

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

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

ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Учебно-методическое пособие
к лабораторным работам

Ростов-на-Дону
2016

УДК 536.7(07) + 06

Рецензент – доктор технических наук, профессор П.Г. Колпахчян

Риполь-Сарагоси, Т.Л.

Термодинамика и теплопередача: учебно-методическое пособие к лабораторным работам / Т.Л. Риполь-Сарагоси, А.Б. Кууск, А.М. Елманов; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2016. – 39 с. – Библиогр.: с. 38.

Приводятся методические указания к лабораторным работам по технической термодинамике и теплопередаче.

Предназначено для студентов 2–3-го курса и магистров очной и заочной форм обучения по направлениям: «Теплоэнергетика и теплотехника», «Электроэнергетика и электротехника», «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование», «Подвижной состав железных дорог».

Одобрено к изданию кафедрой «Теплоэнергетика на железнодорожном транспорте».

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа № 1. Методы и средства теплотехнических измерений ...	5
Лабораторная работа № 2. Определение относительной влажности воздуха	15
Лабораторная работа № 3. Изучение процесса истечения газа из сужающегося сопла	19
Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента теплопроводности твёрдого конструкционного материала методом пластины	23
Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции около горизонтального цилиндра	26
Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом.....	30
Приложение	35
Библиографический список.....	38

Введение

Настоящие методические указания предназначены для студентов для студентов и магистров очной и заочной форм обучения по направлениям: Теплоэнергетика и теплотехника, Электроэнергетика и электротехника, Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование, подвижной состав железных дорог. Выполнение лабораторных работ должно расширить и закрепить знания по основным разделам курса «Термодинамика и теплопередача», полученные на лекционных занятиях. Пояснения к лабораторным работам предназначены не только для понимания физической природы изучаемых явлений, выполнения работ и необходимых расчетов, но и для приобретения опыта постановки эксперимента и анализа его результатов. В лабораторных работах № 3, 4, 5, 6 используется имитационное моделирование, позволяющее получить измерительную информацию, аналогичную реальному эксперименту.

До выполнения лабораторной работы студент должен познакомиться с изучаемым процессом и лабораторной установкой по рекомендуемой литературе, конспекту лекций и настоящим методическим указаниям и подготовить протокол испытаний.

Лабораторная работа № 1.

Методы и средства теплотехнических измерений

1 Цель работы

Изучение наиболее распространенных методов измерения параметров состояния, приобретение практических навыков работы со средствами теплотехнических измерений.

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 термических параметров состояния (температуры, давления и удельного объема).

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, температура которой измеряется. 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 следует уделить особое внимание правильным способам установки термоприемников.

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 $-35 \dots 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Если предел измерения термометра выше $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, то пространство над ртутным столбиком заполняется газом (например, азотом) под давлением для исключения парообразования. Выпускаются ртутные термометры для точных измерений (погрешность $0,01 - 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и лабораторные (погрешность $1 - 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$). 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.

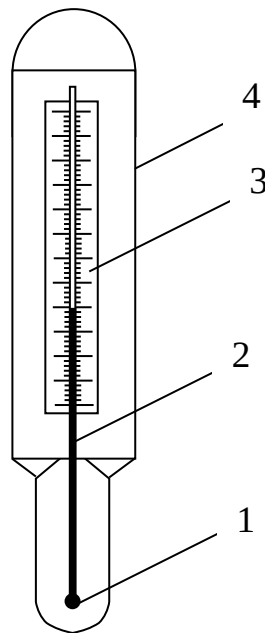


Рис. 1. Стеклянный жидкостный термометр:
1 – резервуар; 2 – капиллярная трубка; 3 – шкала; 4 – оболочка

Термоэлектрические термометры

Принцип действия этих термометров основан на термоэлектрическом эффекте, открытом Зеебеком в 1821 году. Сущность 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 $e_{AB}(t_0) = c = \text{const}$ 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 температура t_0 поддерживается равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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 защитный чехол с головкой. Чехол предохраняет термоэлектроды от вредного воздействия измеряемой среды, а головка обеспечивает соединение термоэлектродов с удлиняющими или соединительными проводами. Свободные концы термоэлектродов, или концы удлиняющих проводов при измерениях должны быть термостатированы.

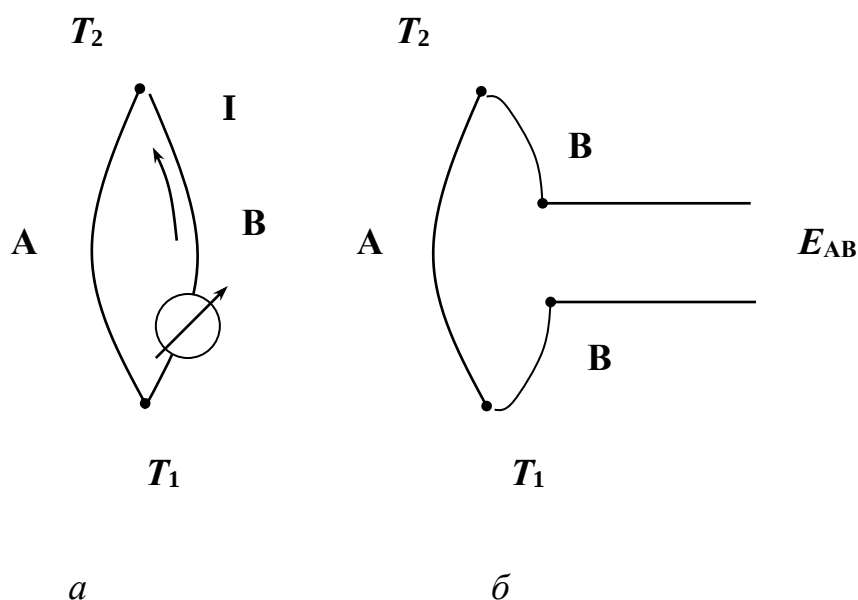


Рис. 2. Схема соединения двух проводников из разнородных материалов:
 a – замкнутая цепь, $б$ – разомкнутая цепь

В таблице 1 приведены характеристики стандартных термоэлектрических термометров.

Таблица 1

Основные характеристики стандартных термоэлектрических термометров

Тип термоэлектрического термометра	Материал термоэлектродов	Диапазон длительного измерения температуры, °С	Допускаемая кратковременная температура, °С
ТВР	Вольфрамрений (5% рения) – вольфрамрений (20 % рения)	0 – 2200	2500
ТПР	Платинородий (30% родия) – платинородий (6 % родия)	300 – 1600	1800
ТПП	Платинородий (10 % родия) – платина	0 – 1300	1600
ТХА	Хромель – алюмель	-200 – 1000	1300
ТХК	Хромель – копель	-200 – 600	800
ТМК	Медь – копель	-200 – 100	100

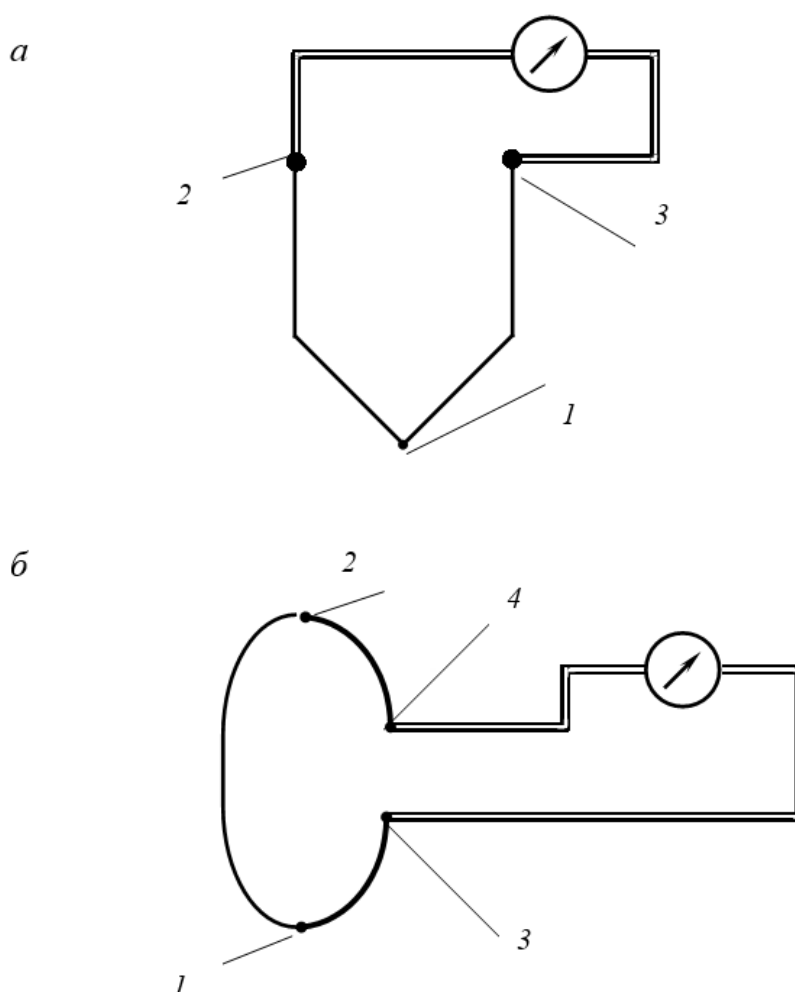


Рис. 3. Схемы подключения термоэлектрического термометра:

