях пластины должно поддерживаться стационарное, однородное температурное поле. Это обеспечивает распространение теплового потока через пластину в направлении, нормальном к поверхности пластины. Величина теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> может быть определена по формуле:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{cm1} - t_{cm2}) \cdot F, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала пластины, Вт/(м·К);

$\delta$  – толщина пластины, м;

$t_{cm1}$  и  $t_{cm2}$  – температуры на поверхностях пластины, °С;

$F$  – площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>.

Если в процессе опытов измерены  $Q$ ,  $t_{cm1}$ ,  $t_{cm2}$  и известны размеры образца, то из формулы можно определить коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \delta}{(t_{cm1} - t_{cm2}) \cdot F}. \quad (4)$$

Полученное значение коэффициента теплопроводности соответствует средней температуре образца:  $t_{cp} = 0,5 \cdot (t_{cm1} + t_{cm2})$ .

### 3 Порядок проведения опытов

После включения установки в сеть, введения и запуска программы, на видеомониторе высвечивается тема лабораторной работы и отображается схема рабочего участка моделируемой экспериментальной установки (рис. 10). Рабочий участок лабораторной установки состоит из двух фторопластовых образцов 12, выполненных в форме дисков толщиной  $\delta = 5,0$  мм, и диаметром  $d = 140$  мм. Образцы помещены между нагревателем 10 и холодильником 11. Тепловой поток через образцы создается нагревательным элементом с электрическим сопротивлением  $R = 41$  Ом и холодильником со спиральными канавками для интенсификации теплоотдачи к охлаждающей воде. Таким образом, тепловой поток, создаваемый нагревателем, проходит через образцы, а затем поглощается и уносится потоком охлаждающей воды. Для уменьшения потерь через торцы нагревателя предусмотрен теплоизоляционный кожух 9, выполненный из асбоцемента ( $\lambda_k = 0,08$  Вт/м К).

Температуры на внутренних (горячих) и внешних (холодных) поверхностях пластин измеряются с помощью шести хромель - копелевых термоэлектрических термометров. В процессе проведения опытов результаты измерений термоЭДС термометров отображаются на экране видеомонитора.

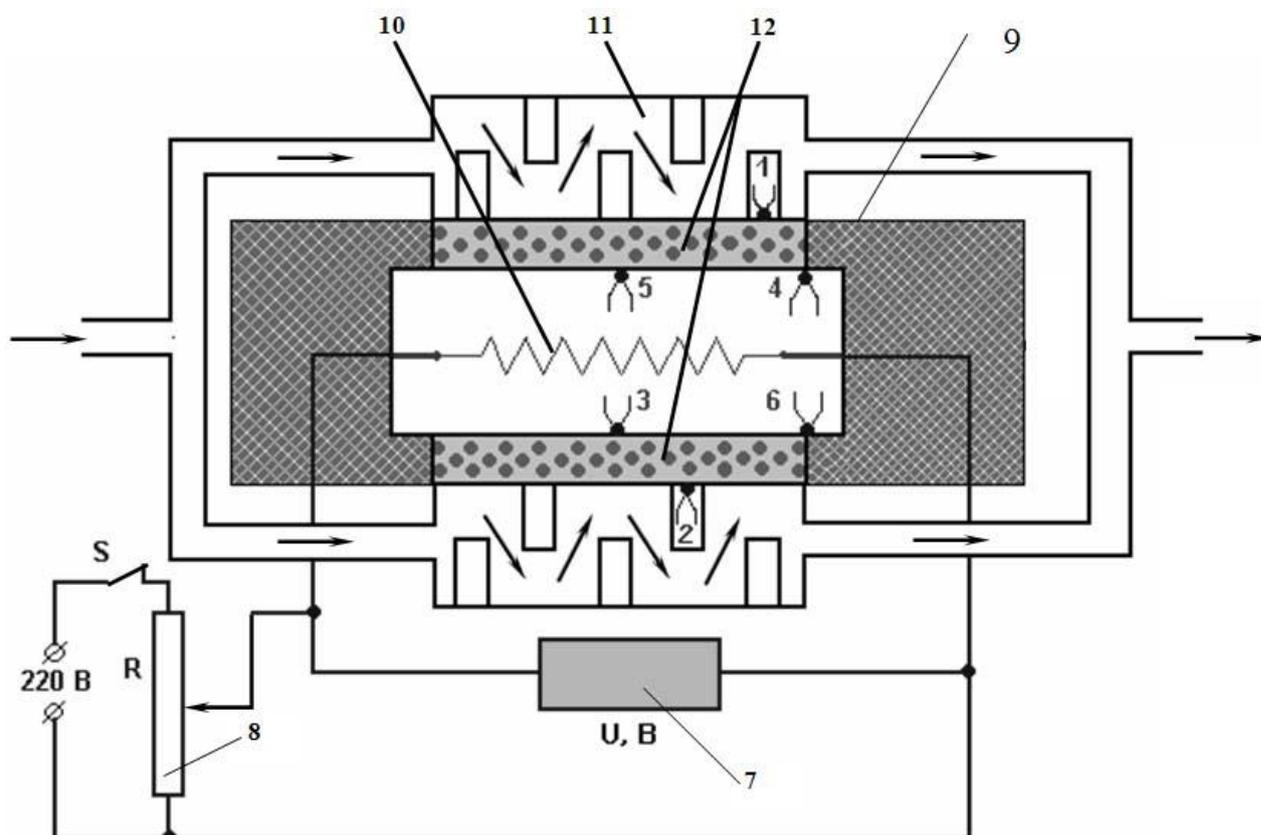


Рис. 10 Схема экспериментальной установки для определения коэффициента теплопроводности

- 1– 6 – термоэлектрические термометры; 7 – вольтметр; 8 – реостат;  
 9 – теплоизоляционный кожух; 10– нагревательный элемент;  
 11 – холодильник; 12 – испытуемые образцы; S – выключатель.

В соответствии с указаниями преподавателя студент задает значение температуры горячей поверхности пластины и начальное (минимальное) напряжение на нагревателе и выполняет измерение термоЭДС термоэлектрических термометров, расположенных на рабочем участке образца. Затем вращением ручки реостата увеличивает напряжение на реостате и повторяет измерение термоЭДС. Таким образом, выполняются измерения на нескольких (4 – 5) режимах. Результаты всех измерений заносятся в протокол испытаний (таблица 3).

Таблица 2 – Протокол эксперимента и результаты обработки данных

№ опыта	U, В	Величина термоЭДС, мВ						$t_2$ , °С	$t_x$ , °С	$t_{cp}$ , °С	$\lambda_1$ , Вт/(м·К)
		$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$				
1											
2											
3											
4											

#### 4 Обработка результатов опытов

Для каждого опыта определяется среднее значение термоЭДС термоэлектрических термометров, расположенных на горячей,  $E_2$  и на холодной,  $E_x$  поверхностях пластины:

$$E_2 = \frac{E_3 + E_4 + E_5 + E_6}{4}, \text{ мВ}; \quad (5)$$

$$E_x = \frac{E_1 + E_2}{2}, \text{ мВ}. \quad (6)$$

На основании стандартной градуировочной характеристики хромель - копелевых термоэлектрических термометров определяются средние температуры горячей и холодной поверхностей образца (полагается, что свободные концы термометров термостатированы при температуре  $0^\circ\text{C}$ ):

$$t_2 = \frac{E_2}{0,0695}, ^\circ\text{C}; \quad t_x = \frac{E_x}{0,0695}, ^\circ\text{C}. \quad (7)$$

Затем определяется опытное значение коэффициента теплопроводности фторопласта:

$$\lambda_i = \frac{Q \cdot \delta}{(t_2 - t_x) \cdot F}, \quad (8)$$

где  $Q = \frac{U^2}{2 \cdot R}$  – тепловой поток, Вт, проходящий через один образец;

$F = \pi \cdot d^2 / 4$  – площадь поверхности одного образца,  $\text{м}^2$ ;

$\delta$  – толщина образца, м.

