

Министерство науки и образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики

Р. С. Закируллин

ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 18.03.01 Химическая технология, 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания, 20.03.01 Техносферная безопасность, 07.03.01 Архитектура, 07.03.03 Дизайн архитектурной среды, 08.03.01 Строительство, 08.04.01 Строительство, по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства

Оренбург
2019

УДК 536
ББК 22.3
3180

Рецензент – профессор, доктор физико-математических наук С. Н. Летута

3180 **Закируллин, Р. С.**
Теплотехника : методические указания / Р. С. Закируллин; Оренбург-
ский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019.

Методические указания содержат методику проведения лабораторных и практических занятий.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ и проведения практических занятий по дисциплинам, связанным с теплотехникой и ее разделами, для обучающихся по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 18.03.01 Химическая технология, 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания, 20.03.01 Техносферная безопасность, 07.03.01 Архитектура, 07.03.03 Дизайн архитектурной среды, 08.03.01 Строительство, 08.04.01 Строительство, по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства всех форм обучения.

УДК 536

ББК 22.3

© Закируллин Р. С., 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

Введение	4
1 Лабораторная работа № 1 «Приборы для измерения температуры»	5
2 Лабораторная работа № 2 «Приборы для измерения давления»	15
3 Лабораторная работа № 3 «Определение температурной зависимости удельной теплоемкости материалов»	24
4 Лабораторная работа № 4 «Зависимость между температурой и давлением газа в изохорном процессе»	30
5 Лабораторная работа № 5 «Определение показателя адиабаты для воздуха»	35
6 Лабораторная работа № 6 «Определение зависимости температуры от давления для насыщенного пара методом кипения»	41
7 Лабораторная работа № 7 «Графическое определение параметров влажного воздуха»	46
8 Лабораторная работа № 8 «Определение коэффициента теплопроводности методом трубы»	53
9 Лабораторная работа № 9 «Определение коэффициента теплоотдачи для тел цилиндрической формы методом регулярного теплового режима в условиях свободной конвекции»	58

Введение

В методических указаниях приведена информация о порядке выполнения лабораторных работ и проведения практических занятий по дисциплинам, связанным с теплотехникой и ее разделами, для обучающихся по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 18.03.01 Химическая технология, 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания, 20.03.01 Техносферная безопасность, 07.03.01 Архитектура, 07.03.03 Дизайн архитектурной среды, 08.03.01 Строительство, 08.04.01 Строительство, по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства всех форм обучения.

Целью разработки методических указаний является обеспечение возможности выполнения лабораторных работ и проведения практических расчетов по различным разделам теплотехники.

Основной задачей разработки методических указаний является получение студентами навыков выполнения лабораторных работ и проведения практических расчетов, а также более квалифицированного использования литературы по теплотехнике.

1 Лабораторная работа № 1 «Приборы для измерения температуры»

Цель работы: изучение устройства, принципа действия и правил эксплуатации и поверки приборов для измерения температуры.

Температура – мера интенсивности теплового движения молекул. Она характеризует тепловое состояние тела. Температура пропорциональна средней кинетической энергии поступательного движения молекул. Для идеального газа эта зависимость имеет вид:

$$T = \frac{2}{3k} \frac{m\omega^2}{2}, \quad (1.1)$$

где T – абсолютная температура, К; k - постоянная Больцмана, Дж/К; m - масса молекулы, кг; ω — средняя скорость поступательного движения молекул, м/с.

Измерение температуры тела непосредственным сравнением с единицей измерения невозможно, поэтому о температуре тела судят по изменению каких-либо свойств вещества, зависящих от температуры, т.е. измерение температуры осуществляется косвенными методами.

Температуру измеряют по термодинамической температурной шкале. Единицей термодинамической температуры является Кельвин (К), представляющий собой $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Эта температура равна 273,16 К и является единственной реперной точкой термодинамической шкалы, воспроизводимой опытным путем. В тройной точке все три фазы воды находятся в термодинамическом равновесии. Нижним пределом термодинамической шкалы является абсолютный нуль. Чтобы измерить температуру по этой шкале, необходимо осуществить цикл Карно, при котором отношение количества теплоты Q_1 , полученного телом от нагревателя, к количеству теплоты Q_2 , отданному им охладителю, равно отношению температур нагревателя T_1 и охладителя T_2

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (1.2)$$

Очевидно, что измерение температуры таким методом затруднительно, поэтому в 1968 году установлена международная практическая температурная шкала, основанная на шести реперных точках: точках кипения кислорода, воды и серы, тройной точке воды, точках затвердевания серебра и золота. Промежуточные точки определяются путем интерполяции.

Единицей измерения температуры кроме Кельвина служит также градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). Температура таяния льда равна 0°C , кипения воды – 100°C при нормальном атмосферном давлении. В связи с тем, что температура таяния льда на $0,01^{\circ}\text{C}$ ниже температуры тройной точки воды, температура t в $^{\circ}\text{C}$ и температура T , выраженная в К, связаны соотношением: $t = T - 273,15^{\circ}$.

Цена деления стоградусной шкалы Цельсия соответствует цене деления абсолютной шкалы Кельвина.

Таким образом, различают четыре температуры:

- 1) термодинамическая (абсолютная) температура Кельвина T , К;
- 2) термодинамическая (абсолютная) температура Цельсия t , $^{\circ}\text{C}$;
- 3) международная практическая температура Кельвина T_{68} , К;
- 4) международная практическая температура Цельсия t_{68} , $^{\circ}\text{C}$.

Для практических целей пользуются последними двумя температурами, опуская индекс 68.

В некоторых странах для измерения температуры пользуются шкалой Фаренгейта, на которой температура таяния льда равна 32° , кипения воды – 212° . Эта шкала связана со шкалой Цельсия следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} t^{\circ}\text{C} &= \frac{5}{9}(t^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}); \\ t^{\circ}\text{F} &= \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32^{\circ}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Приборы для измерения температуры, называемые термометрами, классифицируются в зависимости от физических свойств тела, по изменению которых судят об изменении температуры. Среди наиболее распространенных термометров можно выделить пять групп:

- 1) термометры расширения, основанные на изменении объема (длины) при изменении температуры;
- 2) манометрические термометры, измеряющие температуру через зависимость давления от температуры при постоянном объеме;
- 3) электрические термометры сопротивления, основанные на зависимости электрического сопротивления материалов от температуры;
- 4) термоэлектрические термометры, в принцип работы которых заложен термоэлектрический эффект, т.е. возникновение термоэлектродвижущей силы (термо-э.д.с.) в цепи из двух разнородных проводников при помещении их контактов в область с изменяющейся температурой при постоянной температуре свободных концов;
- 5) пирометры излучения, основанные на зависимости интенсивности лучеиспускания тел от их температуры.

К термометрам расширения относятся:

- 1) жидкостные стеклянные термометры, действие которых основано на различии коэффициентов объемного расширения термометрической жидкости (ртуть, спирт) и стекла при изменении температуры;
- 2) dilatометрические термометры, основанные на различных коэффициентах линейного удлинения двух стержней при изменении температуры;
- 3) биметаллические термометры, основанные на различных коэффициентах линейного удлинения двух металлов или сплавов, из которых состоит биметаллическая пластина.

Наибольшее распространение получили жидкостные стеклянные термометры, простые в эксплуатации. Они измеряют температуру от -200°C до $+750^{\circ}\text{C}$.

Жидкостные термометры дают сравнительно точные показания, но хрупки, обладают достаточно большой инерционностью, требуют хорошего освещения.

Жидкостный стеклянный термометр (рисунок 1.1) состоит из капилляра 1, в нижней части заканчивающегося резервуаром 2 с жидкостью; шкалы 3 и корпуса 4. Шкала может быть нанесена и непосредственно на капилляр (термометры с вложенной шкалой).

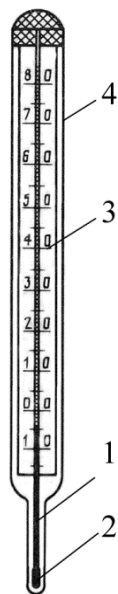


Рисунок 1.1 – Жидкостный стеклянный термометр

При установке термометров с вложенной шкалой нужно погрузить в измеряемую среду только хвостовую часть. Остальные термометры погружаются в измеряемую среду до отсчитываемого деления. В случае, когда термометр не может быть погружен в среду до отсчитываемого деления, следует при точных измерениях вводить поправку на выступающий столбик ртути. Эта поправка указывает, насколько показания термометра больше или меньше той температуры, которую термометр показывал бы при погружении в среду до отсчитываемого деления.

Дилатометрические и биметаллические термометры не получили распространения как самостоятельные измерительные приборы, а используются в виде отдельных узлов в системах автоматического регулирования.

Манометрические термометры, основанные на зависимости давления от температуры жидкости, пара или газа в замкнутом сосуде, применяются при необходимости дистанционного замера температуры и ее регистрации. Манометрические термометры имеют пределы измерения от $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$, погрешность измерений составляет 1-2 % от максимального значения шкалы. Манометрический термометр (рисунок 1.2) состоит из первичного прибора – термобаллона 1, соединительной капиллярной трубки 2, длина которой может достигать 60 м, и вторичного прибора, состоящего из полый пружины 3, при изменении давления через передаточный механизм 4 изменяющей положение стрелки 5.

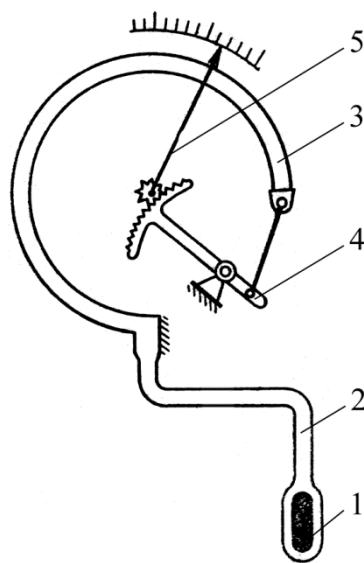


Рисунок 1.2 – Манометрический термометр

Вторичный прибор может быть показывающим и регистрирующим (самопишущим). Недостатки манометрических термометров связаны с необходимостью поддержания герметичности всей системы, соединяющей баллон с измерительной частью.

Термометры сопротивления измеряют температуру от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Они отличаются высокой точностью измерений: $0,05-0,5\%$ от максимального значения шкалы. В качестве термочувствительного элемента могут применяться как металлы (медь, платина), сопротивление которых при росте температуры увеличивается (для платины на $0,36\%$ при изменении температуры на 1°C), так и полупроводники, сопротивление которых при увеличении температуры значительно падает, до 6% на 1°C (отрицательный температурный коэффициент). Таким образом, чувствительность полупроводниковых термометров сопротивления, или термисторов, значительно выше, чем металлических.