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 один рабочий конец 1 и два свободных 2 и 3, а по схеме на рис. 3, б – один рабочий 1, один свободный 2 и два нейтральных 3 и 4. Нейтральные концы в процессе измерения обязательно должны иметь одинаковую температуру, а свободные концы термоэлектронного преобразователя желательно термостатировать при 0 °С. Если такой возможности нет, то следует по возможности защитить их от разного рода тепловых потоков, способных изменить их температуру, и измерять их температуру 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 необходимость применения специальных удлиняющих проводов и необходимость термостатирования свободных концов.

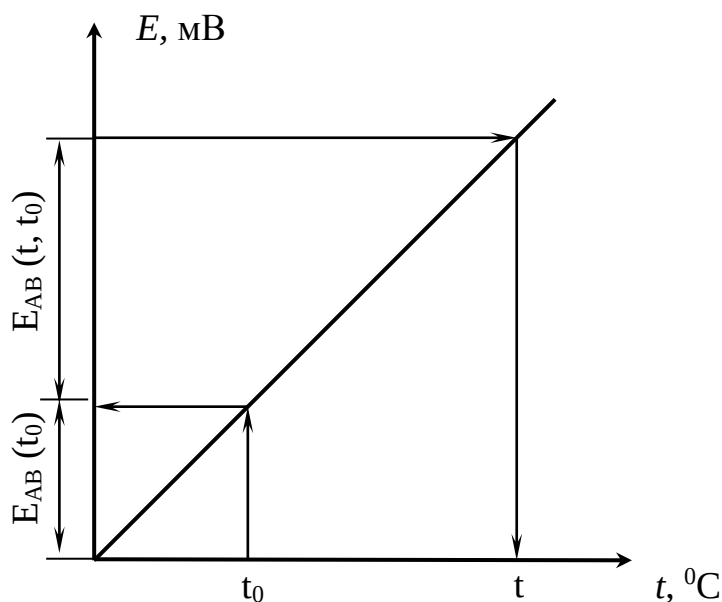


Рис. 4. Градуировочная характеристика термоэлектрического термометра

Термометры сопротивления

Принцип действия этих термометров основан на свойстве различных материалов (металлов и полупроводников) изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. Конструкция технического 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 измеряемой средой и проволокой 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. Через эти выводы термопреобразователь сопротивления подключается к измерительному прибору (измерительный мост, логометр или другой нормирующий преобразователь).

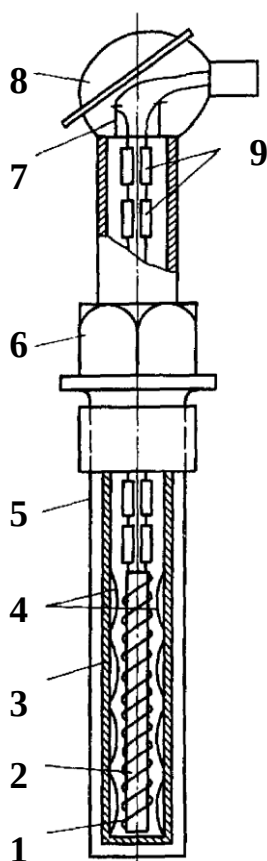


Рис. 5. Конструкция термометра сопротивления:

- 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

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

2.2 Средства измерения давления

Различают следующие средства измерения давления или разности давлений:

- манометр абсолютного давления – для измерения давления отсчитанного от абсолютного нуля;
- манометр избыточного давления – для измерения разности между абсолютным давлением измеряемой среды и барометрическим давлением;
- вакуумметр – для измерения разрежения, разности между барометрическим и абсолютным давлением измеряемой среды в том случае если последнее меньше барометрического;
- дифференциальные манометры – для измерения разности давлений;
- барометры – для измерения барометрического (атмосферного) давления.

По принципу действия различают следующие виды манометров: жидкостные, грузопоршневые, деформационные, электрические и другие.

Жидкостные манометры

На рис. 6 представлен U – образный (двухтрубный) жидкостный манометр. Избыточное давление, разрежение или разность давлений в этом приборе уравнивается гидростатическим давлением рабочей жидкости (дистиллированная вода, ртуть, этиловый спирт).

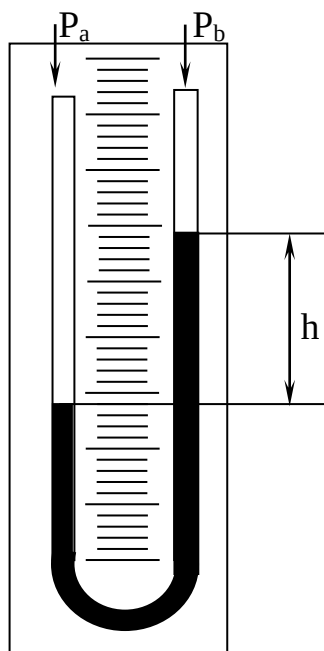


Рис. 6. Жидкостный U-образный манометр

Выбор рода рабочей жидкости определяется диапазоном измеряемых давлений, условиями эксплуатации и требуемой точностью измерений. Мерой измеряемого давления является высота столба рабочей жидкости – h , а в качестве единиц измерения используются мм.в.ст. ($1 \text{ мм.в.ст} = 9,8 \text{ Па}$) или мм.рт.ст. ($1 \text{ мм.рт.ст.} = 133,3 \text{ Па}$).

Жидкостными манометрами можно измерять лишь небольшие избыточные давления (обычно не более 100 кПа), иначе они становятся громоздкими и неудобными. В настоящее время номенклатура жидкостных манометров довольно ограничена, так как они вытесняются более совершенными деформационными средствами измерения давления.

Деформационные средства измерения давления

Принцип действия деформационных средств измерения давления основан на измерении упругой деформации чувствительного элемента или развиваемой им силы. В качестве чувствительных элементов наиболее часто используются трубчатые пружины, сильфоны и мембраны. На рис. 7 представлена схема манометра с одновитковой трубчатой пружиной 5. Эта пружина представляет собой упругую криволинейную металлическую полую трубку, один конец которой впаян в отверстие держателя 1, другой (подвижный) конец наглухо запаян и несет на себе наконечник 10. Полость пружины связана с измеряемой средой через канал в держателе и установочном штуцере 14. Трубчатая пружина преобразует разность подведенного абсолютного давления и давления окружающей среды (барометрического давления) в пропорциональное перемещение ее свободного конца. При чем под влиянием избыточного давления пружина раскручивается, а под действием разрежения скручивается. С помощью специаль-

ного передаточного механизма сравнительно небольшое перемещение свободного конца пружины преобразуется в гораздо большее угловое перемещение стрелки 4, которая используется для отсчета показаний на шкале 3. Шкала манометра равномерная, так как перемещение свободного конца пружины пропорционально измеряемому избыточному давлению (разрежению). Передаточный механизм смонтирован на плате 2, закрепленной на держателе, состоит он из зубчатого колеса (трибки) 8 и зубчатого сектора 9. Перемещение свободного конца пружины передается зубчатому сектору с помощью тяги 11. Для исключения люфта в передаточном механизме используется спиральная пружина 7, один конец которой крепится к оси трибки, а другой – к колонке 6, закрепленной на плате. Вращение зубчатого сектора вокруг оси 13 передается трибке и приводит к повороту соединенной с трибкой стрелки относительно шкалы манометра 3. Ход стрелки регулируется винтом 12, которым тяга крепится к хвостовику зубчатого сектора.

Простота конструкции, надежность и высокая точность позволили манометрам с трубчатыми пружинами стать наиболее распространенными приборами для измерения давления.