Так как величина коэффициент теплопроводности зависит от температуры, то полученное значение  $\lambda_i$  следует отнести к средней температуре опытного образца:

$$t_{cpi} = 0,5 \cdot (t_2 + t_x). \quad (9)$$

Аналогично обрабатываются данные, полученные на других режимах, и результаты расчетов заносятся в таблицу 3, а также используются для построения графической зависимости  $\lambda = f(t_{cp})$ . Построение рекомендуется выполнить следующим образом: нанести опытные точки в системе координат  $t - \lambda$  и провести прямую линию наилучшим образом, аппроксимирующую эти точки. Уравнение построенной линии:  $\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot t_{cp})$ . Студент должен определить по графику, или аналитически:  $\lambda_0$  – величину коэффициента

теплопроводности при  $t_{cp} = 0$  °С и  $b$  – тангенс угла наклона построенной прямой.

## 5 Содержание отчета

В отчете приводится цель работы, схема рабочего участка моделируемой экспериментальной установки, таблица замеров и расчетов, графическая зависимость  $\lambda = f(t_{cp})$  и функциональная зависимость  $\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot t_{cp})$ .

### *Вопросы для самопроверки*

- 1 Сформулируйте закон Фурье.
- 2 Как изменяется температура в однородной плоской пластине?
- 3 Как рассчитать градиент температуры в испытуемом образце?
- 4 Что такое граничные условия, как они заданы в лабораторной установке?
- 5 Изменится ли величина коэффициента теплопроводности, если при прочих неизменных условиях увеличить толщину образца?
- 6 Как рассчитать плотность теплового потока, проходящего через образец?
- 7 Объясните, почему коэффициент теплопроводности твердых материалов зависит от температуры, какова эта зависимость?
- 8 Назовите материалы, хорошо проводящие теплоту и теплоизоляторы.
- 9 Можно ли на установке, используемой в данной лабораторной работе, определять коэффициент теплопроводности металлов?
- 10 Что такое нестационарный процесс теплопроводности?

## **Лабораторная работа №3**

### **Определение коэффициента теплопроводности твердого конструкционного материала методом цилиндрического слоя**

#### 1. Цель работы

Экспериментальное изучение закономерностей процессов переноса теплоты теплопроводностью в твердых телах.

#### 2. Пояснения к работе

В лабораторной работе используется имитационное моделирование процессов теплообмена теплопроводностью в твердых телах. Такое моделирование основано на основных положениях теории теплопроводности и позволяет получать информацию, аналогичную реальному эксперименту. В данном случае моделирование основывается на методе цилиндрического слоя, который часто используется при опытном определении коэффициента теплопроводности материалов, плохо проводящих теплоту (теплоизоляторов). Образец испытуемого материала изготавливается в форме цилиндра (толщина

цилиндра должна быть много меньше высоты). В процессе опытов на внутренней и наружной поверхностях цилиндрического слоя должно поддерживаться стационарное, однородное температурное поле. Это обеспечивает распространение теплового потока в направлении, нормальном к поверхности цилиндрического слоя. Величина теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> может быть определена по формуле:

$$Q = -2\pi \cdot \lambda \cdot l \cdot \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}. \quad (10)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К);

$l$  – длина цилиндра, м;

$T_1$  и  $T_2$  – температуры на поверхностях цилиндрического слоя, К;

$r_1$  и  $r_2$  – наружный и внутренний радиусы цилиндрического слоя, м.

Если в процессе опытов измерены  $Q$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  и известны размеры образца, то из формулы можно определить величину коэффициент теплопроводности.

Полученное значение коэффициента теплопроводности будет соответствовать средней температуре образца:

$$T_{\text{ср}} = (T_1 + T_2)/2.$$

Испытуемый материал нанесен в виде цилиндрического слоя ( $d_1 = 0,05$  м;  $d_2 = 0,02$ , м) на наружную поверхность металлической трубы (2). Длина трубы равна 1 м, что значительно больше наружного диаметра цилиндрического слоя. Источником теплового потока, проходящего через цилиндрический слой, является электронагреватель (3), который включен в электрическую цепь через автотрансформатор (4). Для определения мощности теплового потока используются вольтметр (5) и амперметр (6). Для измерения температур на внутренней и наружной поверхностях цилиндрического слоя используются хромель-копелевые термоэлектрические термометры (7, 8) в комплекте с приборами для измерения термоЭДС (9, 10).

Достижение стационарного режима определяется по прекращению по изменения температур на поверхностях испытуемого материала. Сообщение об этом появляется на экране монитора. Результаты измерений при достижении стационарного режима заносятся в протокол наблюдений (табл. 4).

### 3. Порядок проведения опытов

После включения установки в сеть, введения и запуска программы, на видеомониторе высвечивается тема лабораторной работы и отображается схема рабочего участка моделируемой экспериментальной установки (рис. 11).

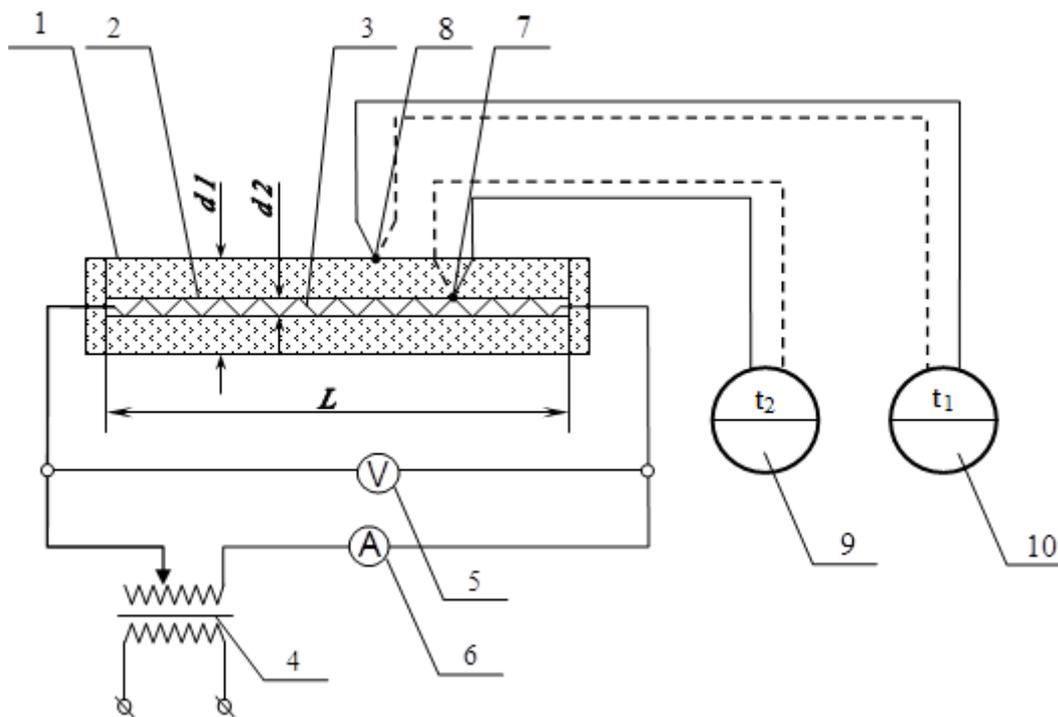


Рис. 11 Схема лабораторной установки

1 – испытуемый материал; 2 – металлическая труба; 3 – электронагреватель; 4 – автотрансформатор; 5 – вольтметр; 6 – амперметр; 7, 8 – хромель-копелевые термоэлектрические термометры; 9, 10 – приборы для измерения термоЭДС.