Для измерения температуры термочувствительный элемент включают в электрическую цепь вторичного прибора – логометра или автоматического электронного моста, которые могут быть показывающими и регистрирующими.

Уравновешенный электрический мост (рисунок 1.3) состоит из двух параллельных ветвей: R_1 , R_3 и R_2 , R_t . В диагонали моста включены источник тока Б и нуль-гальванометр. Сопротивление R_t , помещенное в область, где необходимо измерить температуру, при установке стрелки гальванометра в нулевом положении равно:

$$R_t = R_3 \frac{R_2 + r_2}{R_1 + r_1}. \quad (1.4)$$

Каждому значению R_t , соответствует определенное положение ползуна Д, с осью которого через передаточный механизм связана стрелка прибора.

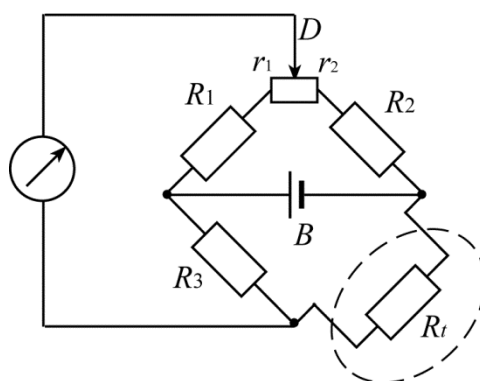


Рисунок 1.3 – Схема измерения сопротивления

Действие термоэлектрических термометров основано на термоэлектрическом эффекте, Механизмы возникновения термо-э.д.с. при контакте двух металлов и двух полупроводников несколько отличаются друг от друга. Коэффициент термо-э.д.с. для металлов $\varepsilon < 1 \cdot 10^{-5}$ В/К , для полупроводников $\varepsilon = (2 - 3) \cdot 10^{-4}$ В/К , т.е. значительно больше. В случае контакта двух металлов электроны в обеих ветвях термопары движутся от горячего спая к свободным концам и разность потенциалов появляется за счет разной концентрации свободных электронов, величина термо-э.д.с. равна:

$$E = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(T_1 - T_2), \quad (1.5)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – коэффициенты термоэдс. двух металлов; T_1, T_2 – температуры горячего и холодного концов термопары.

В случае же контакта двух полупроводников с электронной и дырочной проводимостью движущиеся по цепи противоположные потоки электронов и дырок за счет противоположных зарядов создают термо-э.д.с. значительно большей величины:

$$E = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)(T_1 - T_2), \quad (1.6)$$

Однако из-за хрупкости большинства полупроводников более распространены термопары из металлов и их сплавов.

Термоэлектрический термометр (рисунок 4) состоит из термопары 2 с контактом 1, компенсационных проводов 3, служащих для удлинения электродов термопары (если они изготовлены из драгоценных металлов), соединительных проводов 4 и измерительного прибора 5, в качестве которого могут служить милливольтметры и потенциометры (показывающие и регистрирующие). Милливольтметры измеряют э.д.с. прямым методом, стрелка отклоняется из-за взаимодействия тока, протекающего по рамке с магнитным полем постоянного тока, протекающего по рамке с магнитным полем постоянного магнита. Более точны измерения компенсационным методом, когда возникающая термо-э.д.с. уравнивается заранее известной разностью потенциалов от дополнительного источника. Такие приборы называют потенциометрами.

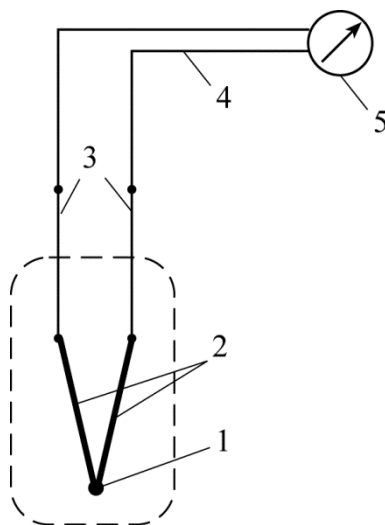


Рисунок 1.4 – Термоэлектрический термометр

Термоэлектрические термометры применяют для измерения температуры в пределах от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+2500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Точность составляет 0,1-2,5 % от максимального значения шкалы. Необходимо помнить, что температура холодных концов термопа-

ры тоже влияет на величину термо-э.д.с., поэтому ее поддерживают постоянной, и если она отличается от градуировочной температуры, то вносят соответствующую поправку.

Пирометры излучения применяют для измерения температуры в интервале от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (твердые и расплавленные тела) бесконтактным методом, т.е. измерительный преобразователь не соприкасается непосредственно с областью измеряемой температурой.

Пирометры излучения разделяют на два типа:

- 1) оптические – частичного излучения;
- 2) радиационные – полного излучения.

Действие оптического пирометра основано на том, что яркость излучения нагретым телом монохроматических лучей (лучей с одинаковой длиной волны) зависит от температуры тела.

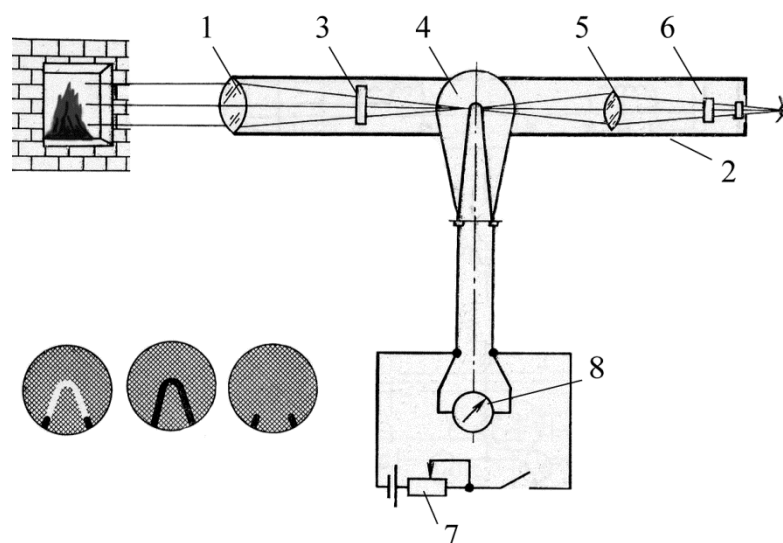


Рисунок 1.5 – Схема измерения сопротивления

Оптическая система пирометра (рисунок 1.5), содержащая телескопическую трубку 2, линзы 1 и 5, светофильтры 3 и 6, позволяет рассматривать эталонную нить яркости лампы накаливания 4, для которой заранее установлена зависимость ярко-

сти от температуры, на фоне изображения накаливаемого тела. Яркость эталонной нити регулируется реостатом 7 до совпадения с яркостью излучающего тела, то есть эталонная нить как бы исчезает на фоне изображения накаливаемого тела. Милливольметр, шкала которого проградуирована в °С, измеряет напряжение, подаваемое на лампу. Температуру можно измерять на расстоянии от 0,7 до 50 м от объекта.

Радиационные пирометры позволяют определить температуру путем измерения мощности суммарного (теплого и светового) излучения. Они состоят из телескопа, соединительных проводов и вторичного прибора – милливольтметра или потенциометра. Поток лучей в телескопе фокусируется на термобатарею, состоящую из последовательно соединенных миниатюрных термопар, по величине термо-э.д.с. которой оценивают температуру. Расстояние от телескопа до объекта должно быть в пределах 0,9-1,1 м.

Поверку показаний термометров осуществляют путем сравнения с показаниями термометров более высокого класса или образцовых термометров, а также по реперным точкам при помещении чувствительных элементов в среду с известной температурой.

Литература, рекомендуемая для выполнения работы

1. Крамарухин, Ю.Е. Приборы для измерения температуры / Ю.Е. Крамарухин. – М.: Машиностроение, 1990.
2. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – М: Энергия, 1978.
3. Зубарев, В.И. Практикум по технической термодинамике / В.И. Зубарев, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1971.
4. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов и др. – Л.: Машиностроение, 1986.

2 Лабораторная работа № 2 «Приборы для измерения давления»

Цель работы: изучение устройства, принципа действия и правил эксплуатации и поверки приборов для измерения давления.

Давление – это средний результат ударов молекул газа, находящихся в хаотическом движении, о стенки сосуда, в котором заключен газ. Согласно молекулярно-кинетической теории газа, давление p прямо пропорционально кинетической энергии поступательного движения молекул:

$$p = \frac{3n}{2v} \frac{m\omega^2}{2}, \quad (2.1)$$

где n – число молекул в удельном объеме; v – удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Давление равно отношению нормальной составляющей силы F , действующей на некоторую площадь A , на эту площадь: $p = F_n/A$.

Давление в Международной системе единиц (СИ) измеряется в Паскалях (Па), $1\text{Па} = 1\text{Н}/\text{м}^2$. Для практических измерений допускается к применению более крупная единица – бар, $1\text{бар} = 10^5\text{Па}$.

В теплотехнике давление часто измеряется в $\text{кгс}/\text{см}^2$ (техническая атмосфера), в мм рт. ст., в м вод. ст.

Между единицами давления существуют следующие соотношения: 1 техническая атмосфера – $1\text{кгс}/\text{см}^2 = 10\text{ м вод. ст.} = 735,56\text{ мм. рт. ст.}$

Различают 4 вида давления:

- 1) абсолютное $p_{\text{абс}}$ – отсчитанное от абсолютного вакуума;
- 2) атмосферное (барометрическое) p_0 – давление окружающей среды;
- 3) избыточное (манометрическое) $p_{\text{изб}}$ – разность между абсолютным и барометрическим давлениями (в случае, когда абсолютное давление больше барометрического): $p_{\text{изб}} = p_{\text{абс}} - p_0$.

4) вакуумметрическое $p_{\text{вак}}$ – разность между барометрическим и абсолютным давлениями (в случае, когда абсолютное давление меньше барометрического):

$$p_{\text{вак}} = p_0 - p_{\text{абс}}.$$

Во всех термодинамических расчетах используется абсолютное давление.

В практике приходится измерять атмосферное, избыточное и вакуумметрическое давления. Для измерения давления используют различные типы барометров, манометров и вакуумметров (вакуумметры устроены аналогично манометрам). По конструкции основного рабочего элемента приборы для измерения давления делятся на жидкостные, механические, электрические и грузопоршневые. В зависимости от вида давления, от предела измеряемого давления и требования точности выбирают соответствующий тип прибора:

- для измерения атмосферного давления – барометр-анероид, ртутно-чашечный барометр;
- для измерения избыточного или вакуумметрического давления – U-образный, чашечный, колокольный, поплавковый, пружинный трубчатый, мембранный, сильфонный, электрический манометр сопротивления, поршневой;
- для измерения перепада давления – дифференциальные манометры различных типов (конструкции аналогичны обычным манометрам).