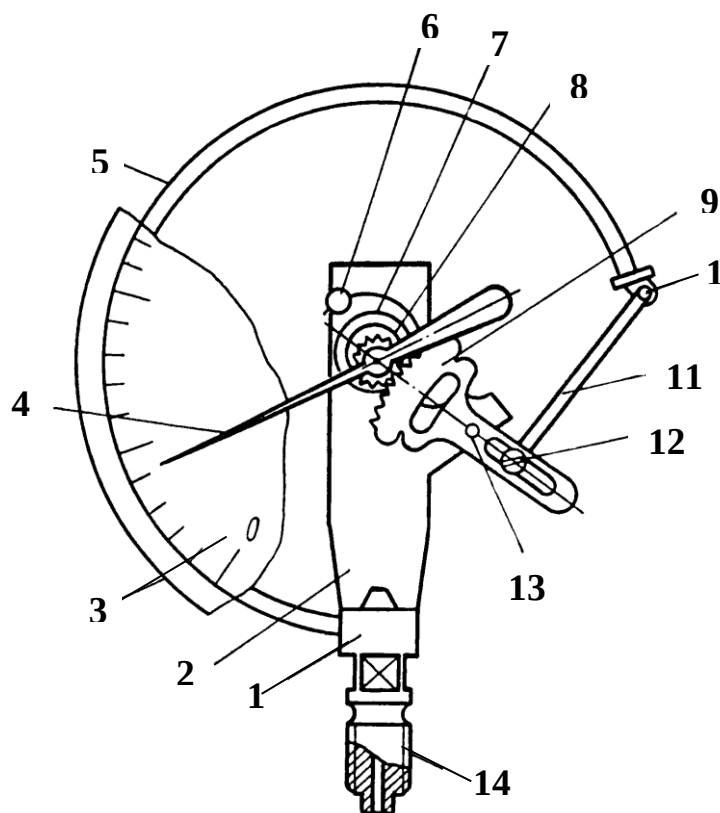


Рис. 7. Схема манометра с трубчатой пружиной

1 – держатель; 2 – плата; 3 – измерительная шкала; 4 – стрелка прибора;
5 – трубчатая пружина; 6 – колонка; 7 – спиральная пружина;
8 – зубчатое колесо; 9 – зубчатый сектор; 10 – наконечник; 11 – тяга;
12 – регулировочный винт; 13 – ось вращения; 14 – штуцер.

2.3 Средства измерения расхода

Расходом называется количество вещества, проходящее в единицу времени через сечение технологического трубопровода или канала. Средства измерения расхода называются расходомерами или преобразователями расхода. Широкое распространение получили расходомеры переменного перепада давления (дроссельные расходомеры), которые используют зависимость перепада давления на сужающем устройстве, установленном в трубопроводе, от расхода. В качестве сужающих устройств наиболее часто используются дроссельные диафрагмы и сопла. Диафрагма представляет собой тонкий диск с калиброванным круглым отверстием. Перепад давлений до и после диафрагмы измеряется дифференциальным манометром.

Величина массового расхода определяется по формуле:

$$Q_m = \alpha \cdot \varepsilon \cdot k_t \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}, \quad (3)$$

где: F_0 – площадь отверстия в диафрагме; м^2 ρ – плотность жидкости (газа) перед диафрагмой, кг/м^3 ; α – коэффициент расхода, зависящий от отношения площадей отверстия в диафрагме и трубопровода; ε и k_t – поправочные коэффициенты.

3 Содержание и порядок проведения работы

Студенты знакомятся с принципиальными схемами и устройством средств измерения температуры, давления и расхода. Измеряют избыточное и барометрическое давление, а затем вычисляют абсолютное давление.

4 Содержание отчета

В отчете раскрывается цель работы, приводятся принципиальные схемы наиболее распространенных средств измерения температуры и давления, описание опыта, полученные результаты, заключение.

Вопросы для самопроверки

1 Можно ли стеклянным ртутным термометром измерять температуры выше температуры кипения ртути при нормальном барометрическом давлении ($356,6^\circ\text{C}$), что для этого надо предусмотреть в конструкции термометра?

2 Как должен быть выполнен капилляр стеклянного жидкостного термометра, чтобы он измерял максимальную температуру?

3 Капилляр стеклянных жидкостных термометров, имеет на верхнем конце специальный дополнительный объем, каково его назначение?

4 При каком соотношении температур рабочего и свободных концов термоэлектрического термометра термоЭДС его будет равна нулю?

5 Вследствие небрежного выполнения электроизоляции термоэлектродов у них появилась еще одна точка контакта (помимо рабочего спая), какую температуру будет измерять такой термометр?

6 Изменится ли термоЭДС термоэлектрического термометра, имеющего линейную градуировочную характеристику, при изменении температуры ра-

бочего конца, но при сохранении разности температур рабочего конца и свободных концов?

7 Что покажет вторичный прибор при обрыве соединительного провода, если первичным преобразователем является: а) термоэлектрический термометр, б) термометр сопротивления?

8 Для измерения малых избыточных давлений трубку жидкостного манометра делают наклонной, с малым углом наклона (5 – 10 град.) к горизонтали, с какой целью?

9 Зависят ли показания пружинного манометра от температуры измеряемой среды?

10 Можно ли пружинными манометрами измерять быстропеременные давления?

Лабораторная работа № 2. Определение относительной влажности воздуха

1 Цель работы

Ознакомление с экспериментальными и расчетными методами определения характеристик влажного воздуха.

2 Пояснения к работе

Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха с водяным паром. При давлении близком к барометрическому, эта смесь по своим свойствам мало отличается от свойств идеального газа. Поэтому с достаточной точностью можно рассматривать влажный воздух как смесь идеальных газов, к которым применим закон Дальтона:

$$p_{\text{вв}} = p_{\text{св}} + p_n, \quad (4)$$

где: $p_{\text{вв}}$ – давление влажного воздуха, Па; $p_{\text{св}}$ – парциальное давление сухого воздуха, Па; p_n – парциальное давление водяного пара, Па.

Парциальное давление водяного пара всегда меньше или равно давлению насыщения пара при данной температуре.

Масса водяного пара, содержащаяся в 1 м³ влажного воздуха, называется абсолютной влажностью. Так как влажный воздух представляет собой газовую смесь, то объем водяного пара в смеси равен объему всей смеси и, следовательно, абсолютная влажность равна парциальной плотности пара в смеси при своем парциальном давлении p_n и температуре смеси:

$$\rho' = \frac{M_n}{V} = \frac{p_n}{R_n \cdot T}. \quad (5)$$

Относительной влажностью воздуха называют отношение абсолютной влажности воздуха к максимально возможной абсолютной влажности при данной температуре:

$$\varphi = \frac{\rho'_n}{\rho'_n}. \quad (6)$$

Полагая водяной пар идеальным газом, можно использовать соотношение:

$$\varphi = \frac{\rho'_n}{\rho_n} = \frac{p_n}{p_n}, \quad (7)$$

где p_n – давление насыщения при температуре влажного воздуха, Па.

Относительная влажность воздуха обычно выражается в процентах и изменяется в пределах от 0 до 100%. Для сухого воздуха $\varphi = 0$, а для воздуха, насыщенного водяным паром $\varphi = 100\%$.