Таблица 3 – Протокол результатов измерений

№ п/п	Измеряемая величина	Обозначение	Единицы измерения	Номера опытов				
				1	2	3	4	5
1	Сила тока	$I$	А					
2	Напряжение	$U$	В					
3	Температура внутренней поверхности слоя изоляции	$t_2$	°С					
4	Температура наружной поверхности слоя изоляции	$t_1$	°С					

Исследуемый материал .....

#### 4. Обработка результатов измерений

Величина теплового потока, проходящего через слой испытуемого материала, определяется по формуле:

$$Q = I \cdot U, \text{ Вт} \quad (12)$$

Коэффициент теплопроводности испытуемого материала определяется формуле:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)}{2\pi l \cdot (t_2 - t_1)}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}, \quad (13)$$

Средняя температура тепловой изоляции:

$$t_{cp} = \frac{(t_1 + t_2)}{2}, \text{ }^\circ\text{C} \quad (14)$$

Результаты расчетов заносятся в таблицу 3, а также используются для построения графической зависимости  $\lambda = f(t_{cp})$ . Построение рекомендуется выполнить следующим образом: нанести опытные точки в системе координат  $t - \lambda$  и провести прямую линию наилучшим образом, аппроксимирующую эти точки. Уравнение построенной линии:  $\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot t_{cp})$ . Студент должен определить по графику, или аналитически:  $\lambda_0$  – величину коэффициента теплопроводности при  $t_{cp} = 0$  °C и  $b$  – тангенс угла наклона построенной прямой.

Таблица 4 – Протокол результатов расчетов

№ п/п	Определяемая величина	Обозначение	Единицы измерен.	Номера опытов				
				1	2	3	4	5
1	Тепловой поток	Q	Вт					
2	Средняя температура исследуемого материала	$t_{cp}$	°C					
3	Коэффициент теплопроводности исследуемого материала	$\lambda$	Вт/(м·°C)					

Исследуемый материал .....

## 5 Содержание отчета

В отчете приводится цель работы, схема рабочего участка моделируемой экспериментальной установки, таблица замеров, расчеты и выводы.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Сформулируйте цель лабораторной работы и поясните, как достигается поставленная цель?
2. Назовите основные узлы экспериментальной установки и укажите их назначение.
3. Какие величины следует измерять в данной работе, чтобы вычислить коэффициент теплопроводности испытуемого материала?
4. Какова физическая сущность передачи теплоты теплопроводностью?
5. Сформулируйте понятия: температурное поле, изотермическая поверхность, градиент температуры, тепловой поток, линейная плотность теплового потока.
6. Покажите на схеме установки направление векторов теплового потока и градиента температуры?
7. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности, и от каких факторов зависит его величина?
8. Чем отличается характер изменения температуры по толщине плоской и цилиндрической стенок?
9. Сформулируйте понятие термического сопротивления стенки.
10. Как зависит коэффициент теплопроводности различных веществ (металлов, неметаллов, жидкостей и газов) от температуры?
11. Сформулируйте основной закон теплопроводности. В чем его сущность?

## **Лабораторная работа №4**

### **Определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции около горизонтального цилиндра**

#### 1 Цель работы

Познакомиться с экспериментальными методами исследования процессов конвективного теплообмена.

#### 2 Пояснения к работе

В лабораторной работе используется имитационное моделирование процессов конвективного теплообмена. Такое моделирование основано на основных положениях теории конвективного теплообмена и позволяет получать информацию, аналогичную реальному эксперименту. В данной работе моделируется процесс теплоотдачи от поверхности горизонтального цилиндра при свободной конвекции в неограниченном пространстве. Согласно закону

Ньютона – Рихмана тепловой поток от поверхности цилиндра к окружающему воздуху пропорционален разности температур поверхности цилиндра и окружающего воздуха, площади поверхности цилиндра и коэффициенту теплоотдачи:

$$Q = \alpha \cdot (T_c - T_{жс}) \cdot F, \quad (15)$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$T_c$  – температура поверхности цилиндра, К ;

$T_{жс}$  – температура воздуха вдали от поверхности цилиндра, К;

$F$  – площадь поверхности цилиндра, м<sup>2</sup>.

Если в процессе опыта измерены величины  $Q$ ,  $T_c$ ,  $T_{жс}$  и известны размеры цилиндра, то коэффициент теплоотдачи может быть определен по формуле:

$$\alpha = \frac{Q}{(T_c - T_{жс}) \cdot F} . \quad (16)$$

### 3 Порядок проведения работы

После включения установки в сеть, введения и запуска программы на видеомониторе высвечивается тема лабораторной работы и отображается схема рабочего участка моделируемой экспериментальной установки (рис.12).

Рабочий участок установки представляет собой металлическую трубу 7, расположенную горизонтально. Нагрев рабочего участка осуществляется посредством пропускания по нему переменного электрического тока низкого напряжения, который подводится через контакты на концах трубы. Падение напряжения на измерительном участке регулируется реостатом 9, а измеряется цифровым вольтметром 8. Температура наружной поверхности трубы измеряется шестью термоэлектрическими термометрами, 1 – 6. Рабочие концы термометров закреплены на наружной поверхности трубы (по контуру среднего сечения рабочего участка). Свободные концы термометров термостатированы и через многопозиционный переключатель подключены к потенциометру (на рисунке не показан).

В соответствии с указаниями преподавателя студент задает геометрические размеры рабочего участка (диаметр трубы –  $d$ , длину трубы –  $L$ , толщину стенки –  $\delta$ ), температуру окружающего воздуха –  $T_{жс}$ , выбирает режим нагрева, т.е. принимает величину падения напряжения на рабочем участке –  $U$ , выполняет измерение термоЭДС термоэлектрических термометров и заносит полученные значения в протокол испытаний (таблица 4).

Таблица 5 – Протокол эксперимента и результаты обработки данных

	$U$ ,	Величина термоЭДС, мВ	$T_{сн}$ ,	$T_{жс}$ ,	$Q_k$ ,	$\alpha$ ,
--	-------	-----------------------	------------	------------	---------	------------

№ опыта	В	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	К	К	Вт	Вт/м <sup>2</sup> К

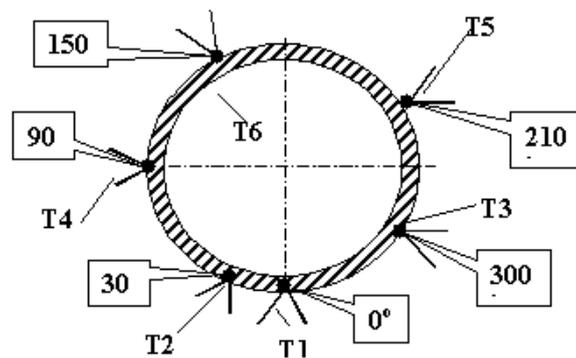
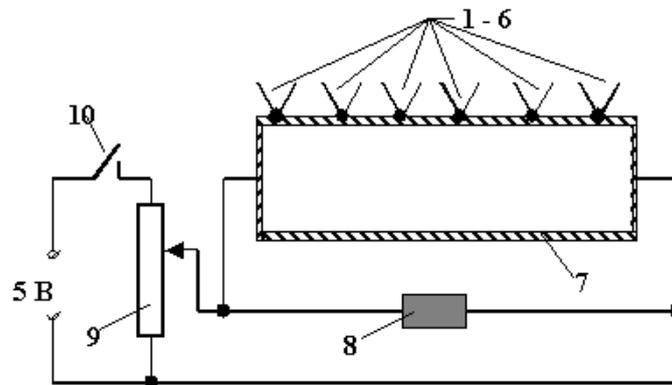