Принцип действия барометра-анероида (рисунок 2.1) основан на использовании упругих свойств мембранной коробки 1, расположенной в корпусе 2 и являющейся основным рабочим органом барометра. Мембранная коробка представляет собой цельную коробку, закрытую с торцов двумя гофрированными мембранами. Внутри коробки создается сильное разрежение. С увеличением атмосферного давления мембраны прогибаются и передаточный механизм 3 поворачивает стрелку 4.

Ртутно-чашечный барометр состоит из стеклянной трубки, заполненной ртутью, верхний конец которой запаян, а нижний погружен в сосуд с ртутью, сообщаемый с атмосферой. Принцип действия прибора основан на уравнивании давления столба атмосферного воздуха силой тяжести ртутного столбика. К показаниям барометра вводятся следующие поправки:

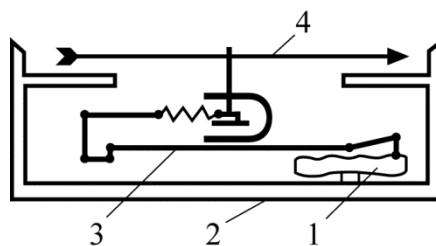


Рисунок 2.1 – Барометр-анероид

1) поправка для приведения показания барометра к 0°C (по термометру и специальной таблице);

2) поправка для приведения к нормальному ускорению свободного падения.

Кроме этого, к показанию прибора вводится инструментальная поправка по свидетельству прибора.

Для измерения небольшого избыточного давления или разрежения, а также разности давлений эталонным прибором является U-образный жидкостный манометр (рисунок 2.2), представляющий собой два сообщающихся сосуда, заполненных рабочей жидкостью.

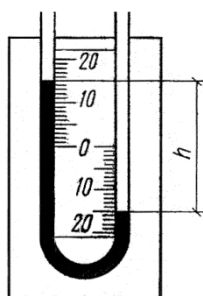


Рисунок 2.2 – U-образный манометр

В качестве манометрических жидкостей используют ртуть, спирт, керосин, подкрашенную дистиллированную воду. Разность давлений над свободными поверхностями жидкости в сосудах уравнивается высотой столба жидкости h пропорционально ее плотности. Схема измерения давления жидкости манометром

непосредственно вытекает из представлений о давлении как силе, приходящейся на единицу площади.

Чашечный манометр (рисунок 2.3) отличается от U-образного тем, что одна из трубок расширена и имеет вид чаши. Принцип действия приборов этого типа также основан на уравнивании измеряемого давления (разрежения) гидростатическим напором столба жидкости h_1 . Разновидностью чашечных манометров являются микроманометры с наклонной трубкой для измерения давлений до 100 Па.

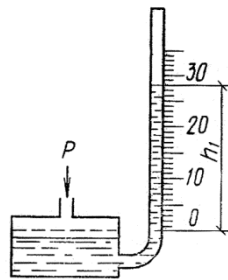


Рисунок 2.3 – Чашечный манометр

У колокольных манометров давление подводится под колокол, погруженный в манометрическую жидкость (рисунок 2.4). Колокол поднимается или опускается в зависимости от величины давления. Колокол связан со стрелкой, перемещающейся по измерительной шкале прибора.

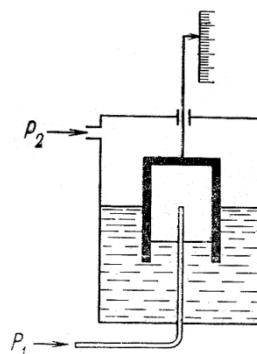


Рисунок 2.4 – Колокольный манометр

Поплавковые жидкостные манометры (рисунок 2.5) чаще всего применяют для измерения разности двух давлений p_1 и p_2 (дифференциальные манометры). Применяют их также в различных устройствах, измеряющих уровень и расход жидкостей и газов. В качестве манометрической жидкости обычно применяют ртуть и масло.

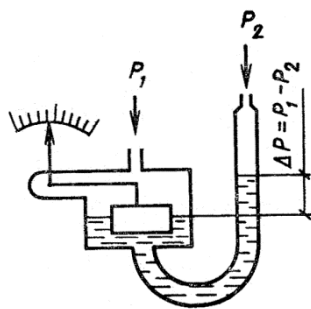


Рисунок 2.5 – Поплавковый манометр

В практике измерения давления очень широкое применение находят так называемые трубчатые или пружинные манометры. Они являются вторичными приборами и тарируются по поршневым манометрам.

Рабочей частью манометра (рисунок 2.6) является изогнутая стальная или латунная трубка 1, которая может быть одновитковой (трубка Бурдона) или многовитковой (геликс). Избыточное давление, которое необходимо измерить, подается в трубку. Трубка имеет овальное сечение и при повышении давления разгибается. Конец трубки связан с помощью передаточного механизма, состоящего из поводка 2 и зубчатого сектора 3, со стрелкой 4, которая поворачивается вокруг своей оси при повышении давления. Угол поворота стрелки почти линейно зависит от величины давления.

Трубчатые манометры имеют класс точности 0,2 и 0,35 (т.е. максимальная ошибка при измерении давления составляет 0,2 и 0,35% от нормального значения шкалы прибора). Трубчатый манометр обладает гистерезисом (величиной 0,2% от максимального давления, измеряемого манометром).

С помощью пружинных манометров можно осуществить измерение давлений до 10000 атм.

Пружинные приборы могут применяться также в качестве вакуумметров. Принцип действия и устройство вакуумметров аналогичны манометрам, только в изогнутую трубку подводится отрицательное давление и трубка деформируется под действием атмосферного давления, а на шкале прибора стрелка показывает величину разрежения (вакуум).

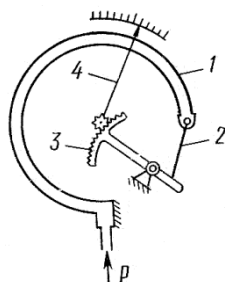


Рисунок 2.6 – Пружинный трубчатый манометр

Мембранные манометры в качестве чувствительного элемента имеют мембрану (рисунок 2.7), соединенную со стрелкой, которая через передаточный механизм перемещается по шкале вследствие деформации мембраны под действием подводимого давления из той области, где должно производиться измерение давления. С помощью мембранных манометров, выпускаемых промышленностью, можно измерить давление в диапазоне от 0,2 до 30 атм.

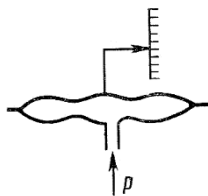


Рисунок 2.7 – Мембранный манометр

Сильфонные манометры (рисунок 2.8) измеряют давления до 0,4 Мпа. В металлическом стакане 1 помещен гармоникообразный цилиндрический сильфон 2, внутри которого установлена спиральная пружина 3. При подсоединении полости стакана к измеряемому давлению сильфон сжимается и шток 4 прибора перемещает стрелку.

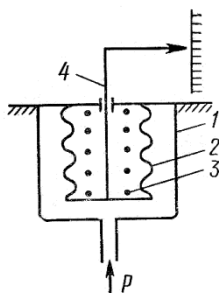


Рисунок 2.8 – Сильфонный манометр

Электрические манометры (рисунок 2.9) используют свойство проводников изменять сопротивление от действия давления. Проводник выполняют из манганина, изменение давления зависит от площади проводника. Электрическими манометрами можно измерять давления до 3000 Мпа с погрешностью 1%. Сопротивление измеряют вторичным прибором, шкала которого может быть отградуирована в единицах давления.

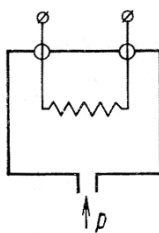


Рисунок 2.9 – Электрический манометр

Образцовым прибором для измерения высокого давления является грузопоршневой манометр (рисунок 2.10). Конструкция поршневого манометра вытекает из определения давления как силы, приходящейся на единицу площади. Поршневой манометр состоит из измерительной цилиндрической колонки с прецизионным поршнем 6 с тарелкой 7 для установки грузов. Под поршень манометра через воронку 5 заливается масло. Для создания давления масла служит винтовой пресс со стволом 3, поршнем 2 и штурвалом 1. Изменение давления производится при вращении штурвала или помещении дополнительного груза на тарелку. Поверку показаний пружинного или другого механического манометра 4 осуществляют путем сравнения с показаниями образцового манометра 8.

При помощи этого манометра можно измерить давление до 60 кгс/см^2 . Точность измерения давления в образцовых приборах такого типа может быть доведена до 0,01%.

Поршневые манометры для более высоких давлений имеют другую конструкцию. Поршень этих манометров имеет значительно меньший диаметр и соответственно меньшую длину, в некоторых манометрах применен гидравлический мультипликатор. Пределы измерения давления такими манометрами достигают 600 и 2500 кгс/см^2 , точность этих манометров 0,05%.

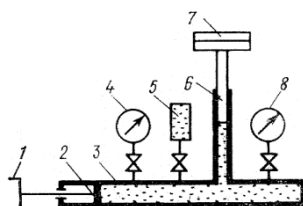


Рисунок 2.10 – Грузопоршневой манометр

Поверка манометра осуществляется в следующем порядке.

1. Присоединить поверяемый рабочий манометр к установке. Допустимая погрешность поршневого и образцового манометров должна быть в четыре раза меньше, чем у поверяемого.
2. Залить масло через воронку и закрыть кран.
3. Поворотом штурвала установить поршень с грузом во взвешенное состояние (поршень должен находиться в пределах своего рабочего хода). Давление масла изменять фиксировано путем вращения штурвала или помещения дополнительных грузов.
4. При каждой фиксации сравнивать показания рабочего манометра с образцовым. Рассчитать давление по формуле: $p = F/A$, где F – сила тяжести грузов и поршня H ; A – рабочая площадь поршня, м^2 .
5. Сопоставить показания рабочего и образцового манометров также при снижении давления.
6. Рассчитать приведенную погрешность прибора ε , %: $\varepsilon = [(p_0 - p_n)p_{\text{вп}}]100$, где p_0 , p_n – показания образцового и поверяемого манометров; $p_{\text{вп}}$ – максимальное значение предела измерения.
7. Оформить протокол измерений и установить годность манометра.

Литература, рекомендуемая для выполнения работы

1. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – М: Энергия, 1978.
2. Зубарев, В.И. Практикум по технической термодинамике / В.И. Зубарев, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1971.
3. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов и др. – Л.: Машиностроение, 1986.
4. Патричный, В.А. Мировые тенденции развития методов и средств измерений: Аналитический обзор / В.А. Патричный, А.Ш. Сире. – М.: Изд-во стандартов, 1994.