Кроме относительной влажности, для характеристики состояния влажного воздуха часто используется отношение массы водяного пара m_n , содержащегося во влажном воздухе, к массе сухого воздуха, m_s , называемое влагосодержанием d влажного воздуха:

$$d = m_n/m_s \quad (8)$$

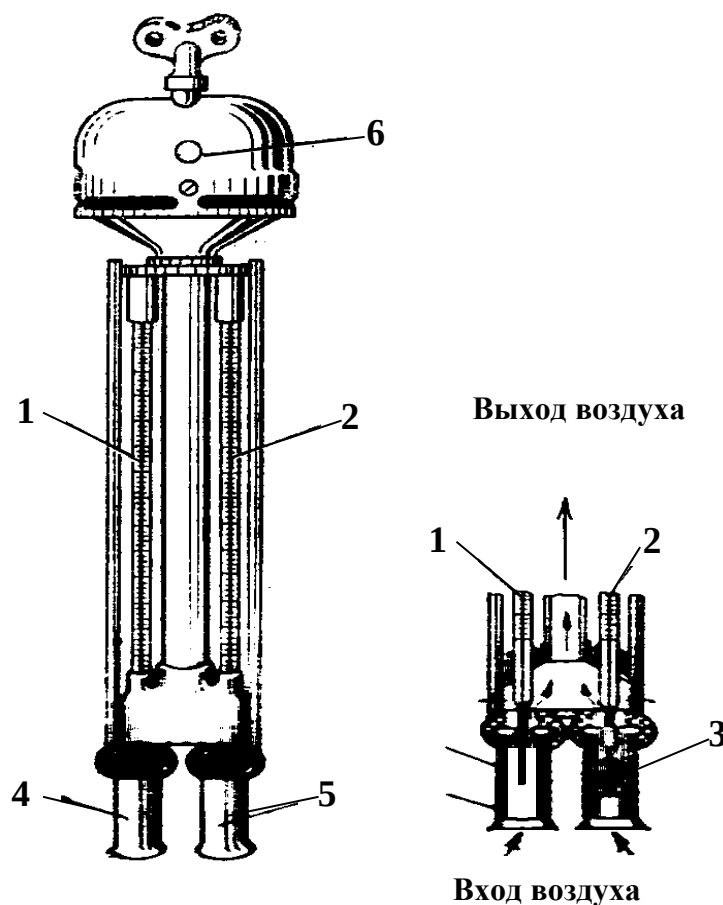


Рис. 8. Аспирационный психрометр:

1 – сухой термометр; 2 – мокрый термометр; 3 – батистовая ткань;
4, 5 – экранирующие трубки; 6 – вентилятор

Наиболее распространенным средством измерения относительной влажности воздуха являются психрометры. Психрометр (рис. 8) имеет два ртутных термометра: сухой 1 и «мокрый» 2. Чувствительная часть мокрого термометра обернута увлажненной тканью (батистом) 3. Вследствие испарения влаги «мокрый» термометр показывает температуру меньшую, чем сухой. Различие показаний термометров будет тем больше, чем меньше относительная влажность

воздуха. В наиболее совершенных конструкциях психрометров процесс испарения приближен к адиабатному. С этой целью чувствительная часть термометров экранируется трубками 4 и 5, наружная поверхность которых никелируется и полируется. Кроме того, с помощью вентилятора (аспиратора) 6 в зазорах между трубками и чувствительными элементами термометров создается поток воздуха, интенсифицирующий процесс испарения.

По значениям температур сухого и «мокрого» термометров с помощью психрометрической таблицы можно определить относительную влажность воздуха, а затем рассчитать другие параметры влажного воздуха (влагосодержание, плотность, энтальпию).

Результаты измерений заносятся в протокол эксперимента:

$$p_{вв} = \dots \text{Па}, t_c = \dots ^\circ\text{C}, t_m = \dots ^\circ\text{C}.$$

3 Обработка результатов опыта

Относительная влажность воздуха определяется по психрометрической таблице при значениях температур сухого и мокрого термометров, соответствующих стационарному состоянию.

Парциальное давление водяного пара определяется по формуле:

$$p_n = \varphi \cdot p_n, \text{Па}, \quad (9)$$

где: давление насыщения p_n определяется по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара при температуре воздуха.

Влагосодержание рассчитывается по формуле:

$$d = 0,622 \cdot p_n / (p_{вв} - p_n), \text{кг/кг с.в.} \quad (10)$$

Энтальпия влажного воздуха определяется как энтальпия газовой смеси, состоящей из 1 кг сухого воздуха и d кг водяного пара:

$$h_{вв} = h_{св} + d \cdot h_n, \quad (11)$$

где $h_{св} = c_v \cdot t_c$ – энтальпия сухого воздуха; $h_n = r_o + c_n \cdot t_c$ – энтальпия водяного пара; $r_o = 2501$ кДж/кг – теплота парообразования при 0°C ; c_v – средняя изобарная теплоемкость сухого воздуха в интервале температур $0 - t_c$ ($c_v = 1,005$ кДж/кг); c_n – средняя изобарная теплоемкость водяного пара в интервале температур $0 - t_c$ ($c_n = 1,93$ кДж/кг).

Газовая постоянная влажного воздуха определяется по формуле:

$$R = \frac{\mu R}{\mu} = \frac{8314}{\mu}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (12)$$

где $\mu = 28,96 - 10,94 \cdot p_n / p_{вв}$ – кажущаяся молярная масса влажного воздуха, кг/кмоль.

Плотность воздуха вычисляется из уравнения состояния:

$$\rho = \frac{p_{\text{вв}}}{R \cdot T_c}, \text{ кг/м}^3, \quad (13)$$

где T_c – абсолютная температура воздуха, К.

Численные значения φ , d , $h_{\text{вв}}$, p_n следует также определить и по $d - H$ диаграмме влажного воздуха. Для этого на пересечении изотермы t_c с линией «мокрого» термометра t_m следует найти точку, определяющую состояние влажного воздуха.

4 Содержание отчета

В отчете раскрывается цель работы, приводится принципиальная схема психрометра, описание определения относительной влажности с помощью психрометрической таблицы и $d - H$ диаграммы, результаты замеров и расчетов, а также выводы.

Вопросы для самопроверки

- 1 Что такое влажный воздух, с помощью каких характеристик можно определить его состояние?
- 2 Как определить парциальное давление сухого воздуха, если известно барометрическое давление и парциальное давление водяного пара?
- 3 Как определить объемные доли сухого воздуха и водяного пара во влажном воздухе, если известно барометрическое давление и парциальное давление водяного пара?
- 4 Можно ли, зная относительную влажность, определить влагосодержание влажного воздуха?
- 5 В $d - H$ диаграмме величины H и d отнесены к 1 кг сухого воздуха, какому количеству влажного воздуха это соответствует?
- 6 Что такое точка росы?
- 7 До какой температуры можно охладить влажный воздух, распыляя в нем холодную воду?
- 8 Как зависит плотность влажного воздуха от влагосодержания?
- 9 Что представляет собой туман, при каких условиях он может появиться во влажном воздухе?
- 10 Как зависит газовая постоянная влажного воздуха от относительной влажности?

Лабораторная работа № 3.

Изучение процесса истечения газа из сужающегося сопла

1 Цель работы

Экспериментальное исследование процесса истечения газа из сужающегося сопла.

2 Пояснения к работе

В лабораторной работе используется имитационное моделирование процесса истечения идеального газа из сужающегося сопла. Такое моделирование основано на главных положениях термодинамики и позволяет получать информацию, аналогичную реальному эксперименту. Рассмотрим процесс обратимого адиабатного истечения газа из емкости, в которой давление газа p_1 и температура T_1 остаются неизменными. Истечение происходит через сужающееся сопло в окружающую среду, давление в которой p_n может изменяться от p_1 до нуля. Очевидно, что при равенстве давлений $p_n = p_1$ истечения не происходит, расход газа равен нулю. При возникновении перепада давлений возникает поток газа, скорость которого в выходном сечении (устье) сопла зависит от отношения давлений p_1 и p_n . Давление внутри сопла при этом изменяется от p_1 на входе в сопло до $p_2 = p_n$ на выходе из него. Как показали экспериментальные исследования, такие закономерности сохраняются до тех пор, пока величина скорости истечения газа не достигнет значения равного местной скорости звука. Дальнейшее уменьшение внешнего давления не сказывается на распределении давлений внутри сопла и в том числе на значении давления p_2 . Отношение давлений, $p_2/p_1 = \beta$, при котором устанавливается величина скорости истечения, равная скорости звука, и сама скорость истечения называются критическими и обозначаются соответственно $\beta_{кр}$, $w_{кр}$. Величина $\beta_{кр}$ определяется из соотношения:

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)}, \quad (14)$$

где: k – показатель адиабаты для газа.

Величина критической скорости истечения газа равна:

$$w_{кр} = \sqrt{2 \cdot k \cdot R \cdot T_1 / (k+1)}, \text{ м/с} \quad (15)$$

где: R – газовая постоянная, Дж/кг·К.

Расход газа через суживающееся сопло также зависит от перепада давлений. При уменьшении β от 1 до $\beta_{кр}$ расход увеличивается, а затем при всех значениях $\beta < \beta_{кр}$, остается неизменным и равным:

$$M_{теор}^{макс} = f_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k+1} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot \frac{p_1^2}{R \cdot T_1}}, \text{ кг/с}, \quad (16)$$

где: f_2 – площадь выходного сечения сопла, м².

В реальных процессах истечения вследствие наличия трения о стенки канала и теплообмена с окружающей средой действительный расход газа через сопло, M_o , всегда меньше теоретического. Отношение действительного расхода газа к теоретическому называется коэффициентом расхода: $\mu = M_o/M_{теор}$.