Рис. 12 Схема экспериментальной установки для определения коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции около горизонтального цилиндра  
 1 – 6 – термоэлектрические термометры; 7 – горизонтальный цилиндр;  
 8 – вольтметр; 9 – реостат; 10 – выключатель

#### 4 Обработка результатов опытов

Для каждого опыта определяется среднее значение термоЭДС:

$$E_{cp} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6}{6}, \text{ мВ.} \quad (17)$$

На основании стандартной градуировочной характеристики хромель – копелевых термоэлектрических термометров определяется средняя температура

наружной поверхности трубы –  $T_{cm}$  (полагается, что свободные концы термометров термостатированы при температуре 0 °С):

$$T_{cm} = 273,15 + \frac{E_{cp}}{0,0695} . \quad (18)$$

Рассчитывается тепловой поток, создаваемый за счет протекания по рабочему участку электрического тока:

$$Q = \frac{U^2}{R_s}, \text{ Вт}, \quad (19)$$

где  $R_s = \frac{\rho \cdot L}{f}$  – электрическое сопротивление рабочего участка (трубы);

$\rho = 7,5 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{T_{cm}}{273}\right)^{0,236}$  – удельное электрическое сопротивление материала трубы (нержавеющая сталь), Ом·м;

$f = \frac{\pi \cdot (d^2 - d_0^2)}{4}$  – площадь поперечного (кольцевого) сечения трубы, м<sup>2</sup>;

$d_0 = d - 2 \cdot \delta$  – внутренний диаметр трубы, м.

Этот тепловой поток отдается от поверхности рабочего участка в окружающую среду не только теплоотдачей, но и тепловым излучением. Поэтому тепловой поток, отдаваемый от поверхности трубы теплоотдачей, будет равен:

$$Q_k = Q - Q_l, \text{ Вт}, \quad (20)$$

где  $Q_l = 5,67 \cdot \varepsilon \cdot \left[ \left(\frac{T_{cm}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100}\right)^4 \right] \cdot F$  – тепловой поток, Вт, отдаваемый

излучением;

$\varepsilon$  – степень черноты поверхности трубы (рекомендуется принять  $\varepsilon = 0,1$ );

$F$  – площадь наружной поверхности трубы, м<sup>2</sup>,  $F = \pi \cdot d \cdot L$ .

Затем определяется опытное значение коэффициента теплоотдачи от поверхности трубы:

$$\alpha = \frac{Q_k}{(T_{cm} - T_{жс}) \cdot F} . \quad (21)$$

Полученное опытное значение коэффициента теплоотдачи следует сравнить с величиной коэффициента теплоотдачи, рассчитанного по безразмерному уравнению подобия:

$$Nu_{жс,d} = 0,5 \cdot (Gr_{жс,d} \cdot Pr_{жс})^{0,25} . \quad (22)$$

В этом уравнении в качестве определяющей принимается температура окружающей среды, а в качестве определяющего размера принимается наруж-

ный диаметр трубы. Значения физических свойств воздуха, входящих в числа подобия, принимаются по /5/.

## 5 Содержание отчета

В отчете приводится цель работы, схема рабочего участка моделируемой экспериментальной установки, таблица замеров, расчеты и выводы.

### *Вопросы для самопроверки*

- 1 Что такое свободная конвекция?
- 2 Как сделать конвекцию около горизонтального цилиндра вынужденной? Как при этом изменится коэффициент теплоотдачи?
- 3 Что такое коэффициент теплоотдачи, от каких факторов зависит его величина?
- 4 Какие числа подобия входят в безразмерные уравнения подобия для процессов теплоотдачи при свободной конвекции?
- 5 Что такое абсолютно черное тело?
- 6 Что такое степень черноты, для каких тел вводится это понятие? От каких факторов зависит величина степени черноты?
- 7 Как изменится коэффициент теплоотдачи, если над трубой, или сбоку от нее установить плоский металлический лист, ширина которого значительно больше диаметра трубы?
- 8 Как рассчитать плотность теплового потока на внешней поверхности трубы?
- 9 Как рассчитать линейную плотность теплового потока от поверхности трубы к окружающему воздуху?
- 10 Как влияет на величину коэффициента теплоотдачи разность температур поверхности трубы и воздуха?

## **Лабораторная работа №5**

### **Определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции (метод струны)**

#### 1. Цель работы

Определение экспериментальным способом коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции в неограниченном пространстве, а также освоения методики обработки опытных данных на основе теории подобия для составления уравнения подобия.

## 2. Порядок проведения опытов

В экспериментальной лабораторной установке (рис.13) теплоотдающей поверхностью является поверхность нихромовой проволоки (струны) 3 по которой пропускается электрический ток напряжением до 30 В. Таким образом, размеры струны (длина 1540 мм и диаметр 0,5 мм), определяют теплоотдающую поверхность  $F = 2,419 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .

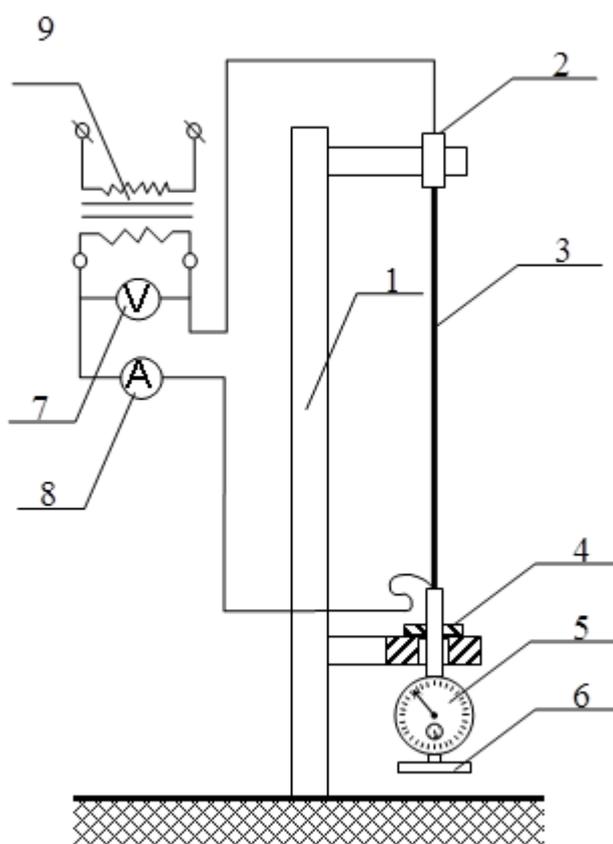


Рис. 13 Схема Лабораторной установки

Струна удерживается в вертикальном положении стойкой 1 с двумя кронштейнами. В верхнем кронштейне 2, изолированном от стержня, неподвижно закреплен один конец струны. Другой конец струны зажат в головке индикатора часового типа 5, с помощью которого измеряется удлинение струны. Головка индикатора свободно перемещается в изоляторе-держателе 4 нижнего кронштейна. Груз 6 обеспечивает постоянное по величине натяжение струны. Напряжение от сети 220 В подводится через автотрансформатор к держателю 2 и головке индикатора 5. Для определения величины теплового потока используются вольтметр 7 и амперметр 8.

Все измерения выполняются только при стационарном температурном режиме, о наступлении которого можно судить по неизменности показаний индикатора удлинения струны.