3 Лабораторная работа № 3 «Определение температурной зависимости удельной теплоемкости материалов»

Цель работы: изучение метода динамического калориметра для определения теплоемкости материалов при различных температурах.

Теплоемкость тела – физическая величина, равная отношению элементарного количества теплоты, поглощенного телом при бесконечно малом изменении его состояния, к соответствующему приращению температуры тела. Различают удельную (массовую), объемную и молярную теплоемкости. В каждом конкретном термодинамическом процессе теплоемкость оказывается теплофизической характеристикой вещества, однозначно зависящей от температуры и давления, а также от способа подвода теплоты при каком-либо неизменном параметре. Чаще всего такими параметрами являются удельный объем и давление, определяемые при этом удельные теплоемкости называют соответственно изохорной c_v и изобарной c_p , Дж/кгК.

В малом интервале температур теплоемкость можно считать постоянной величиной (истинная теплоемкость), в широком интервале пользуются средней теплоемкостью.

Для идеальных газов разность изобарной и изохорной теплоемкости равна удельной газовой постоянной R , Дж/кгК, (соотношение Майера): $c_p - c_v = R$.

У жидкостей и твердых веществ разность $c_p - c_v$ незначительна, поэтому в технических расчетах ею часто пренебрегают, пользуясь экспериментальными значениями изобарной теплоемкости.

Теплоемкость является тепловой характеристикой равновесного соотношения вещества. В связи с этим все методы ее непосредственного определения должны основываться на переходе системы из одного равновесного состояния в другое посредством поглощения заданного количества теплоты. Одним из методов измерения теплоемкости является метод динамического калориметра, схема которого представлена на рисунке 1.

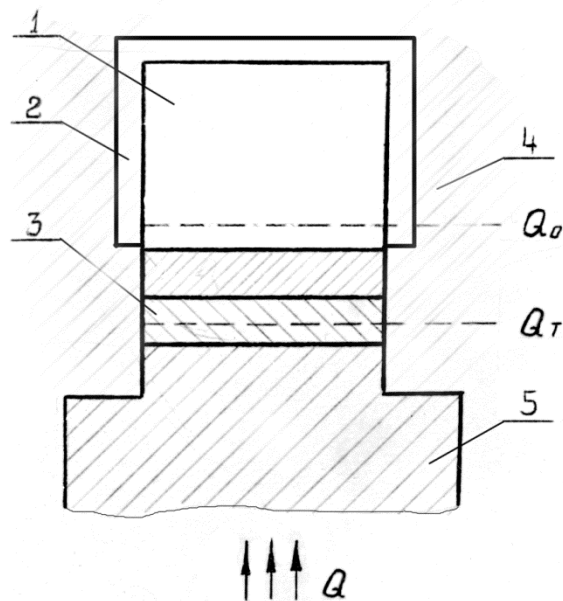


Рисунок 3.1 – Схема динамического калориметра

Образец 1 и тепломер 3 монотонно разогреваются тепловым потоком Q , Вт, поступающим от основания 5. Поверхность ампулы 2 отделена от внешней среды адиабатной оболочкой 4.

Тепловой поток Q_m , Вт, проходящий через среднее сечение тепломера, идет на разогрев образца и ампулы и составляет: $Q_m = Q_o + Q_a$, где Q_o – тепловой поток, идущий на разогрев образца, Вт; Q_a – тепловой поток, идущий на разогрев ампулы, Вт. Тепловой поток на разогрев образца определяется: $Q_o = c m_o b$, где c – удельная теплоемкость образца, Дж/кгК; m_o – масса образца, кг; b – скорость разогрева ампулы, К/с, определяется из формулы: $Q_a = C_a b$, где C_a – полная теплоемкость ампулы, Дж/К.

О величине теплового потока Q_m , проходящего через тепломер, можно судить по величине перепада температур на тепломере v_m , К, и тепловой проводимости тепломера k_m (является характеристикой прибора), Вт/К: $Q_m = k_m v_m$.

Удельная теплоемкость образца определяется:

$$c = \frac{1}{m_o} \left(\frac{k_m v_m}{b} - C_a \right). \quad (3.1)$$

При малых перепадах температуры на тепломере можно перейти к измерению времени запаздывания температуры τ_m , с, на тепломере при экспериментах с образцом, учитывая, что $\tau_m = v_m/b$. Тогда расчетная формула примет вид:

$$c = \frac{k_m}{m_o} (\tau_m - \tau_m^0), \quad (3.2)$$

где τ_m^0 – время запаздывания температуры на тепломере (постоянная прибора) при экспериментах с пустой ампулой, с.

Измеритель теплоемкости, схема которого изображена на рисунке 2, состоит из измерительного блока, блока питания и регулирования, гальванометра.

На передней панели измерительного блока установлены термодатчик переключатель и переключатель температурных режимов. Образец для испытаний в ампуле устанавливается в измерительную ячейку, находящуюся в верхней выдвижной части измерительного блока.

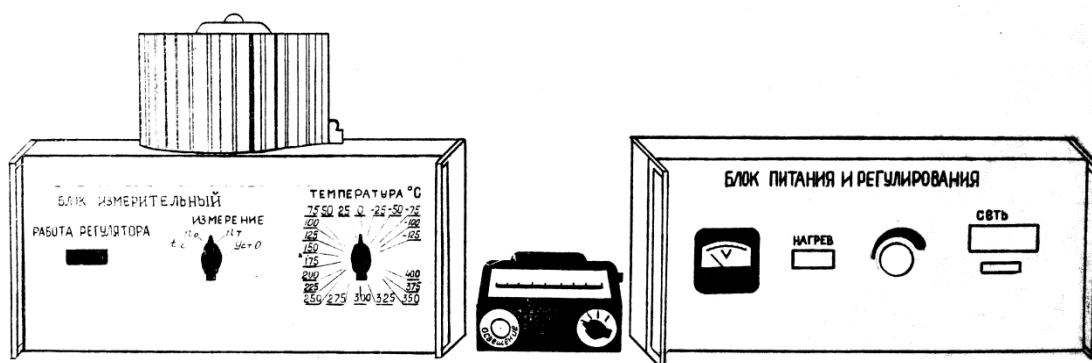


Рисунок 3.2 – Внешний вид измерителя

На передней панели блока питания и регулирования установлены: вольтметр, кнопки сети установки начального напряжения. Плавное увеличение напряжения

обеспечивается электродвигателем через редуктор. Возвращение рукоятки в исходное положение осуществляется вручную за счет поворота против часовой стрелки с предварительным отжимом на себя.

Подготовка установки.

1. Проверьте соединение блока питания и регулирования гальванометра и измерительного блока.

2. Переведите переключатели «Сеть», «Нагрев» в положение «Выкл.»

3. Подключите блок питания и регулирования и гальванометр к сети 220 В.

4. Установите:

- переключатель «Измерение» в положение «Уст.О»;

- переключатель «Температура» в положение «25 °С» (если комнатная температура превышает 25 °С, то в положение «50 °С»).

5. Выключите арретир гальванометра и произведите коррекцию нуля (нуль гальванометра сместите на 70 делений вправо с целью использования всей шкалы).

6. Взвесьте образец с точностью до 0,001 г (для экспериментов используется медный образец массой 15,412 г).

7. Поднимите верхнюю часть блока измерительной ячейки.

8. Произведите обезжиривание контактных поверхностей образца, ампулы и крышки бензином и нанесите тонкий слой теплостойкой смазки.

9. В ампуле установите испытуемый образец и закройте ампулу крышкой.

10. Опустите верхнюю часть блока измерительной ячейки.

11. Включите блок питания и регулирования, нажав кнопку «Сеть».

12. Установите по вольтметру начальное напряжение (40 ± 2 В).

Порядок проведения эксперимента

1. Установите переключатель «Измерение» в положение « t_1 ». Включите кнопкой «Нагрев» основной нагреватель.

2. Включите секундомер при достижении установленной температуры (при прохождении светового указателя гальванометра через нуль шкалы) и переведите переключатель «Измерение» в положение « t_2 ».

3. Выключите секундомер при прохождении светового указателя через нуль шкалы.

4. Запишите указания секундомера в графу τ_m таблицы 1.

5. Повторите измерения τ_m при всех значениях температуры (25°C -400 °C).

6. Выключите нагреватель при достижении желаемого уровня температуры (верхнего уровня). Установите переключатель «Измерение» в положение «Уст.О». Заарретируйте гальванометр, проведите охлаждение блока измерительной ячейки до комнатной температуры.

7. Проведите расчет удельной теплоемкости c по формуле (3.2) и данные занесите в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментов

Образец для испытаний – медь. Масса – 15,412 г. Размеры: диаметр – 15 мм, высота 10 мм.				
$t_c, ^\circ\text{C}$	$\tau_m, \text{с}$	$\tau_m^0, \text{с}$	$k_m, \text{Вт/К}$	$c, \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$
25		15,1	0,353	
50		15,3	0,360	
75		15,8	0,358	
100		16,0	0,371	
125		16,3	0,378	
150		16,5	0,397	
175		16,6	0,394	
200		16,6	0,400	

8. Сравните полученные данные с известными справочными значениями теплоемкости исследуемого материала. Сделайте выводы.

9. Нарисуйте график зависимости $c = f(t_c)$.

Литература, рекомендуемая для выполнения работы

1. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов и др. – Л.: Машиностроение, 1986.
2. Патричный, В.А. Мировые тенденции развития методов и средств измерений: Аналитический обзор / В.А. Патричный, А.Ш. Сире. – М.: Изд-во стандартов, 1994.
3. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

4 Лабораторная работа № 4 «Зависимость между температурой и давлением газа в изохорном процессе»

Цель работы: экспериментальное подтверждение прямо пропорциональной зависимости температуры идеального газа от давления в изохорном процессе.

Термодинамический процесс, протекающий при постоянном объеме, называют изохорным. Уравнение изохоры получается из уравнения состояния идеального газа $pv = RT$ при $v = \text{const}$:

$$\left(\frac{p}{T}\right) = \left(\frac{R}{v}\right) = \text{const}.$$

Давление газа изменяется прямо пропорционально его температуре:

$$\left(\frac{p_1}{T_1}\right) = \left(\frac{p_2}{T_2}\right). \quad (4.1)$$

На pv -диаграмме изохорный процесс представляется вертикальной линией (рисунок 4.1). При подведении теплоты давление увеличивается и наоборот.