3 Порядок проведения опытов

Экспериментальная установка состоит из макета рабочего участка и пульта управления с вмонтированными в него блоками измерения расхода и перепадов давления. Рабочий участок установки (рис. 9) представляет собой трубу, в которой установлено исследуемое сужающееся сопло 3 с выходным диаметром, $d=1,5 \pm 0,05$ мм. На входе в трубу установлен сетчатый фильтр 1 для механической очистки газа, поступающего в установку. Поток газа через сопло создается с помощью вакуумного насоса 5. Давление газа на входе поддерживается равным: $p_1 = 1$ бар. Расход газа M и скорость истечения регулируются вентилем 4. Рабочие режимы определяются величиной разрежения за соплом Δp_3 и разрежения Δp_2 в выходном сечении сопла, которые регистрируются на индикаторе блока перепадов давления 6 и дублируются на цифровом пульте управления. Расход газа измеряется с помощью дроссельной диафрагмы 2, диаметр отверстия в которой $d_{из} = 5$ мм. Перепад давления на диафрагме ΔH регистрируется на индикаторе блока расхода 7 и дублируется на пульте управления.

После включения установки в сеть, введения и запуска рабочей программы на телевизионном мониторе высвечивается тема лабораторной работы и схема экспериментальной установки с отображением

газа в рабочем участке, положения регулировочного вентиля и индикацией показаний измерительных приборов (ΔH , Δp_2 , Δp_3).

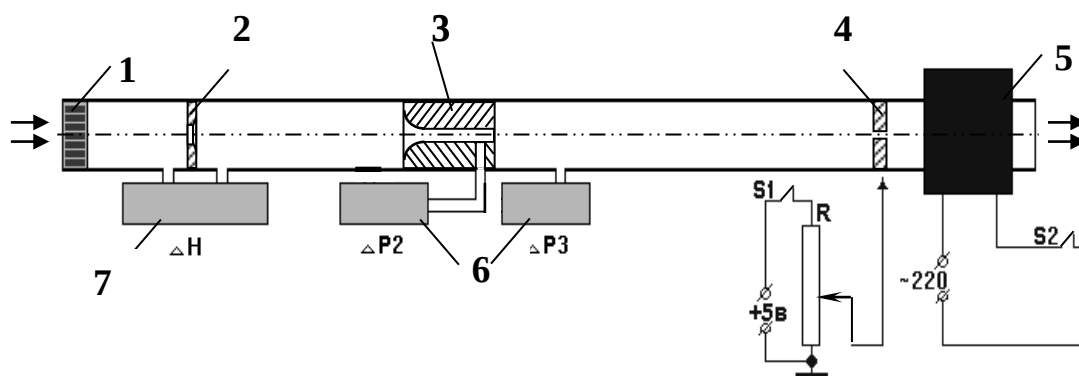


Рис. 9. Схема установки для изучения процесса адиабатного истечения газа через сужающееся сопло:

- 1 – сетчатый фильтр; 2 – дроссельная диафрагма; 3 – сужающееся сопло;
- 4 – регулировочный вентиль; 5 – вакуумный насос;
- 6, 7 – дифференциальные манометры

С помощью меню (раздел «Параметры») задается одно из трех возможных рабочих тел: воздух, диоксид углерода, гелий.

До начала эксперимента регулировочный вентиль 4 закрыт полностью и течение газа отсутствует, показания всех приборов должно быть равно нулю ($\Delta H=0$, $\Delta p_2=0$, $\Delta p_3=0$). После включения тумблеров питания измерительных приборов приступают к проведению опыта. Включается тумблер вакуумного насоса. Затем постепенным открытием вентиля 4 с помощью рукоятки на пульте управления устанавливается минимальное разрежение за соплом – $\Delta p_3 = 0,1$ бар (1-й режим). На экране монитора высвечиваются численные значения величин: ΔH , Δp_2 , Δp_3 . Последующие режимы снимаются при значениях разрежения $\Delta p_3 = 0,2, 0,3, \dots, 0,9$ бар. Результаты измерений ΔH , Δp_2 и Δp_3 во всех опытах заносятся в протокол испытаний (таблица 2).

Таблица 2

Протокол эксперимента и результаты обработки данных

Газ – _____; $B=$ _____ Па.

№ опыта	Результаты измерений			Результаты расчетов			
	Δp_2	Δp_3	ΔH	p_3	p_2	β	M_d
	бар	бар	Па	бар	бар		кг/с
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							

По окончании опытов все регулирующие органы приводятся в исходное положение.

1 Обработка результатов испытаний

Определяются абсолютные давления перед соплом, в выходном сечении сопла (на срезе) и за соплом:

$$p_1 = 1 \text{ бар.} \quad (17)$$

$$p_3 = p_1 - \Delta p_3, \text{ бар.} \quad (18)$$

$$p_2 = p_1 - \Delta p_2, \text{ бар.} \quad (19)$$

Рассчитывается отношение давлений:

$$\beta = p_3/p_1. \quad (20)$$

Определяется действительный массовый расход газа:

$$M_{\partial} = \mu_{ш} \cdot F_{ш} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{ш} \cdot \Delta H}, \text{ кг/с}, \quad (21)$$

где $\mu_{ш} = 0,95$ – коэффициент расхода (определен при тарировке);

$F_{ш}$ – площадь отверстия в дроссельной диафрагме; $\rho_{ш} = \frac{p_1}{RT_1}$ – плотность газа перед диафрагмой, кг/м³, $R = \frac{\mu R}{\mu} = \frac{8314}{\mu}$ – газовая постоянная, Дж/(кг К),

T_1 – температура воздуха перед диафрагмой, К; μ – молярная масса газа, кг/кмоль.

По формулам, приведенным в пояснениях к лабораторной работе, определяются теоретические значения $\beta_{кр}$ и максимального теоретического расхода газа $M_{теор}^{макс}$. Рассчитывается коэффициент расхода сопла:

$$\mu_c = \frac{M_{\partial}^{макс}}{M_{теор}^{макс}} \quad (22)$$

Строится график зависимости $M_{\partial} = f(\beta)$, и по нему находится опытное значение $\beta_{кр}$, оно сравнивается с теоретическим значением.

5 Содержание отчета

В отчете приводится цель работы, схема рабочего участка моделируемой экспериментальной установки, таблица замеров, графическая зависимость $M_{\partial} = f(\beta)$

Вопросы для самопроверки

- 1 При каких условиях процесс истечения газа можно считать адиабатным?
- 2 Как формулируется первый закон термодинамики для потока газа?
- 3 Какие каналы называются соплами, а какие диффузорами?
- 4 Как изменяются скорость, давление, удельный объем и температура газа при его движении в сужающемся сопле?
- 5 Что такое критический перепад давлений и критическая скорость истечения?
- 6 От каких факторов зависит скорость истечения из сужающегося сопла в докритической области истечения?
- 7 От каких факторов зависит скорость истечения из сужающегося сопла в сверхкритической области истечения?
- 8 Что надо сделать, чтобы увеличить расход газа при истечении из сужающегося сопла неизменной геометрии в сверхкритической области истечения?

9 С помощью какого устройства создается перепад давления в данной установке?

10 Возможно, ли при данной конструкции установки получить на выходе из сопла скорость большую, чем скорость звука?

11 Как осуществляется переход с одного режима работы опытной установки на другой?

12 Поясните на каком принципе основано измерение расхода газа в опыте?

Лабораторная работа № 4. **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 главных положениях теории теплопроводности и позволяет получать информацию, аналогичную реальному эксперименту. В данном случае моделируется метод неограниченного плоского слоя, часто используемый при опытном определении коэффициентов теплопроводности малотеплопроводных материалов. Образцу испытываемого материала придается форма 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/м² может быть определена по формуле:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{cm1} - t_{cm2}) \cdot F, \quad (23)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала пластины, Вт/м·К; δ – толщина пластины, м; t_{cm1} и t_{cm2} – температуры на поверхностях пластины, °С; F – площадь поверхности образца, м².

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

$$\lambda = \frac{Q \cdot \delta}{(t_{cm1} - t_{cm2}) \cdot F}. \quad (24)$$

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

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).