Таблица 6 – протокол результатов измерений

№ п/п	Измеряемая величина	Обозначение	Единицы измерен.	Номера опытов				
				1	2	3	4	5
1	Удлинение струны	$\Delta l$	мм					
2	Сила тока	$I$	А					
3	Напряжение	$U$	В					
4	Температура окружающей среды	$t_{\text{окр}}$	°С					
5	Показания барометра	$B$	бар					

### 3. Обработка результатов измерений

3.1. Так как, удлинение струны зависит только от разности температур струны и окружающей среды, то эту разность температур можно определить по эмпирической формуле:

$$\Delta t_m = 0,2736 + 42,603 \cdot \Delta l + 0,2723 \cdot \Delta l^2, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (23)$$

где  $\Delta l$  – удлинение струны, мм;

3.2. Средняя температура струны:

$$t_{\text{ст}} = \Delta t_m + t_{\text{окр}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (24)$$

3.3. Количество теплоты, которое выделяется при протекании электрического тока по струне:

$$Q_3 = I \cdot U, \text{ Вт} \quad (25)$$

3.4. Величину теплового потока, отдаваемого от поверхности струны в окружающую среду за счет теплового излучения, определяется по закону Стефана-Больцмана:

$$Q_{\text{и}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F \cdot \left[ \left( \frac{t_{\text{ст}} + 273}{1000} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт} \quad (26)$$

где  $\varepsilon = 0,64 \dots 0,76$  – степень черноты поверхности нихромовой проволоки,  
 $C_0 = 5,67$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  
 $F$  – теплоотдающая поверхность струны, равная  $2,419 \cdot 10^{-3}$ , м<sup>2</sup>.

3.5. Тогда величина теплового потока, отдаваемого от поверхности струны в окружающую среду за счет свободной конвекции, равна:

$$Q = Q_3 - Q_{\text{и}}, \text{ Вт} \quad (27)$$

3.6. Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_m}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad (28)$$

3.7. Теплофизические свойства воздуха (окружающей среды) определяются по показаниям барометра и термометра:

$$\text{Плотность воздуха: } \rho = \frac{P_{\text{атм}}}{R \cdot (273 + t_{\text{окр}})}, \text{ кг/м}^3 \quad (29)$$

Массовая теплоемкость  $c_p = 1006$ , Дж/(кг·°C)

где  $R$  – газовая постоянная воздуха, равная 287 Дж/кг·К.

$$\text{коэффициент объемного расширения: } \beta = \frac{1}{(273 + t_{\text{окр}})}, \text{ 1/К} \quad (30)$$

$$\text{коэффициент теплопроводности: } \lambda = 0,000074 \cdot t_{\text{опр}} + 0,0245, \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)} \quad (31)$$

$$\text{коэффициент кинематической вязкости } \nu = (0,000089 \cdot t_{\text{опр}}^2 + 0,088 \cdot t_{\text{опр}} + 13,886) \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с} \quad (32)$$

$$\text{коэффициент температуропроводности } a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}, \text{ м}^2/\text{с} \quad (33)$$

3.8. Используя расчетные значения коэффициента теплоотдачи и теплофизических свойств воздуха, следует рассчитать числа подобия, входящие в уравнения подобия при свободной конвекции

Число подобия Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (34)$$

Число подобия Грасгофа:

$$Gr = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{окр}}), \quad (35)$$

Число подобия Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (36)$$

3.9. Все результаты расчетов следует занести в таблицу 7.

3.10. По результатам расчетов построить в логарифмических координатах (в масштабе) график зависимости числа подобия  $Nu$  от произведения ( $Gr \cdot Pr$ ).

3.11. Построить отрезок прямой линии наилучшим образом аппроксимирующий опытный график зависимости числа подобия  $Nu$  от произведения ( $Gr \cdot Pr$ ) и по нему определить коэффициенты уравнения подобия  $c$  и  $n$ . Записать уравнение подобия в виде:  $Q = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n$ .

Таблица 7 – Результаты расчетов

№ п/п	Измеряемая величина	Обозначение	Единицы измерен.	Номера опытов				
				1	2	3	4	5
1	Температурный напор (разность температур струны и окружающей среды)	$\Delta t_m$	°C					

№ п/п	Измеряемая величина	Обозначение	Единицы измерен.	Номера опытов				
				1	2	3	4	5
2	Средняя температура струны	$t_{ст}$	°С					
3	Количество теплоты, выделенное при протекании электрического тока	$Q_э$	Вт					
4	Тепловой поток, отдаваемый излучением	$Q_{и}$	Вт					
5	Тепловой поток, отдаваемый конвекцией	$Q$	Вт					
6	Коэффициент теплоотдачи	$\alpha$	Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)					
7	Коэффициент объемного расширения воздуха	$\beta$	1/К					
8	Теплоемкость воздуха	$c_p$	Дж/(кг·°С)					
9	Коэффициент теплопроводности воздуха	$\lambda$	Вт/(м·град)					
10	Плотность воздуха	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>					
11	Коэффициент температуропроводности воздуха	$a$	м <sup>2</sup> /с					
12	Коэффициент кинематической вязкости воздуха	$\nu$	м <sup>2</sup> /с					
13	Число подобия Нуссельта	$Nu$	–					
14	Число подобия Грасгофа	$Gr$	–					
15	Число подобия Прандтля	$Pr$	–					
16	Произведение ( $Gr \cdot Pr$ )	–	–					

## 5 Содержание отчета

В отчете приводится цель работы, схема рабочего участка моделируемой экспериментальной установки, таблица замеров, расчеты и выводы.

### Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте цель лабораторной работы и поясните, как она достигается?
2. Назовите основные узлы экспериментальной установки и укажите их назначение.
3. Как определяется средняя температура струны в данной установке?
4. Для чего замеряется барометрическое давление в данной работе?

5. Как определяется количество теплоты, отданное струной окружающему воздуху конвекцией?
6. Как определяется количество теплоты, отданное струной окружающему воздуху лучистым теплообменом ?
7. Что такое свободная и вынужденная конвекция?
8. Каков физический смысл и размерность коэффициента теплоотдачи?
9. Какие факторы определяют интенсивность конвективного теплообмена?
10. . Что такое число подобия?
11. Какие числа подобия называются «определяющими» и «определяемыми»?
12. Для чего и как составляются уравнения подобия?

## **Лабораторная работа №6**

### **Исследование процессов свободной и вынужденной конвекции при движении воздуха внутри и около горизонтального трубопровода**

#### 1. Цель работы

Исследование особенностей процессов теплообмена при свободной и вынужденной конвекции. Экспериментальное определение коэффициентов теплоотдачи и сравнение их с результатами вычислений по уравнениям подобия.

#### 2. Порядок проведения опытов

Схема лабораторной установки (рис. 14) предусматривает одновременное изучение процессов свободной вынужденной конвекции, при этом вынужденная конвекция имеет место при движении воздуха внутри горизонтальной металлической трубы 5, а свободная конвекция наблюдается на наружной поверхности той же трубы. Воздух забирается компрессором 1 из окружающей среды.



нагревается до температуры более высокой, чем температура воздуха. Величина теплового потока, выделяемая при протекании электрического тока по телу трубы, определяется по показаниям амперметра и вольтметра, расположенных на панели 10. Температура поверхности трубы измеряется контактной термопарой 12 в комплекте с потенциометром.

При достижении стационарного теплового режима выполняются измерение всех необходимых параметров и полученные показания приборов заносятся в протокол наблюдений (табл. 1). О стационарности режима можно судить по показаниям прибора, измеряющего температуру поверхности трубы.