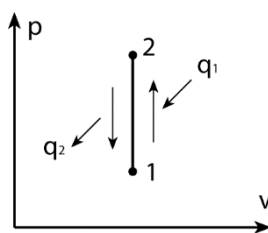


Рисунок 4.1 – Изохора на pv -диаграмме

Удельная работа расширения газа l , Дж/кг, при изохорном процессе:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = 0.$$

Удельная располагаемая работа газа l^I , Дж/кг:

$$l^I = \int_{p_1}^{p_2} v dp = -v(p_2 - p_1).$$

Первый закон термодинамики: $\delta q_v = du = c_v dt$, где q_v – удельное количество теплоты, участвующее в изохорном процессе, Дж/кг; u – удельная внутренняя энергия газа, Дж/кг.

Удельное количество теплоты, участвующее в изохорном процессе:

$$q_v = \int_{t_1}^{t_2} c_v dt = c_v(t_2 - t_1) = u_2 - u_1.$$

Изменение удельной энтропии в изохорном процессе:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = c_v \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right).$$

Из этого уравнения видно, что на Ts -диаграмме изохора – логарифмическая кривая (рисунок 4.2), причем для одной и той же массы газа изохоры различных объемов – эквидистантные кривые. При большем объеме изохора располагается дальше от оси ординат.

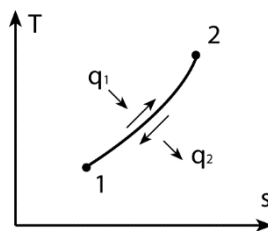


Рисунок 4.2 – Изохора на Ts диаграмме

Опыт проводится с воздухом, который при обычных условиях (не слишком высоком давлении и не слишком низкой температуре) близок по своим свойствам к идеальному газу.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3. Воздух заключен внутри сосуда 1, давление в котором измеряется с помощью образцового манометра 5. Вентиль 3 позволяет соединить сосуд 1 с атмосферой. Подогрев воздуха производится с помощью электронагревателя 2. Температура воздуха внутри сосуда определяется с помощью термопары 4. В качестве вторичного прибора 6 используется автоматический потенциометр КСП-4.

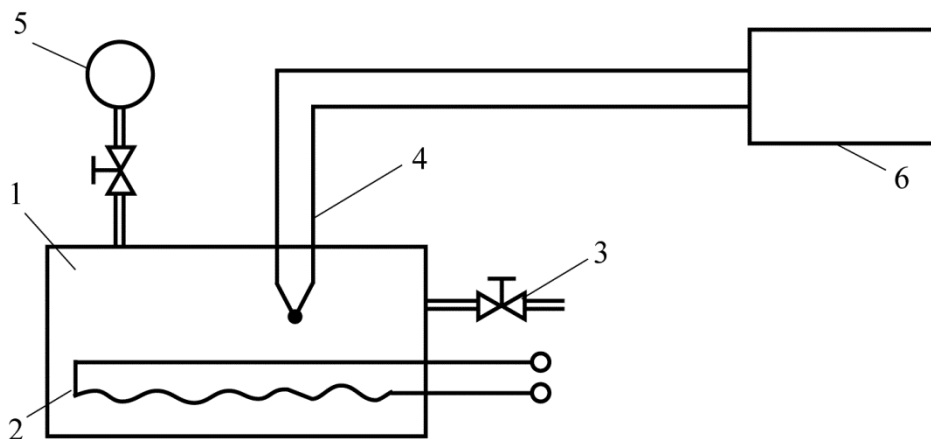


Рисунок 4.3 – Схема экспериментальной установки

После ознакомления с настоящими методическими указаниями следует осмотреть установку и подготовить таблицу наблюдений по прилагаемой ниже форме (таблица 1).

В начале опыта сосуд 1 через запорный вентиль 3 соедините с атмосферой. При этом давление воздуха внутри сосуда будет равно атмосферному p_0 . Температура воздуха будет равна по показаниям потенциометра комнатной температуре t_0 . Внесите значения p_0 и t_0 в таблицу 1. Закройте вентиль 3 и включите электронагреватель 2.

Таблица 1 – Результаты наблюдений и расчетов

№	Атм. давл., p_0		Изб. давл., $p_{\text{изб}}$		Абс. давл., $p_{\text{абс}}$	Температура	
	мм рт. ст.	Па	кг/см ²	Па	Па	$t, ^\circ\text{C}$	T, K
1							
...							

Внимательно следите за повышением давления воздуха в сосуде и через каждое полное деление шкалы манометра записывайте значения избыточного давления $p_{\text{изб}}$ и температуры t . Отсчет показаний произведите одновременно.

Опыт заканчивается при повышении температуры до 150-200 °С. Обработка результатов измерений производится в следующем порядке:

1. Внесите в таблицу значения избыточного давления воздуха в сосуде $p_{\text{изб}}$, кг/см².

2. Определите значения абсолютного давления $p_{\text{абс}}$ по уравнению:

$$p_{\text{абс}} = p_0 + p_{\text{изб}}.$$

3. Внесите в таблицу значения температуры $t, ^\circ\text{C}$.

4. Определите значения абсолютной температуры T, K , по уравнению:

$$T = t + 273,15.$$

5. По данным таблицы 1 в координатной системе $p_{\text{абс}}-T$ нанесите опытные точки и по ним постройте линию экспериментальной зависимости.

6. На том же графике из точки с начальными параметрами p_0 и T_0 (до включения нагревателя) проведите линию теоретической зависимости $T = f(p)$ согласно уравнению (4.1). По расхождению между линиями теоретической и экспериментальной зависимости можно судить о погрешности опыта.

Литература, рекомендуемая для выполнения работы

1. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплоотдача / В.В. Нащокин. – М.: Высшая школа, 1980.

2. Алексеев, Г.Н. Общая теплотехника / Г.Н. Алексеев. – М.: Высшая школа, 1980.
3. Зубарев, В.И. Практикум по технической термодинамике / В.И. Зубарев, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1971.
4. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов и др. – Л.: Машиностроение, 1986.

5 Лабораторная работа № 5 «Определение показателя адиабаты для воздуха»

Цель работы: Знакомство с одним из методов определения показателя адиабаты k .

Адиабатным называется такой термодинамический процесс, который осуществляется без теплообмена с окружающей средой, т.е. $\delta q = 0, q = 0$.

В реальных условиях процесс приближается к адиабатному в тех случаях, когда система снабжена хорошей теплоизоляцией, или когда процесс расширения (сжатия) газа происходит настолько быстро, что не успевает произойти сколь угодно заметный теплообмен газа с окружающей средой.

Кривая процесса – адиабата – в p - v -координатах – гипербола, в p - T -координатах – вертикальная линия для обратимых процессов и кривые 4-2, 2-3 для необратимых (рисунки 1 и 2).

Уравнение адиабаты получается из первого закона термодинамики при $\delta q = 0$: $c_p dT = v dp$; $c_v dT = -p dv$.

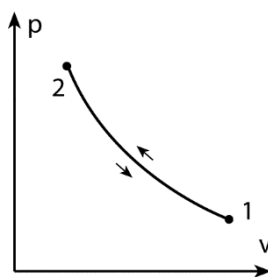


Рисунок 5.1 – Адиабата на p - v -диаграмме

После интегрирования и потенцирования этих уравнений получается уравнение адиабаты: $p v^k = \text{const}$, где $k = c_p/c_v$ – показатель адиабаты.

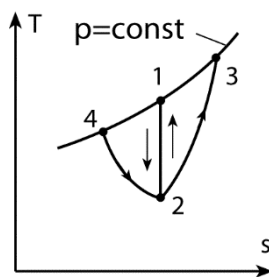


Рисунок 5.2 – Адиабаты на Ts диаграмме

Для обратимого процесса аналитическое выражение второго закона термодинамики имеет вид: $\delta q = Tds$, где T – абсолютная температура, К; ds – изменение энтропии, Дж/кг К.

Получаем, что в обратимом адиабатном процессе $ds = 0$.

Т.е. энтропия системы сохраняется постоянной $s = \text{const}$. Иными словами, обратимый адиабатный процесс является в то же время изоэнтропным процессом.

В том случае, когда k изменяется с изменением состояния системы, можно воспользоваться средним значением показателя адиабаты $k_{\text{ср}}$, т.е. $pv^{k_{\text{ср}}} = \text{const}$.

Следует отметить, что эти уравнения справедливы и для газа, и для жидкости, и для твердого тела.

Величина показателя адиабаты k зависит от температуры и от фазового состояния вещества, причем значения k для газов и паров значительно меньше, чем для жидкостей и твердых тел. Теплоемкость идеального газа слабо изменяется с изменением температуры, поэтому величину k для идеального газа можно с высокой степенью точности считать постоянной. Для одноатомных газов $k = 1,67$; двухатомных – 1,40; трех- и многоатомных – 1,29. Для воздуха, являющегося смесью газов, показатель адиабаты k равен примерно 1,35.

При адиабатном процессе начальные и конечные параметры рабочего тела связаны соотношением:

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k.$$

После логарифмирования:

$$k = \lg\left(\frac{p_1}{p_2}\right) / \lg\left(\frac{v_2}{v_1}\right). \quad (5.1)$$

Методика проведения эксперимента на основании этого уравнения достаточно сложна, так как трудно измерить непосредственно объем в конце адиабатного процесса. Поэтому уравнение лучше представить так, чтобы измеряемыми величинами являлись только давления.

Рассмотрим комбинацию адиабатного расширения газа 1-2 с последующим изохорным процессом 2-3 (рисунок 5.3).

Если точки 3 и 1 лежат на одной изотерме ($T_1 = T_3$), то при $v_3 = v_2$ получается: $\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = \left(\frac{p_1}{p_3}\right)$.

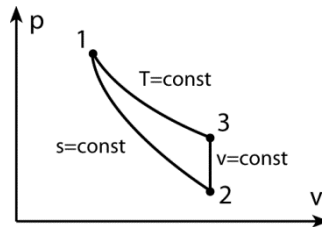


Рисунок 5.3 – p v -диаграмма эксперимента

Подставив найденное отношение объемов в (5.1), получим:

$$k = \lg\left(\frac{p_1}{p_2}\right) / \lg\left(\frac{p_1}{p_3}\right). \quad (5.2)$$

Описанный метод был усовершенствован Рентгеном, который получил обширный экспериментальный материал для большинства газов при комнатной температуре.

Установка (рисунок 5.4) состоит из сосуда 1 с клапаном 2. Заполнение сосуда воздухом производят с помощью ручного насоса 5. Избыточное давление в сосуде измеряют пружинным манометром 3. Трехходовый кран 4 позволяет соединить сосуд попеременно или с насосом, или с атмосферой, или совершенно отсоединить сосуд от источника сжатого воздуха и атмосферы. Атмосферное давление во время опыта измеряется барометром.