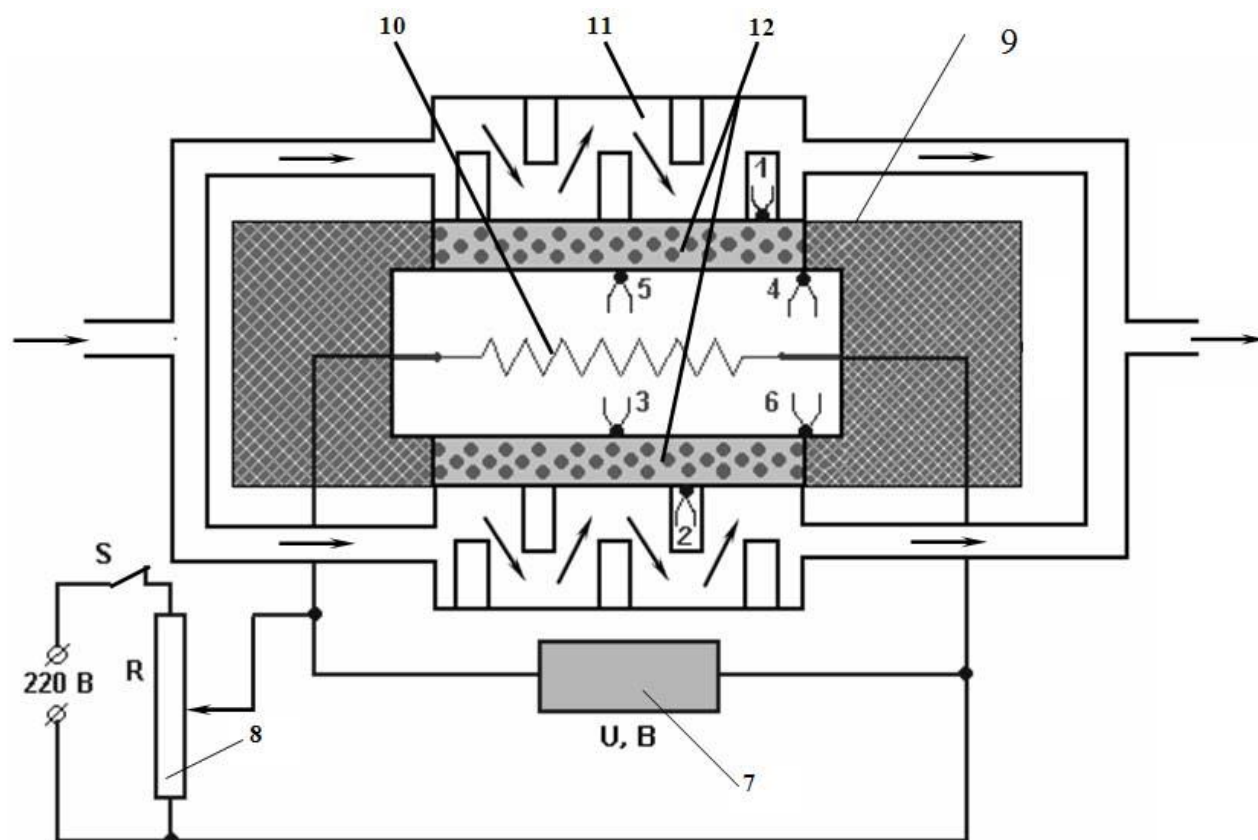


Рис. 10. Схема экспериментальной установки для определения коэффициента теплопроводности:

1–6 – термопары; 7 – вольтметр; 8 – реостат; 9 – теплоизоляционный кожух;
10 – нагревательный элемент; 11 – холодильник; 12 – испытываемые образцы;
S – выключатель

Рабочий участок 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, проходящий через образцы, 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 в милливольтках отображаются на экране видеомонитора.

В соответствии с указаниями преподавателя студент задает значение температуры горячей поверхности пластины и начальное (минимальное) напряжение на нагревателе и выполняет измерение термоЭДС термопар, 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 3

Протокол эксперимента и результаты обработки данных

№ опыта	U, В	Величина термоЭДС, мВ						t_z , °C	t_x , °C	t_{cp} , °C	λ_i , Вт/м К
		E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6				

4 Обработка результатов опытов

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

$$E_z = \frac{E_3 + E_4 + E_5 + E_6}{4}, \text{ мВ}; \quad (25)$$

$$E_x = \frac{E_1 + E_2}{2}, \text{ мВ} \quad (26)$$

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 °C):

$$t_z = \frac{E_z}{0,0695}, \quad t_x = \frac{E_x}{0,0695}, \text{ °C}. \quad (27)$$

Затем определяется опытное значение коэффициента теплопроводности фторопласта:

$$\lambda_i = \frac{Q \cdot \delta}{(t_z - t_x) \cdot F}, \quad (28)$$

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, м²; δ – толщина образца, м.

Так как величина коэффициент теплопроводности зависит от температуры, то полученное значение λ_i следует отнести к средней температуре опытного образца: $t_{cp} = 0,5 \cdot (t_z + t_x)$.

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 - λ и прове-

сти 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: λ_0 – величину коэффициента теплопроводности при $t_{cp} = 0$ °С и b – тангенс угла наклона построенной прямой.

6 Содержание отчета

В отчете приводится цель работы, схема рабочего участка моделируемой экспериментальной установки, таблица замеров, 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 испытуемый образец?
- 7 Объясните, почему коэффициент теплопроводности твердых материалов зависит от температуры, какова эта зависимость?
- 8 Назовите материалы, хорошо проводящие тепло и теплоизоляторы.
- 9 Можно ли на установке, используемой в данной лабораторной работе, определять коэффициент теплопроводности металлов?
- 10 Что такое нестационарный процесс теплопроводности?

Лабораторная работа № 5.

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 теплопроводности:

$$Q = \alpha \cdot (T_c - T_{жс}) \cdot F, \quad (29)$$

где Q – тепловой поток, Вт; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К;

T_c – температура поверхности цилиндра, К; $T_{жс}$ – температура воздуха вдали от поверхности цилиндра, К; F – площадь поверхности цилиндра, м².

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

$$\alpha = \frac{Q}{(T_c - T_{жс}) \cdot F}. \quad (30)$$

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 (см. рис.11). Рабочий участок установки представляет собой горизонтальную трубу 7. 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 – δ), 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 (табл. 4).

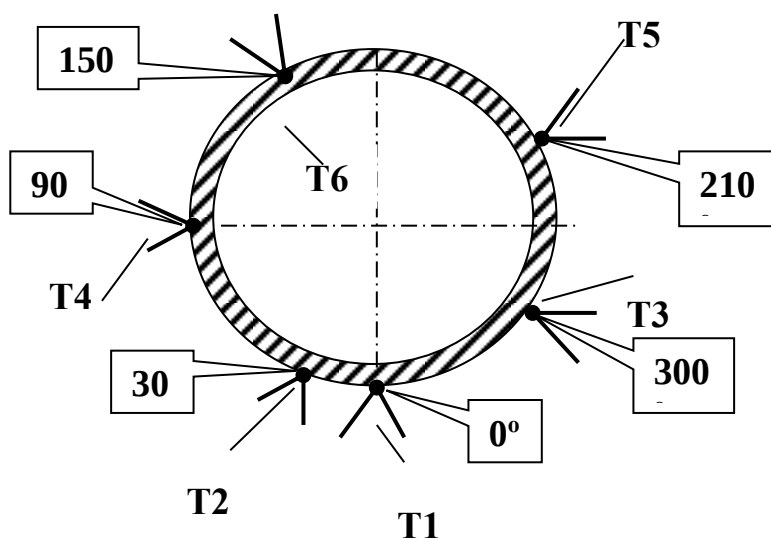
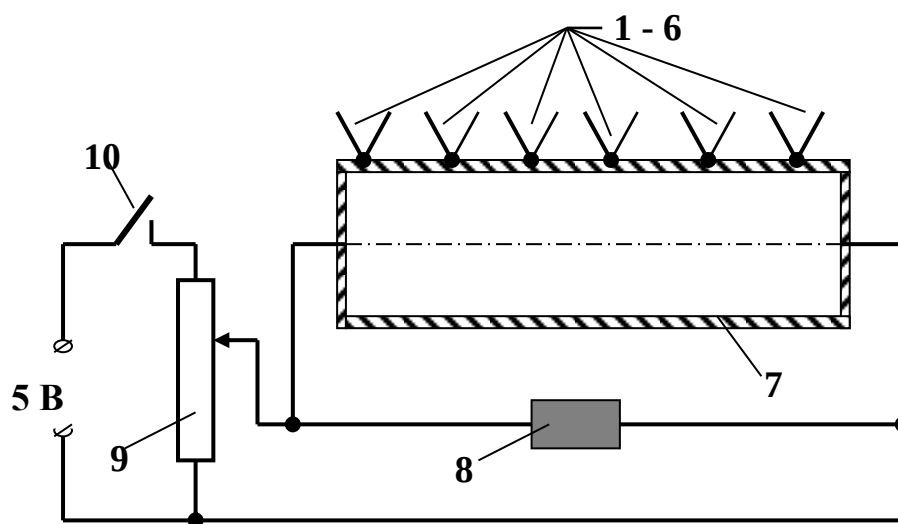