Таблица 8 – Протокол результатов измерений

№ п/п	Измеряемая величина	Обозначение	Единицы измерен.	Номера опытов				
				1	2	3	4	5
1	Удлинение трубы	$\Delta l$	мм					
2	Температура воздуха при входе в трубу (сечение I - I)	$t_1$	°С					
3	Температура воздуха при выходе из трубы (сечение II - II)	$t_2$	°С					
4	Температура стенки трубы	$t_x$	°С					
5	Показания вакуумметра (наиболее узкое сечение воздухомера)	$H$	мм вод.ст.					
7	Избыточное давление после компрессора	$H_n$	мм вод.ст.					
8	Напряжение и сила тока, протекающего по трубе	$U_n$	В					
		$I_n$	А					
9	Показания барометра	$B$	бар					
10	Температура окружающей среды	$t_{окр}$	°С					

### 3. Обработка результатов измерений

#### 3.1. Падение давления воздуха в воздухомере:

$$\Delta P = \rho \cdot gH, \text{ Па}$$

где  $\rho$  – плотность воды в  $U$ -образном манометре, равная  $1000 \text{ кг/м}^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения, равное  $9,81 \text{ м/сек}^2$ ;

$H$  – разрежение, измеренное  $U$ -образным манометром в м вод.ст.

#### 3.2 Плотность воздуха по состоянию в наиболее узком сечении воздухомера

$$\rho_B = \frac{(P_{атм} - \Delta P)}{R \cdot (t_{окр} + 273)}, \text{ кг/м}^3. \quad (37)$$

где  $R$  – газовая постоянная воздуха, равная 287 Дж/кг·К.

3.3. Расход воздуха:

$$G = 0,525 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\rho_b \cdot \Delta P}, \text{ кг/сек.} \quad (38)$$

3.4. Абсолютное давление в сечении I-I:

$$P_1 = P_{\text{атм}} - \rho \cdot g \cdot H_n, \text{ Па.} \quad (39)$$

где  $H_n$  – избыточное давление воздуха за компрессором (по показаниям  $U$ -образного манометра в м в.ст.

3.5. Плотность воздуха по состоянию на входе в горизонтальную трубу:

$$\rho_1 = \frac{P_1}{R \cdot (t_1 + 273)}, \text{ кг/м}^3 \quad (40)$$

где  $t_1$  – температура воздуха на входе в трубу (сечение I-I), °С.

3.6. Плотность воздуха по состоянию на выходе из горизонтальной трубы:

$$\rho_2 = \frac{P_{\text{атм}}}{R \cdot (t_2 + 273)}, \text{ кг/м}^3 \quad (41)$$

где  $t_2$  – температура воздуха на выходе из трубы (сечение II-II), °С.

3.7. Значение энтальпии воздуха в сечениях I и II определяется по формуле:

$$h_j = c_p \cdot t_j, \text{ кДж/кг,} \quad (42)$$

где  $c_p$  – теплоемкость воздуха в изобарном процессе (может быть принята не зависящей от температуры и равной 1,006 кДж/(кг·°С);

$t_j$  – температура в рассматриваемом сечении, °С;

$j$  – индекс рассматриваемого сечения (I или II).

3.8. Средняя скорость потока в сечениях I-I и II-II определяется по формуле:

$$W_j = \frac{G}{(\rho_j \cdot F)}, \text{ м/сек} \quad (43)$$

где  $F$  – площадь проходного сечения для потока воздуха, одинаковая для сечений I-I и II-II и равная  $1,35 \cdot 10^{-3}$ , м<sup>2</sup>;

$\rho_j$  – плотность воздуха в рассматриваемом сечении, кг/м<sup>3</sup>;

$j$  – индекс рассматриваемого сечения (I-I или II-II).

3.9. Тепловой поток, передаваемый воздуху в процессе вынужденной конвекции от внутренней поверхности трубы, находится с учетом по формуле:

$$Q_1 = G \cdot (\Delta h + \Delta \mathcal{E}_{\text{кин}}), \text{ Вт}, \quad (44)$$

где

$$\Delta h = 1,006 \cdot (t_1 - t_2) \cdot 10^3, \text{ Дж/кг}$$

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{кин}} = \frac{W_2^2 - W_1^2}{2}, \text{ Дж/кг}$$

3.10. Тепловой поток, передаваемый при естественной конвекцией от наружной поверхности трубы:

$$Q_2 = Q_3 - Q_1, \text{ Вт} \quad (45)$$

3.11. Величина теплового потока, выделяемого при протекании электрического тока по участку трубы от сечения I-I до сечения II-II, определяется по формуле:

$$Q_3 = U_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}, \text{ Вт} \quad (46)$$

где  $I_{\text{н}}$  – сила тока, потребляемая на нагрев трубы, А;

$U_{\text{н}}$  – напряжение, подаваемое на нагрев трубы, В.

3.12. Опытные значения коэффициентов теплоотдачи рассчитываются по формулам:

$$\alpha_{1 \text{ оп}} = Q_1 / (\Delta t_1 \cdot F_{\text{вн}}); \quad (47)$$

$$\alpha_{2 \text{ оп}} = Q_2 / (\Delta t_2 \cdot F_{\text{нар}}),$$

где  $F_{\text{вн}}$  – внутренняя поверхность трубы, равная  $0,352 \text{ м}^2$ ;  $F_{\text{нар}}$  – наружная поверхность трубы, равная  $0,386 \text{ м}^2$ ; средний температурный напор при вынужденной конвекции  $\Delta t_1 = t_x - 0,5 \cdot (t_1 + t_2)$ , °С; средний температурный напор при естественной конвекции  $\Delta t_2 = t_x - t_{\text{окр}}$ , °С.

3.13. Расчетные значения коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции определяются по формуле:

$$\bar{\alpha}_{1\text{н},\text{д}} = \bar{\text{Nu}}_{1\text{н},\text{д}} \cdot \frac{\lambda}{d_{\text{вн}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}) \quad (48)$$

При вычислении чисел подобия и коэффициента теплоотдачи значения

теплофизических свойств воздуха находятся по определяющей температуре – средней температуре потока воздуха в трубе:  $t_{\text{п}} = 0,5 \cdot (t_1 + t_2)$ ; в качестве определяющего размера следует использовать внутренний диаметр трубы  $d_{\text{вн}} = 0,0415$  м.

3.14. Расчетные значения коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции определяются по формуле:

$$\alpha_{2\text{расч}} = \frac{\lambda \cdot \overline{Nu}_{2n,d}}{d_{\text{нар}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}) \quad (49)$$

При вычислении чисел подобия и коэффициента теплоотдачи значения теплофизические свойства воздуха находятся по определяющей температуре – средней температуре окружающего воздуха; определяющим размером в формулах является наружный диаметр трубы  $d_{\text{нар}} = 0,0455$  м.

3.15. Результаты расчетов следует занести в сводную таблицу 9.