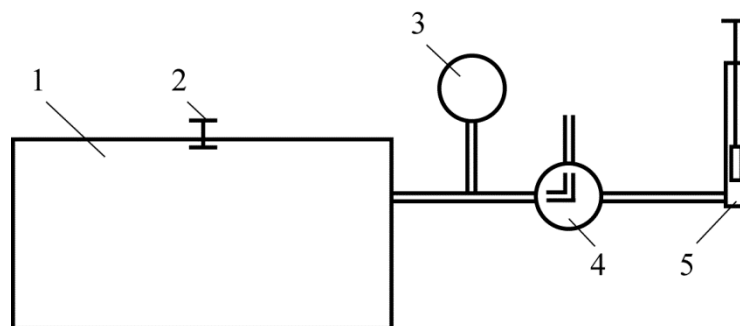


Рисунок 5.4 – Схема экспериментальной установки

Заполните с помощью насоса сосуд сжатым воздухом, отключите краном сосуд от насоса и ждите, когда воздух примет температуру окружающей среды. Равенство температур воздуха в сосуде и окружающей среды соответствует установившемуся значению давления по манометру (состояние 1 на рисунке 5.3). Соединив сосуд с атмосферой быстрым нажатием на клапан, осуществите адиабатное расширение, соответствующее состояние газа в сосуде изобразится точкой 2 на диаграмме.

Так как температура воздуха в сосуде в процессе адиабатного расширения падает, то в момент закрытия клапана она будет ниже температуры окружающего воздуха. Воздух в закрытом сосуде будет нагреваться при постоянном объеме (процесс 2-3 на рисунке 5.3) за счет теплообмена с окружающей средой.

Процесс прекращается, когда температуры в помещении и сосуде станут равными, что соответствует установившемуся значению давления по манометру (на рисунке 5.3 точки 3 и 1 лежат на одной изотерме).

Опыт проводится 3 раза. Данные измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты наблюдений и расчетов

№	Атм. давл., p_0		Изб. давл., $p_{изб}$		Абс. давл., $p_{абс}$		Пок. ад.	
	мм рт. ст.	бар	$p_{изб1}$, бар	$p_{изб2}$, бар	$p_{абс1}$, бар	$p_{абс2}$, бар	k	$k_{ср}$
1								
2								
3								

Для более точного расчета значения k рекомендуется выражение (5.2) записать следующим образом:

$$k = (lgp_1 - lgp_2)/(lgp_1 - lgp_3). \quad (5.3)$$

Расчет абсолютного давления $p_{абс}$ проводится по формуле:

$$p_{абс} = p_0 + p_{изб}.$$

По вычисленным по формуле (5.3) значениям k найдите среднюю величину показателя адиабаты и сравните его с табличным: $k_{ср} = (k_1 + k_2 + k_3)/3$.

Рассмотренный способ определения величины k не является достаточно точным, так как действительный процесс расширения идет не по адиабате, а по политропе с показателем $n < k$.

Кроме того, из-за колебаний стрелки манометра трудно определить момент, когда давление расширяющегося газа станет равным атмосферному.

Литература, рекомендуемая для выполнения работы

1. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплоотдача / В.В. Нащокин. – М.: Высшая школа, 1980.
2. Алексеев, Г.Н. Общая теплотехника / Г.Н. Алексеев. – М.: Высшая школа, 1980.
3. Зубарев, В.И. Практикум по технической термодинамике / В.И. Зубарев, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1971.
4. Патричный, В.А. Мировые тенденции развития методов и средств измерений: Аналитический обзор / В.А. Патричный, А.Ш. Сире. – М.: Изд-во стандартов, 1994.

6 Лабораторная работа № 6 «Определение зависимости температуры от давления для насыщенного пара методом кипения»

Цель работы: знакомство с одним из методов определения зависимости температуры от давления для насыщенного пара.

Насыщенным называют пар, находящийся в равновесии с жидкостью при определенной температуре (термическое равновесие). При этом количество вылетающих из жидкости в пар молекул равно количеству возвращающихся обратно. Насыщенный пар имеет при данной температуре максимальную плотность. Насыщенный пар сухой, если в нем отсутствуют мельчайшие частицы жидкой фазы, его состояние определяется только одним параметром – p , v или T . В противном случае пар влажный насыщенный.

Степень сухости x , или паросодержание, или массовая доля сухого пара во влажном паре – это отношение массы сухого насыщенного пара во влажном паре к массе влажного пара. Величина $(1-x)$ – степень влажности пара. Состояние влажного пара определяется двумя параметрами: x и p или T .

Перегретый пар – нагретый без жидкости сухой насыщенный пар, по своим свойствам близкий к идеальному газу. Его состояние соответственно определяется тремя основными параметрами p , v и T .

Процессы парообразования и другие фазовые превращения удобно рассматривать с помощью фазовых диаграмм. На рисунке 6.1, а-г приведены соответственно pT , pv , Ts и is - диаграммы для воды.

Экспериментальное исследование свойств водяного пара имеет большое значение для составления таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара, широко применяемых при расчете различных тепловых аппаратов. Исследованию зависимости температуры от давления для насыщенного пара посвящено много работ. Это объясняется важностью этой зависимости при технических расчетах: численные значения температур насыщения непосредственно входят в таблицы водяно-

го пара, и, кроме того, могут служить для расчета энтальпии насыщенного пара и других параметров.

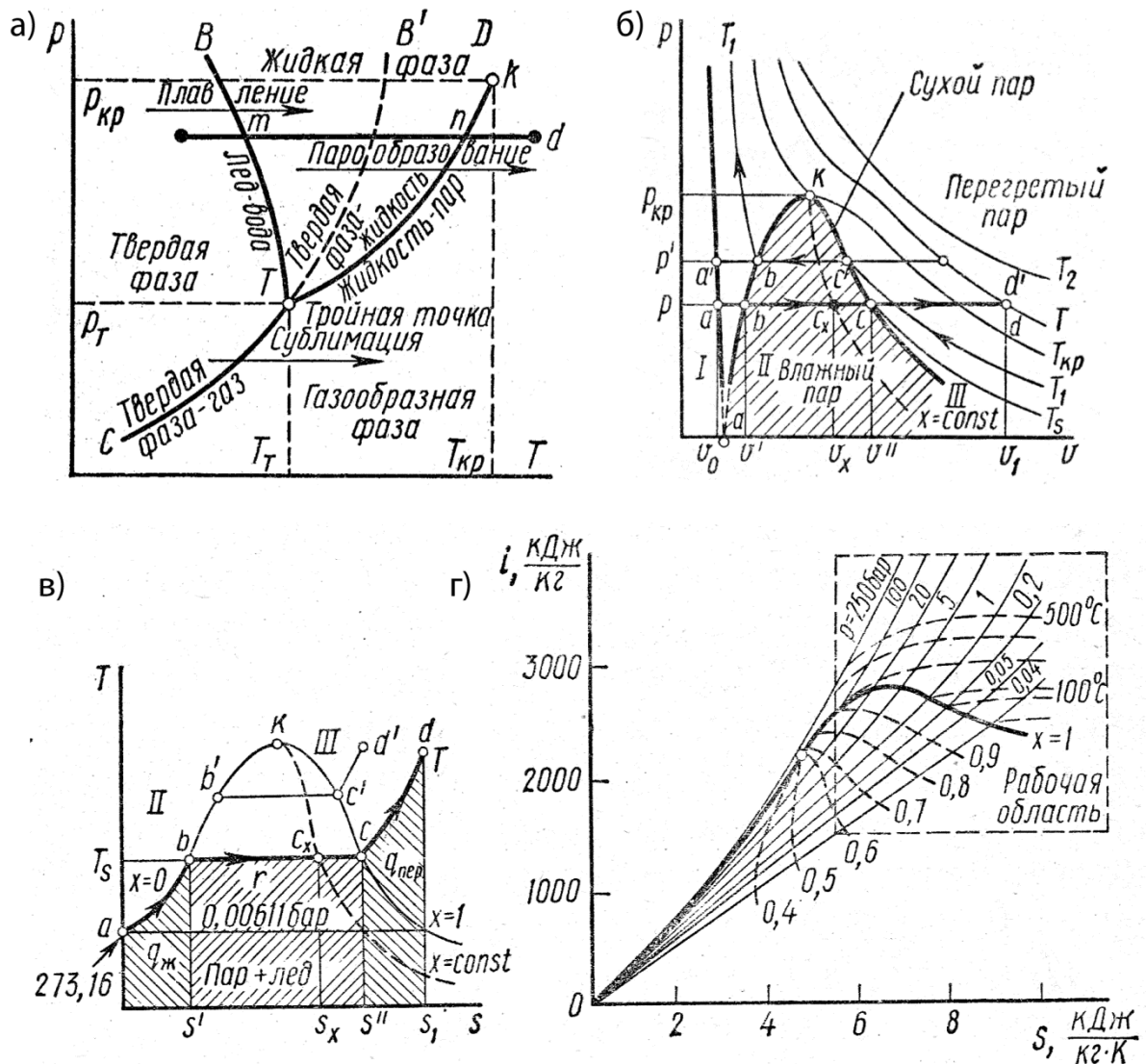


Рисунок 6.1 – Фазовые диаграммы воды

Экспериментальная установка позволяет установить зависимость температуры кипения воды от давления насыщенного пара до давления 3 кг/см^2 с точностью 3%. Опытным путем установлено, что каждому давлению соответствует определенная температура кипения жидкости, являющаяся температурой насыщения. С повышением давления возрастает температура кипения.

В общем виде связь между температурой насыщения t_n и давлением p_n выражается уравнением: $t_n = f(p_n)$, которое действительно только для области насыщения.

Установка для изохорного процесса изменения состояния воды и водяного пара состоит (рисунок 6.2) из толстостенного стального сосуда 1, внутри сосуда имеется электронагреватель 6. В крышку сосуда вварена гильза 2, в которую вставлена термopара. В крышке сосуда имеется предохранительный клапан 7. Давление в сосуде измеряется манометром 8. Температура измеряется автоматическим потенциометром 9. Уровень воды в сосуде фиксируется водомерной стеклянной трубкой 4. Для заполнения и слива воды на стенке сосуда имеются краны 3 и 5. Измерение температуры и давления в сосуде проводится при равновесном состоянии.

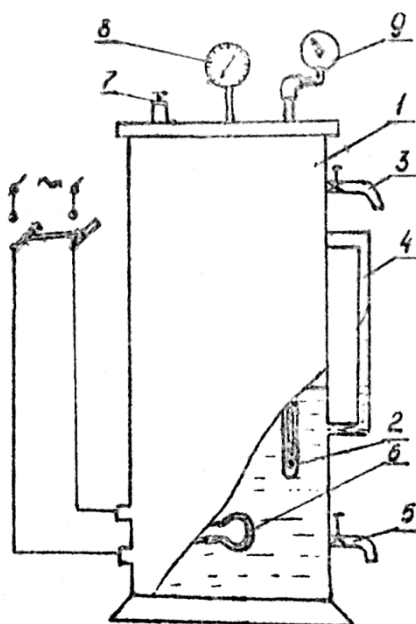


Рисунок 6.2 – Схема экспериментальной установки

Проведение опыта состоит в измерении давления и температуры в сосуде. Перед опытом необходимо проверить, заполнен ли сосуд водой.