Рис. 11. Схема экспериментальной установки для определения коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции около горизонтального цилиндра:

1–6 – термоэлектрические термометры; 7 – горизонтальный цилиндр;
8 – вольтметр; 9 – реостат; 10 – выключатель

Таблица 4

Протокол эксперимента и результаты обработки данных

№ опыта	U, В	Величина термоЭДС, мВ						$T_{ст},$ К	$T_{жс},$ К	$Q_k,$ Вт	$\alpha,$ Вт/м ² К
		E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6				

4 Обработка результатов опытов

Для каждого опыта определяется среднее значение термоЭДС:

$$E_{cp} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6}{6}, \text{ мВ.} \quad (31)$$

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):

$$T_{cm} = 273,15 + \frac{E_{cp}}{0,0695}. \quad (31)$$

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

$$Q = \frac{U^2}{R_s}, \text{ Вт,} \quad (32)$$

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 тру-

бы (нержавеющая сталь), Ом·м; $f = \frac{\pi \cdot (d^2 - d_0^2)}{4}$ – площадь поперечного (кольцевого) сечения трубы, м²; $d_0 = d - 2 \cdot \delta$ – 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:

$$Q_k = Q - Q_l, \text{ Вт,} \quad (34)$$

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;

ε – степень черноты поверхности трубы (рекомендуется принять $\varepsilon = 0,1$); F – площадь наружной поверхности трубы, м², $F = \pi \cdot d \cdot L$.

Затем определяется опытное значение коэффициента теплоотдачи от поверхности трубы:

$$\alpha = \frac{Q_k}{(T_{cm} - T_{жс}) \cdot F}. \quad (35)$$

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

$$Nu_{жс,d} = 0,5 \cdot (Gr_{жс,d} \cdot Pr_{жс})^{0,25}. \quad (36)$$

В этом уравнении в качестве определяющей принимается температура окружающей среды, а в качестве определяющего размера принимается наружный диаметр трубы. Значения физических свойств воздуха, входящих в числа подобия, принимаются по [5].

7 Содержание отчета

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

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 его величина?
- 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 № 6.

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 осно-

ван 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

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).

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 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 схему установки входят вольтметр 9 и амперметр 10. Длина рабочего участка опытного образца между токоподводами составляет $L=0,2$ м, диаметр – $d = 2$ 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 (для медной проволоки рекомендуется тока нагрева – 15 – 30 А, а для вольфрамовой проволоки – 20 – 60 А) Напряжение на нагреваемой проволоке 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 1,0 – 1,5 °С.

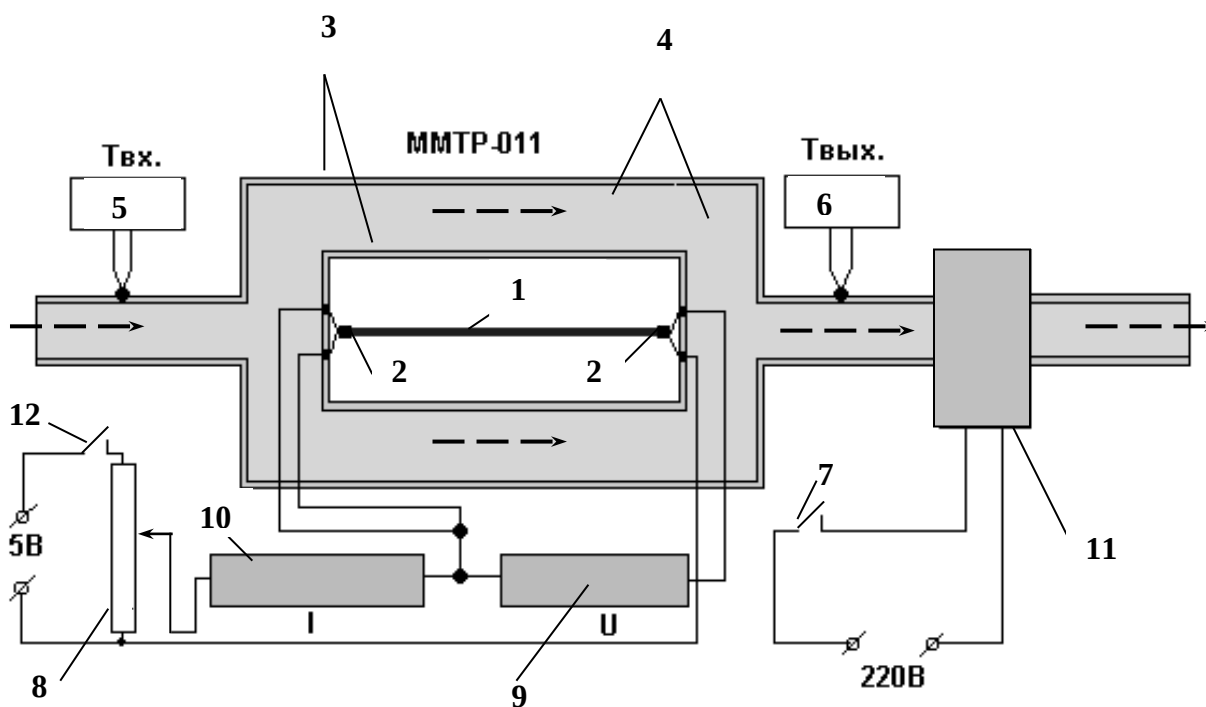


Рис. 12. Схема рабочего участка моделируемой экспериментальной установки: 1 – проволока из испытуемого материала; 2 – токоподводы; 3 – стеклянный сосуд; 4 – водяная рубашка; 5 и 6 – датчики температуры; 7 – выключатель электрического питания насоса; 8 – реостат; 9 – вольтметр; 10 – амперметр; 11 – насос;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

Результаты измерений, выполненные на четырех тепловых режимах, студенты заносят в протокол лабораторной работы (табл. 5).

Таблица 5

Протокол лабораторной работы

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

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:

$$C_1 = \frac{Q}{F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4), \quad (37)$$

Q – результирующий поток теплового излучения, Вт; $F_1 = \pi \cdot d \cdot L$ – площадь поверхности образца, м^2 ; T_1 и T_2 – средние температуры излучающей и тепловоспринимающей поверхностей, К.

Величина результирующего потока теплового излучения определяется по формуле:

$$Q = U \cdot I, \text{ Вт.} \quad (38)$$

Температура поверхности опытного образца определяется по формулам:

для меди: $T_1 = 194 \cdot (\rho \cdot 10^8)^{0.853}$;

для вольфрама: $T_1 = 4,65 \cdot (\rho \cdot 10^7)^4 - 90,3 \cdot (\rho \cdot 10^7)^3 + 590 \cdot (\rho \cdot 10^7)^2 - 1107 \cdot (\rho \cdot 10^7) + 974$;

где ρ – удельное сопротивление материала опытного образца.

Удельное сопротивление материала опытного образца определяется по формуле:

$$\rho = R \cdot S / L, \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (39)$$

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

Температура тепловоспринимающей поверхности стеклянной стенки определяется по формуле:

$$T_2 = (t_{\text{вх}2} + t_{\text{вых}2}) / 2 + 273, \text{ К.} \quad (40)$$

Степень черноты поверхности опытного образца определяется по формуле:

$$\varepsilon_1 = C_1 / C_0, \quad (41)$$

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

Результаты расчетов заносятся в табл. 6

Таблица 6.

Результаты обработки экспериментальных данных

№ опыта	ρ , Ом·м	T_1 К	T_2 К	Q Вт	C_1 Вт/(м ² К ⁴)	ε

По данным табл.6 построить графическую зависимость коэффициента излучения от температуры поверхности испытуемого образца.

Сравнить полученные значения степени черноты со справочными данными /1/.