Таблица 9 – Протокол результатов расчетов

№ п/п	Измеряемая величина	Обозначение	Единицы измерен.	Номера опытов				
				1	2	3	4	5
1	Барометрическое давление	$p_{\text{бар}}$	Па					
2	Перепад давления воздуха в воздухомере	$\Delta p$	Па					
3	Плотность воздуха в наиболее узком сечении воздухомера	$\rho_{\text{в}}$	кг/м <sup>3</sup>					
4	Расход воздуха	$G$	кг/с					
5	Плотность воздуха на входе в трубу (сечения I – I)	$\rho_1$	кг/м <sup>3</sup>					
6	Средняя скорость потока воздуха на входе в трубу (сечения I – I)	$W_1$	м/с					
7	Плотность воздуха на выходе из трубы (сечение II)	$\rho_2$	кг/м <sup>3</sup>					
8	Средняя скорость потока при выходе из трубы (сечение II)	$W_2$	м/с					
9	Тепловой поток, выделяющийся при протекании электрического тока	$Q_3$	Вт					
10	Изменение энтальпии воздуха	$\Delta h$	Дж/кг					

№ п/п	Измеряемая величина	Обозначение	Единицы измерен.	Номера опытов				
				1	2	3	4	5
11	Изменение кинетической энергии потока воздуха в трубе	$\Delta E_{кин}$	Дж/кг					
12	Тепловой поток, передаваемый потоку воздуха в трубе	$Q_1$	Вт					
13	Тепловой поток, передаваемый окружающему воздуху	$Q_2$	Вт					
14	Средний температурный напор при вынужденной конвекции	$\Delta t_1$	°С					
15	Средний температурный напор при свободной конвекции	$\Delta t_2$	°С					
16	Число Рейнольдса	$Re_n$	–					
17	Число Прандтля в условиях вынужденной конвекции	$Pr_{1п}$	–					
18	Число Нуссельта в условиях вынужденной конвекции	$Nu_{1п,d}$	–					
19	Число Прандтля в условиях свободной конвекции	$Pr_{2п}$	–					
20	Число Грасгофа	$Gr_n$	–					
21	Число Нуссельта в условиях свободной конвекции	$Nu_{2п,d}$	–					
22	Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции	$\alpha_{1 оп}$	Вт/м <sup>2</sup> ·°С					
	Коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции	$\alpha_{1 расч}$	Вт/м <sup>2</sup> ·°С					

#### 4 Содержание отчета

В отчете приводится цель работы, схема рабочего участка моделируемой экспериментальной установки, таблица замеров, расчеты и выводы.

##### *Вопросы для самопроверки*

1. Сформулируйте цель лабораторной работы и поясните, как она достигается?
2. Назовите основные узлы опытной установки и укажите их назначение.
3. Как измеряется температура воздуха в данной работе?
4. Как измеряется и регулируется расход воздуха в данной работе?
5. По каким признакам можно определить достижение стационарного теплового режима?
6. Как определяется плотность воздуха в условиях лабораторной установки?
7. Какие виды конвективного теплообмена существуют, в чем их различие?
8. В чем сущность "Теории подобия" и как с ее помощью определяются коэффициенты теплоотдачи?

9. Как составляются уравнения подобия?

10. Каков физический смысл чисел подобия, входящих в уравнение подобия для свободной конвекции?

11. Каков физический смысл чисел подобия, входящих в уравнение подобия для вынужденной конвекции?

## Лабораторная работа №7

### Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом

#### 1 Цель лабораторной работы

Экспериментально определить величину коэффициента излучения электропроводящего материала и исследовать влияние температуры материала на величину коэффициента излучения.

#### 2 Пояснения к работе

Величина коэффициента излучения используется при проведении расчетов лучистого теплообмена. Коэффициент излучения поверхности тела зависит от многих факторов: от материала тела, вида и цвета поверхности и т.д. Поэтому коэффициент излучения определяют опытным путем. Данный метод основан на непосредственном измерении потока результирующего излучения и относится к абсолютным методам [1, 2]. Форма исследуемого образца может быть различной. Но при этом необходимо, чтобы поверхность системы, в которую помещен образец, была значительно больше поверхности последнего. Для получения достоверных результатов необходимым условием является достижение стационарного теплового процесса.

#### 3 Порядок проведения работы

Опытный образец через выключатель электрического питания нагревателя 7 подключен к источнику тока низкого напряжения 5 В. Ток нагрева регулируется с помощью реостата 8. Для измерения падения напряжения непосредственно на образце ( $U$ ) и тока нагрева ( $I$ ) в схему установки входят вольтметр 9 и амперметр 10.

3



4



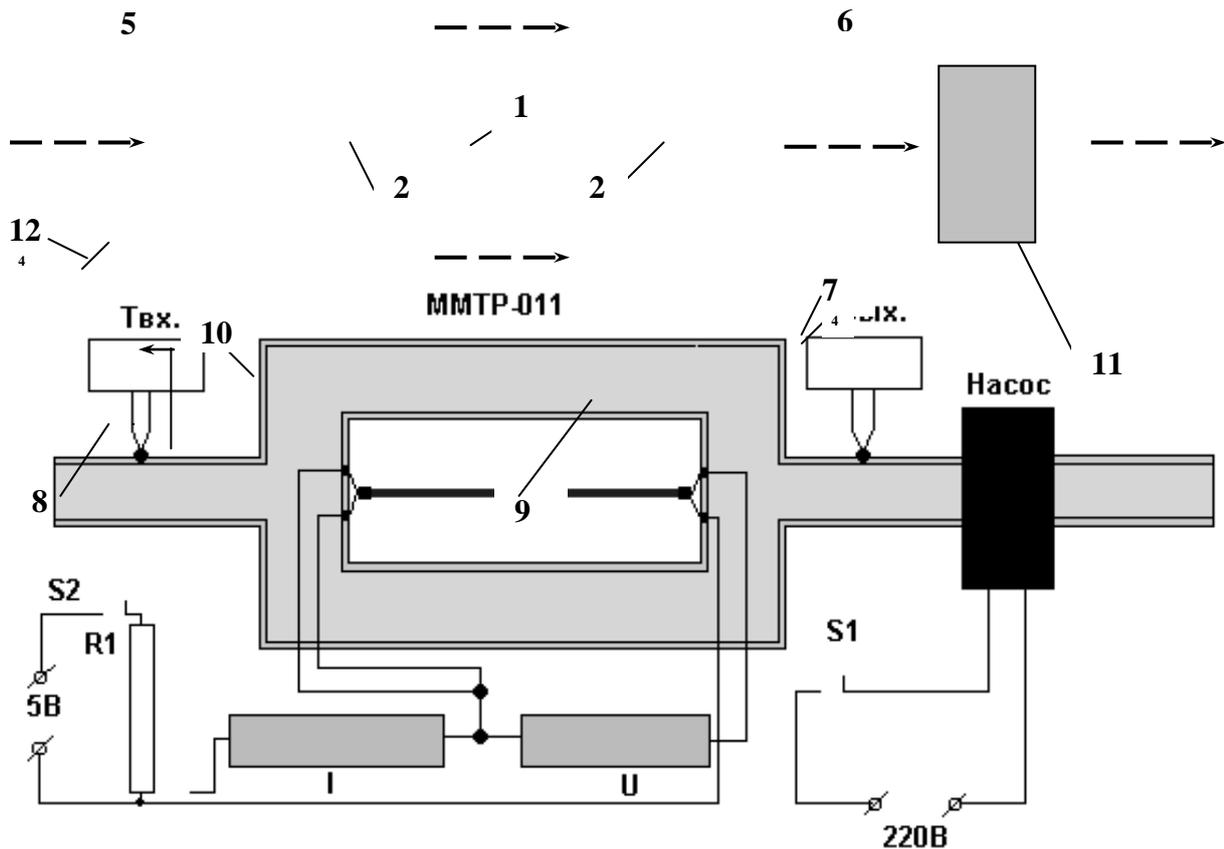


Рис 15 Схема лабораторной установки

1– проволока из испытуемого материала; 2 – токоподводы; 3 – стеклянный сосуд; 4 – водяная рубашка; 5 и 6 – датчики температуры; 7 – выключатель электрического питания насоса; 8 – реостат; 9 – вольтметр; 10 – амперметр; 11 – насос; 12– выключатель электрического питания нагреваемой проволоки.