1. Откройте кран 3.
2. Включите электронагреватель в сеть.

3. После того, как вода в сосуде закипит, что можно обнаружить по интенсивному выходу пара через открытый кран 3 и показанию потенциометра 9 ($t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), кран 3 следует закрыть и начать наблюдения.

4. Запись давлений проводить через каждые $0,2 - 0,4\text{ кг/см}^2$, одновременно снимая и записывая показания потенциометра.

5. Продолжить запись наблюдений до давления $1,5\text{ кг/см}^2$, после достижения которого отключить электронагреватель.

6. Регистрацию показаний манометра и потенциометра продолжать при охлаждении для тех же давлений, что и при нагревании.

7. Определить атмосферное давление p_o по барометру.

8. После окончания опыта оформить таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты наблюдений и расчетов

№	Давление, кг/см^2			Температура $t_n, ^{\circ}\text{C}$				Отн. ошибка в %
	$p_o = 761$ мм рт. ст.	$p_{\text{изб}}$	$p_{\text{абс}} = p_n$	нагрев	охлаж.	средн.	табл.	
1		0		100	101			
2		0,25		110	111			
3		0,50		120	121			
4		0,75		128	130			
5		1,00		135	136			
6		1,25		141	142			
7		1,50		148	148			

1. В результате обработки должны быть получены численные значения абсолютного давления в сосуде – давления насыщения: $p_n = p_{\text{абс}} = p_o + p_{\text{изб}}$.

2. Определите средние температуры насыщения по данным при нагревании и охлаждении: $t_{n\text{ ср}} = (t_{n\text{ наг}} + t_{n\text{ охл}})/2$.

3. По результатам опытных данных после их обработки постройте зависимость $t_n = f(p_n)$ в координатах p - t .

4. По полученным результатам и табличным данным подсчитайте относительную ошибку в %: $\delta_t = 100(t_{\text{н табл}} - t_{\text{н ср}})/t_{\text{н табл}}$.

Литература, рекомендуемая для выполнения работы

1. Вукалович, М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара / М.П. Вукалович. – М., 1958.
2. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – М: Энергия, 1978.
3. Зубарев, В.И. Практикум по технической термодинамике / В.И. Зубарев, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1971.
4. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов и др. – Л.: Машиностроение, 1986.

7 Лабораторная работа № 7 «Графическое определение параметров влажного воздуха»

Цель работы: Знакомство с одним из методов определения параметров влажного воздуха.

Смесь сухого воздуха и водяного пара называют влажным воздухом. В ряде установок влажный воздух (обычно это атмосферный воздух) используется как рабочее тело. Знание свойств влажного воздуха имеет особенное значение при изучении сушильного дела, вентиляции и других процессов. Во всех этих процессах смесь воздуха и водяного пара можно рассматривать как смесь идеальных газов.

Поскольку влажный воздух рассматривается как смесь идеальных газов, то к нему применим закон Дальтона, согласно которому каждый газ, входящий в смесь, находится под своим парциальным давлением, а сумма парциальных давлений компонентов равна давлению смеси: $p = p_v + p_n$, где p – давление влажного воздуха (атмосферное давление); p_v – парциальное давление сухого воздуха; p_n – парциальное давление водяного пара.

Состояние водяного пара во влажном воздухе определяется температурой влажного воздуха и парциальным давлением водяного пара p_n . Если температура влажного воздуха t_n выше температуры насыщения, соответствующей парциальному давлению водяного пара p_n , то водяной пар в смеси является перегретым.

Если температура влажного воздуха $t_{см}$ равна температуре насыщения t_n , соответствующей парциальному давлению водяного пара, то водяной пар в смеси является сухим или влажным насыщенным. Состояние водяного пара в атмосферном воздухе можно определить по i - s -диаграмме для воды и водяного пара, фрагмент которой приведен на рисунке 7.1. В точке A пар является перегретым, в точке B – сухим насыщенным, в точке C – влажным насыщенным.

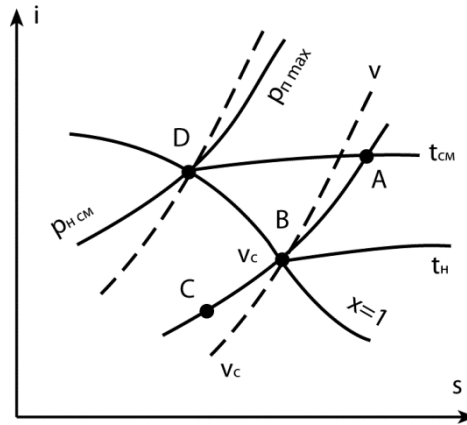


Рисунок 7.1 – i - s -диаграмма для воды и водяного пара

Максимальным значением парциального давления водяного пара $p_{n\ max}$ является давление насыщения $p_{n\ cm}$, соответствующее температуре смеси t_{cm} .

Если в воздухе содержится перегретый пар, то его плотность ρ_n будет меньше плотности сухого насыщенного пара ρ_c , и, соответственно, удельный объем v_n будет больше удельного объема сухого насыщенного пара v_c (рисунок 7.1, точка A).

Плотности связаны с удельными объемами: $\rho_c = \frac{1}{v_c}$; $\rho_n = \frac{1}{v_n}$.

Если во влажном воздухе находится сухой пар (рисунок 7.1, точка B), то его плотность будет равна плотности сухого насыщенного пара: $\rho_B = \rho_c$.

Если во влажном воздухе содержится влажный насыщенный пар (рисунок 7.1, точка C), то его плотность будет больше плотности сухого насыщенного пара: $\rho_B > \rho_c$.

При охлаждении смеси, содержащей сухой насыщенный пар, ниже температуры насыщения t_n , соответствующей парциальному давлению водяного пара p_n , пар конденсируется (выпадает роса). Температура t_p в данном случае называется температурой точки росы.

Абсолютной влажностью воздуха называется масса пара, содержащегося в 1 м³ влажного воздуха. Она представляет собой плотность пара в кг/м³ при парциальном давлении и температуре влажного воздуха.

Относительной влажностью воздуха называется отношение абсолютной влажности воздуха к максимально возможной абсолютной влажности при тех же давлении и температуре: $\varphi = \rho_n / \rho_{n \max}$, где ρ_n – плотность водяного пара при его парциальном давлении и температуре влажного воздуха; $\rho_{n \max}$ – плотность при максимально возможном содержании водяного пара в 1 м³ влажного воздуха при той же температуре и давлении.

Значение $\rho_n = \rho_n$ при $t_{\text{см}}$ можно определить по *is*-диаграмме для воды и водяного пара (рисунок 7.1, точка *D*).

Поскольку принято, что водяной пар в воздухе является идеальным газом, относительную влажность можно определить через парциальные давления пара: $\varphi = p_n / p_{n \max}$, где p_n – давление насыщения, соответствующее температуре смеси.

При $\varphi = 100\%$, когда $p_n = p_n$, воздух становится насыщенным. При дальнейшем понижении температуры из воздуха выпадает роса.

Влагосодержанием d воздуха называется отношение массы (в кг) влаги или пара во влажном воздухе к массе (в кг) сухого воздуха, содержащегося во влажном воздухе: $d = m_n / m_c$.

Влагосодержание связано с парциальным давлением водяного пара уравнением: $d = 0,622 p_n / (p - p_n)$.

Зная абсолютную влажность ρ_n и влагосодержание d можно определить плотность влажного воздуха ρ , кг/м³, по формуле: $\rho = \rho_n (d + 1000) d$.

Энтальпия i влажного воздуха складывается из энтальпии сухого воздуха i_v и энтальпии водяного пара i_n : $i = i_v + d i_n$.

Расчеты, связанные с влажным воздухом, значительно упрощаются и становятся нагляднее, если используются графические методы с применением *id*-диаграммы. *id*-диаграмма (рисунок 7.2) построена на основании уравнений для давления влажного воздуха $p = 745$ мм рт. ст. По оси ординат диаграммы отложены значения энтальпии влажного воздуха i в кДж/кг сух. возд. По оси абсцисс, которая для лучшего использования площади диаграммы проводится под углом 135° к оси

На диаграмму нанесены линии постоянных относительных влажностей $\varphi = const$, температур $t = const$ и энтальпий влажного воздуха $i = const$. В нижней части диаграммы нанесена линия, выражающая зависимость парциального давления водяного пара от влагосодержания $p_{\text{п}} = f(d)$. На диаграмму нанесены также изотермы «мокрого» $t_{\text{м}}$ и «сухого» $t_{\text{с}}$ термометров. Изотермы «сухого» и «мокрого» термометров, соответствующие одному и тому же значению температуры, пересе-

каются на линии насыщенного воздуха, т.е. на линии $\varphi = 100\%$. Эта линия является пограничной кривой. Область над кривой $\varphi = 100\%$ является областью ненасыщенного воздуха. В этой области в воздухе находится перегретый пар. Под кривой $\varphi = 100\%$ расположена область тумана, т.е. область таких состояний, когда в воздухе присутствуют и пар, и мельчайшие капельки жидкости (влажный пар).

Наиболее часто состояние влажного воздуха задается двумя параметрами – его температурой и относительной влажностью.

Измерение температуры воздуха не представляет трудности и осуществляется чаще всего с помощью ртутного термометра. Для определения относительной влажности применяют специальные приборы – психрометры и гигрометры. Чаще всего на практике пользуются психрометром, имеющим два ртутных термометра – «сухой» и «мокрый», чувствительная часть которого обернута батистом, смачиваемым водой.

При этом «сухой» термометр показывает действительную температуру воздуха, а «мокрый» – с некоторой степенью приближения – теоретическую температуру мокрого термометра. При обтекании воздухом шарика «мокрого» термометра последний с большим или меньшим приближением покажет температуру «мокрого» термометра. Степень приближения температуры, которую показывает «мокрый» термометр, будет тем ближе к теоретической, чем меньше оказывается приток тепла к термометру посредством излучения и теплопроводностью через выступающий столбик. При измерении относительной влажности воздуха на четыре минуты отсчета батист на шарике «мокрого» термометра смачивается при помощи специальной резиновой груши. Затем включается вентилятор, создающий постоянный поток воздуха.

Когда начинает работать вентилятор, температура «мокрого» термометра вследствие испарения воды начинает понижаться. Отсчет показаний по «сухому» и «мокрому» термометру производят в момент, когда температура «мокрого» термометра достигает минимума.