5 Содержание отчета

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

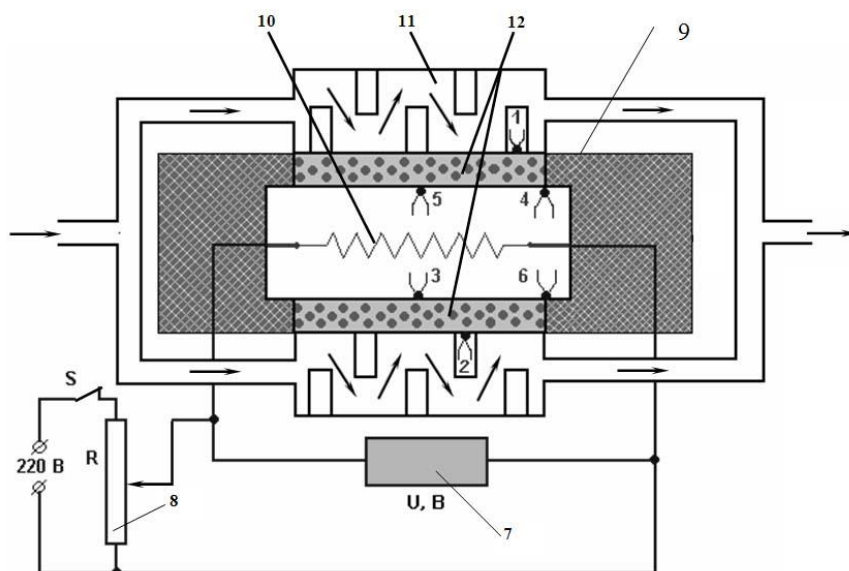
Вопросы для самопроверки

- 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 из проволоки (цилиндр с малым диаметром), а не какие-либо другие?
- 8 Назовите условия наступления стационарного теплового режима.
- 9 Почему в лабораторной установке разность температур $t_{2вх}$ и $t_{2вых}$ у охлаждающей воды не должна превышать 1–1,5 °С?
- 10 Каков физический смысл коэффициента излучения?

Определение коэффициента теплопроводности твердого конструкционного материала методом пластины

Цель работы: Экспериментальное изучение закономерностей процессов переноса теплоты теплопроводностью в твердых телах.

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

Таблица 1

Протокол опытных данных

№ опыта	U, В	Величина термоЭДС, мВ					
		E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6
1	60,1	4,19	4,16	7,09	6,81	7,02	6,88
2	70,8	2,91	2,88	7,09	6,81	7,02	6,88
3	80,9	1,47	1,44	7,09	6,81	7,02	6,88
4	90,4	-0,09	-0,12	7,09	6,81	7,02	6,88

Определяются средние значения термоЭДС термоэлектрических термометров, расположенных на горячей, E_2 и на холодной, E_x поверхностях пластины:

$$E_2 = \frac{E_3 + E_4 + E_5 + E_6}{4}, \text{ мВ}; \quad E_x = \frac{E_1 + E_2}{2}, \text{ мВ}.$$

$$E_z = \frac{7,09 + 6,81 + 7,02 + 6,88}{4} = 6,95 \text{ мВ}; E_x = \frac{4,19 + 4,16}{2} = 4,18 \text{ мВ}.$$

Рассчитываются средние температуры горячей и холодной поверхностей образца. Градуировочная характеристика хромель-копелевых термоэлектрических термометров принимается равной 0,0695 мВ/°C, а свободные концы термометров термостатированы при температуре 0 °C.

$$t_z = \frac{E_z}{0,0695}, \text{ } ^\circ\text{C}; t_x = \frac{E_x}{0,0695}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$t_z = \frac{6,95}{0,0695} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}; t_x = \frac{4,18}{0,0695} = 61,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тепловой поток проходящий через один образец рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{U^2}{2 \cdot R},$$

где U – напряжение, В; R – сопротивление нагревателя, Ом.

$$Q = \frac{60,1^2}{2 \cdot 41} = 44,05 \text{ Вт}.$$

Опытное значение коэффициента теплопроводности фторопласта:

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

где $F = \pi \cdot d^2 / 4$ – площадь поверхности одного образца, м²;
 δ – толщина образца, м.

$$F = \pi \cdot d^2 / 4 = 3,14 \cdot 0,21^2 / 4 = 0,01539 \text{ м}^2.$$

$$\lambda_i = \frac{44,05 \cdot 0,005}{(100 - 61,7) \cdot 0,01539} = 0,365 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Средняя температура опытного образца:

$$t_{cp} = 0,5 \cdot (t_z + t_x).$$

$$t_{cp} = 0,5 \cdot (100 + 61,7) = 81,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

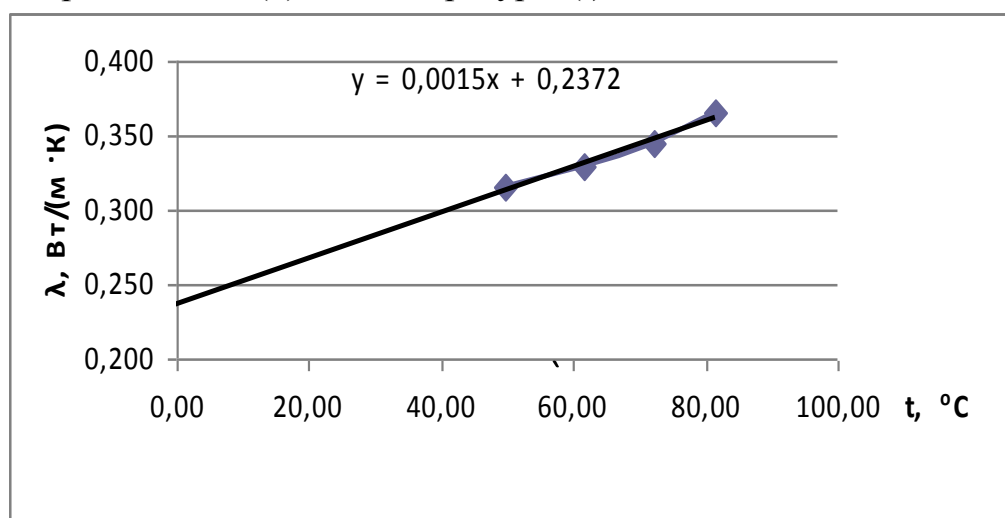
Результаты расчетов для всех опытов сводятся в таблицу 2.

Таблица 2

Протокол обработки данных эксперимента

№ опыта	Q,	Величина термоЭДС, мВ		t_x ,	t_z ,	t_{cp} ,	λ ,
	Вт	E_1	E_2	°C	°C	°C	Вт/(м · К)
1	44,05	4,18	6,95	61,7	100	81,31	0,3738
2	61,13	2,90	6,95	43,3	100	72,13	0,3504
3	79,81	1,46	6,95	22,1	100	61,54	0,3329
4	99,66	-0,11	6,95	-1,6	100	49,65	0,3188

По рассчитанным результатам строится график зависимости коэффициента теплопроводности (λ) от температуры (t).



Функциональная зависимость $\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot t_{cp})$ может быть представлена в виде:

$$\lambda = 0,2372 (1 + 0,0015 \cdot t_{cp}) \text{ Вт/(м · К)}.$$

Величина коэффициента теплопроводности при $t_{cp} = 0$ °C:

$$\lambda_0 = 0,2372 \text{ Вт/(м · К)}.$$

Тангенс угла наклона построенной прямой: $b = 0,0015 \text{ 1/°C}$.

Выводы

В результате проведенных измерений и обработки данных эксперимента было выявлено:

- зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для материала образца (фторопластового) близка к линейной;
- с увеличением температуры коэффициент теплопроводности фторопласта возрастает.

Выполнил
студент группы:

Принял преподаватель
кафедры «ТЭЖТ»:

Библиографический список

- 1 **Карминский, В.Д.** Техническая термодинамика и теплопередача: учебник / В.Д. Карминский. – Ростов н/Д : РГУПС, 2000.
- 2 Теплотехника / под ред. А.П. Баскакова, – М. : Энергоатомиздат, 1991.
- 3 Теплотехника / под ред. А.М. Архарова. – М. : Машиностроение, 1986.
- 4 Техническая термодинамика / под ред. В.И. Крутова. – М. : Высш. шк., 1991
- 5 **Исаченко, В.П.** Теплопередача / В.П. Исаченко [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1988.
- 6 **Калмыков, Б.М.** 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.

Учебное издание

Риполь-Сарагоси Татьяна Леонидовна
Кууск Анатолий Борисович
Елманов Андрей Михайлович

ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Печатается в авторской редакции

Технический редактор М.А. Гончаров

Подписано в печать 30.12.16. Формат 60×84/16

Бумага газетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,3.

Тираж экз. Изд. № 50194. Заказ .

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, 2.