Опытный образец 1, представляющий собой тонкую проволоку из испытуемого материала, закреплен концами в токоподводах 2 малого электрического сопротивления. Токоподводы запаяны в стеклянный тонкостенный цилиндрический сосуд 3 с двойными стенками, образующими вдоль всего измерительного участка проточную охлаждающую водяную рубашку 4. Циркуляция воды в системе охлаждения осуществляется насосом 11, подключенным к сети 220 В через выключатель 12. Датчики температуры 5 и 6 предназначены для измерения температуры воды на входе  $t_{2вх}$  и на выходе  $t_{2вых}$  из охлаждающей рубашки. Внутреннее пространство сосуда вакуумировано с целью исключения теплообмена теплопроводностью и конвекцией между опытным образцом и внутренней поверхностью сосуда. Опытный образец через выключатель электрического питания нагревателя 7 подключен к источнику тока низкого напряжения 5 В. Ток нагрева регулируется с помощью реостата 8. Для измерения падения напряжения непосредственно на образце ( $U$ ) и тока нагрева ( $I$ ) в схеме установки используются вольтметр 9 и амперметр 10.

Длина рабочего участка опытного образца между токоподводами составляет:

для медной проволоки  $L = 0,2$  м, диаметр –  $d = 1,8$  мм;

для вольфрамовой проволоки  $L=0,3$  м, диаметр –  $d=1,8$  мм.

Поток собственного теплового излучения от поверхности опытного образца направлен к внутренней поверхности стеклянного сосуда.

Лабораторную работу рекомендуется выполнять в следующем порядке: на экране монитора в строке «Меню» с помощью команды «Параметры» выбрать материал образца: (медь или вольфрам).

С помощью реостата 8, установить ток нагрева образца в рекомендуемых пределах: для медной проволоки –  $25 \dots 34$  А, а для вольфрамовой проволоки –  $1,5 - 4$  А. Падение напряжения на образце и сила тока в цепи регистрируются вольтметром 9 и амперметром 10. В процессе настройки режима эксперимента на экране автоматически регистрируются значения температур охлаждающей воды ( $t_{2вх}$  и  $t_{2вых}$ ). Разность этих температур не должна превышать  $1-1,5$  °С.

Результаты измерений, выполненные на трех тепловых режимах, студенты заносят в протокол лабораторной работы (табл. 10).

Таблица 10 – Протокол результатов измерений

№ опыта	Напряжение $U$ , В	Сила тока $I$ , А	Температура воды	
			$t_{2вх}$ , °С	$t_{2вых}$ , °С
1				
2				
3				

#### 4 Обработка результатов опытов

Так как площадь поверхности испытуемого образца ( $F_1$ ) много меньше поверхности, окружающей его оболочки ( $F_2$ ), а среда между ними диатермична, то коэффициент излучения опытного образца может быть определен по формуле

$$C_1 = \frac{Q}{F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4), \quad (50)$$

где  $Q$  – результирующий поток теплового излучения, Вт;

$F_1 = \pi d \cdot L$  – площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>;

$T_1$  и  $T_2$  – средние температуры излучающей и тепловоспринимающей поверхностей, К.

Величина результирующего потока теплового излучения определяется по формуле:

$$Q = UI, \text{ Вт}. \quad (51)$$

Температура поверхности опытного образца определяется по формулам:

$$\begin{aligned} \text{для меди } T_1 &= 140 \rho \cdot 10^8 + 43; \\ \text{для вольфрама } T_1 &= 36,4 \rho \cdot 10^8 - 155, \end{aligned}$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление материала опытного образца.

Удельное сопротивление материала опытного образца определяется по формуле:

$$\rho = R \cdot S / L, \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad (52)$$

где  $S = \pi d^2 / 4$  – площадь поперечного сечения проволоки,  $\text{м}^2$ ;  
 $R = U / I$  – сопротивление опытного образца проволоки, Ом.

Температура тепловоспринимающей поверхности стеклянной стенки определяется по формуле:

$$T_2 = (t_{\text{вх}2} + t_{\text{вых}2}) / 2 + 273, \text{ К}. \quad (53)$$

Степень черноты поверхности опытного образца определяется по формуле:

$$\varepsilon_1 = C_1 / C_0, \quad (54)$$

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

Результаты расчетов заносятся в табл. 11

Таблица 11 – Протокол результатов обработки экспериментальных данных

№ опыта	$\rho$ , Ом·м	$T_1$ , К	$T_2$ , К	Q, Вт	$C_1$ Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{К}^4$ )	$\varepsilon$
1						
2						
3						

По данным таблицы 6 необходимо построить графическую зависимость коэффициента излучения от температуры поверхности испытуемого образца. Оценить сходимость полученных значений коэффициентов степени черноты со справочными данными /5/.

## 5 Содержание отчета

В отчете приводится цель работы, схема рабочего участка моделируемой экспериментальной установки, таблица замеров, результаты обработки экспериментальных данных, график зависимости  $\varepsilon = f(T_1)$ .

### Вопросы для самопроверки

- 1 Какие существуют виды электромагнитного излучения?
- 2 Каковы особенности теплового излучения, твердых тел, жидкостей и газов?
- 3 Что такое поток результирующего излучения?
- 4 Сформулируйте закон Стефана– Больцмана для абсолютно черного и «серого» тел?
- 5 Какие цели преследует вакуумирование внутренней полости стеклянного сосуда?
- 6 Какая поверхность калориметра (сосуда) является лучевоспринимающей?
- 7 Почему в лабораторной установке опытные образцы имеют форму проволоки (цилиндр с малым диаметром), а не какую-либо другую?
- 8 Назовите условия наступления стационарного теплового режима.
- 9 Почему в лабораторной установке разность температур охлаждающей воды ( $t_{2вх} - t_{2вых}$ ) не должна превышать 1 – 1,5 °С ?
- 10 Каков физический смысл коэффициента излучения.
- 12 Что такое степень черноты? От каких факторов зависит его величина?

### Приложение 1

В приложении приведены интерполяционные формулы для расчета теплофизических свойств сухого воздуха в зависимости от температуры:

- Коэффициент теплопроводности:  
 $\lambda_t = 0,000074 \cdot t_{\text{п}} + 0,0245$ , Вт/(м·°С);
- Коэффициент кинематической вязкости:  
 $\nu_t = (0,000089 \cdot t_{\text{п}}^2 + 0,088 \cdot t_{\text{п}} + 13,886) \cdot 10^{-6}$ , м<sup>2</sup>/с;
- число Прандтля:  
 $Pr = 0,00000051 \cdot t_{\text{п}}^2 - 0,0002493 \cdot t_{\text{п}} + 0,7086$ .

### Библиографический список

1	Карминский В.Д. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник : изд. Маршрут, 2006.
5	Исаченко В.П. и др. Теплопередача. М. Энергоатомиздат, 1988
6	Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом при имитационном моделировании процесса теплообмена: Методические указания к лабораторной работе/ Б.М. Калмыков. М.: МАИ, 1990. 28 с.
7	Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче: Учеб. пособие/ Под ред. В.И. Крутова, Е.В. Шишова. М.: Высш. шк., 1988. 216 с

## С о д е р ж а н и е

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1. Изучение методов и средств теплотехнических измерений.....	4
Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента теплопроводности твердого конструкционного материала методом пластины .....	10
Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента теплопроводности твердого конструкционного материала методом цилиндрического слоя,,,,,.....	14
Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции около горизонтального цилиндра.....	18
Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции (метод струны).....	22
Лабораторная работа № 6. Исследование процессов свободной и вынужденной конвекции при движении воздуха внутри и около горизонтального трубопровода.....	27
Лабораторная работа № 7. Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом.....	33
Библиографический список.....	38

Тепломассообмен

Учебно-методическое пособие к лабораторным работам

Редактор

Техническое редактирование и корректура

Подписано к печати 30.09.8. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. ....

Уч.-изд. л. .... Тираж 60. Изд. № .... Заказ №