По показаниям психрометра относительная влажность воздуха может быть определена с помощью специальных психрометрических таблиц. Однако проще определить относительную влажность и другие параметры (влажность, парциальное давление) при помощи ψ -диаграммы. Для этого необходимо найти точку пересечения изотерм, соответствующих температуре «мокрого» термометра t_m и «сухого» термометра t_c . Эта точка и определит состояние влажного воздуха.

Чтобы определить температуру точки росы, необходимо из найденной точки провести вниз линию до пересечения с кривой $\varphi = 100\%$. Изотерма «сухого» термометра, проходящая через эту точку, покажет температуру точки росы. Чтобы определить парциальное давление пара, нужно спроектировать точку, характеризующую состояние влажного воздуха, по вертикали на линию парциального давления и затем по горизонтали на ось p_n , находящуюся с правой стороны.

По показаниям психрометра определить с помощью ψ -диаграммы для влажного воздуха и ψ -диаграммы для водяного пара следующие параметры:

1. Относительную влажность – φ .
2. Влажность – d .
3. Температуру точки росы – t_p .
4. Парциальное давление водяного пара – p_n .
5. Энтальпию влажного воздуха – i .
6. Абсолютную влажность воздуха – ρ .

Литература, рекомендуемая для выполнения работы

1. Вукалович, М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара / М.П. Вукалович. – М., 1958.
2. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – М: Энергия, 1978.

3. Зубарев, В.И. Практикум по технической термодинамике / В.И. Зубарев, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1971.
4. Крамарухин, Ю.Е. Приборы для измерения температуры / Ю.Е. Крамарухин. – М.: Машиностроение, 1990.
5. Патричный, В.А. Мировые тенденции развития методов и средств измерений: Аналитический обзор / В.А. Патричный, А.Ш. Сире. – М.: Изд-во стандартов, 1994.

8 Лабораторная работа № 8 «Определение коэффициента теплопроводности методом трубы»

Цель работы: углубление знаний по теории теплопроводности, изучение методики экспериментального определения коэффициента теплопроводности изоляционных материалов и получение навыков в проведении экспериментальных работ.

Интенсивность переноса тепла в твердом теле определяется температурным градиентом и значением коэффициента теплопроводности. Последний является физическим параметром; он характеризует собой способность материала проводить тепло. Для различных материалов коэффициент теплопроводности различен и для каждого из них зависит от структуры, объемного веса, влажности и температуры.

Лучшими проводниками теплоты являются металлы, у которых λ изменяется от 3 до 458 Вт/м К. Коэффициенты теплопроводности чистых металлов, за исключением алюминия, с возрастанием температуры убывают. Теплоту в металлах переносят главным образом свободные электроны. Самым теплопроводным металлом является чистое серебро ($\lambda = 458$ Вт/м К).

Коэффициенты теплопроводности теплоизоляционных и строительных материалов, имеющих пористую структуру, при повышении температуры возрастают по линейному закону и изменяются в пределах от 0,02 до 3,0 Вт/м К. Значительное влияние на коэффициенты теплопроводности пористых материалов оказывают газы, заполняющие поры и обладающие весьма малыми коэффициентами теплопроводности по сравнению с λ твердых компонентов. Увеличение λ пористых материалов при повышении температуры объясняется значительным возрастанием лучистого теплообмена между поверхностями твердого «скелета» пор через разделяющие их воздушные ячейки. Поэтому эффективный коэффициент теплопроводности пористых тел имеет сложную природу и является условной величиной. Эта условная величина имеет смысл коэффициента теплопроводности некоторого однородного тела, через которое при одинаковой форме, размерах и температуре на границах проходит то же количество теплоты, что и через данное пористое тело.

Большое влияние на λ оказывает влажность вещества. Опыты показывают, что с увеличением влажности материала коэффициент теплопроводности значительно возрастает. Кроме того, чем выше объемная плотность материала, тем меньше он имеет пор и тем выше его коэффициент теплопроводности.

Одним из методов определения коэффициента теплопроводности является так называемый метод цилиндра (плиты или шара).

Если исследуемому материалу придается форма цилиндрического слоя, то его помещают на поверхность круглой трубы, которая изнутри равномерно обогревается. При установившемся тепловом состоянии системы все количество тепла, которое выделяется внутри трубы, проходит через цилиндрический слой материала и определяется следующим уравнением теплопроводности для одномерного теплового потока:

$$Q = \frac{2\pi l \lambda (t_1 - t_2)}{\ln d_2 / d_1}, \quad (8.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности исследуемого материала, Вт/м К; l – длина трубы, м; d_1 и d_2 – внутренний и наружный диаметры цилиндрического слоя материала, м; t_1 и t_2 – средние температуры внутренней и внешней поверхности цилиндрического слоя материала, град.

Если измерить l , d_1 , d_2 , t_1 , t_2 и Q , то из уравнения (8.1) можно определить значение коэффициента теплопроводности.

В общем случае трубопровод может быть покрыт не одним, а несколькими слоями изоляции с различными значениями коэффициента теплопроводности. Тогда уравнение (8.1) будет определять значение так называемого эквивалентного коэффициента теплопроводности, характеризующего свойства сложной цилиндрической стенки.

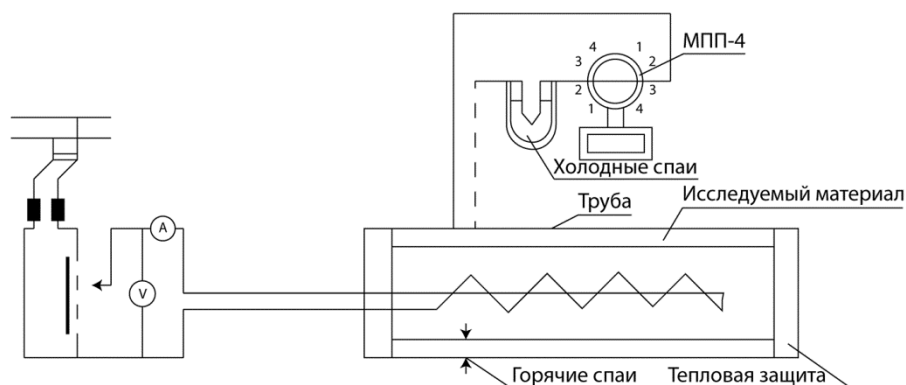


Рисунок 8.1 – Схема опытной установки

Внутри трубы заложен трубчатый электрический нагреватель (ТЭН), создающий равномерный обогрев. Сила тока регулируется лабораторным автотрансформатором, а расходуемая мощность определяется ваттметром или показаниями амперметра и вольтметра.

Температуры исследуемого материала измеряются термометрами, выполненными из хромеля и копеля, горячие спаи которых заложены на внутренней и наружной поверхности трубы.

Электродвижущая сила термопар измеряется с помощью термоэлектрического термометра. Термопары подключаются к термоэлектрическому термометру посредством многопостового переключателя (МПП-4).

Исходное расчетное уравнение (8.1) справедливо для одномерного теплового потока. Выполнение этого условия обеспечивается в опытной установке выбором длины трубы, значительно большей, чем ее внешний диаметр. Кроме того, торцы трубы защищены тепловой изоляцией, электрический нагреватель равномерно распределяет тепло по длине трубы, а измерительные термопары установлены ближе к средней части трубы.

Установленный в опытной трубе электрический нагреватель рассчитан на мощность, которая позволяет получить температуру стенки трубы до 300 °С.

После изучения описания и ознакомления с опытной установкой необходимо заготовить форму протокола для записи наблюдений, проверить правильность включения измерительных приборов и наличие льда в сосуде с холодными спаями термопар.

После проверки схемы преподавателем, можно приступить к проведению опыта. Включается ток и через каждые 10-15 минут производится запись всех показаний измерительных приборов до наступления установившегося теплового состояния системы. Опыт считается законченным после того, как показания приборов на протяжении нескольких замеров остаются неизменными.

Следующий опыт проводится при другом температурном режиме: для этого нужно изменить силу тока, питающего нагреватель, и дождаться наступления установившегося теплового режима.

Для обработки можно использовать лишь данные, полученные при установившемся тепловом состоянии системы. Берутся средние значения показаний приборов из последних нескольких записей. Данные заносятся в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Результаты наблюдений и расчетов

$$l = 0,56 \text{ м}; d_1 = 0,105 \text{ м}; d_2 = 0,125 \text{ м}$$

№	$I, \text{ A}$	$E, \text{ В}$	$Q, \text{ Вт}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{ Вт/м К}$
1	2	80	160	33	21	27	
1	2	80	160	75	29	52	
1	2	80	160	109	47	78	
1	2	80	160	133	56	95	
1	2	80	160	147	80	114	
1	2	80	160	159	94	127	
1	2	80	160	167	102	135	
1	2	80	160	174	110	142	

Коэффициент теплопроводности исследуемого материала вычисляется из уравнения (8.1):

$$\lambda = \frac{Q \ln d_2/d_1}{2\pi l(t_1 - t_2)} = \frac{IE \ln d_2/d_1}{2\pi l(t_1 - t_2)}. \quad (8.2)$$

Количество тепла Q определяется по мощности, потребляемой электрическим нагревателем. Полученное значение коэффициента теплопроводности следует относить к средней температуре исследуемого материала:

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (8.3)$$

где t_1 и t_2 – берутся как средние арифметические значения из показаний нескольких соответствующих термопар.

Если имеется несколько замеров λ при разных температурах, то можно построить график зависимости коэффициента теплопроводности от средней температуры исследуемого материала: $\lambda = f(\bar{t})$.

Для большинства материалов эта зависимость имеет линейный характер.

Литература, рекомендуемая для выполнения работы

1. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1973.
2. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплоотдача / В.В. Нащокин. – М.: Высшая школа, 1980.

9 Лабораторная работа № 9 «Определение коэффициента теплоотдачи для тел цилиндрической формы методом регулярного теплового режима в условиях свободной конвекции»

Цель работы: углубление знаний по теории теплообмена, изучение методики экспериментального определения коэффициента теплоотдачи и получение навыков в проведении экспериментальных работ.

Коэффициент теплообмена различных тел при вынужденном движении жидкости или в условиях естественной конвекции может определяться двумя методами: методом стационарного теплового потока и методом регулярного теплового режима.

В условиях установившегося теплового потока коэффициент теплоотдачи α определяется из уравнения Ньютона-Рихмана:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{Q}{F(\bar{t}_c - \bar{t}_ж)}, \quad (9.1)$$

где Q – тепловой поток, Вт; F – поверхность теплообмена, м²; $\bar{t}_c$ – средняя температура поверхности, °С; $\bar{t}_ж$ – средняя температура жидкости, °С.

Определение коэффициента теплообмена методом стационарного теплового потока связано со значительной затратой времени для достижения стационарного режима и материальными затратами на создание экспериментальной установки.

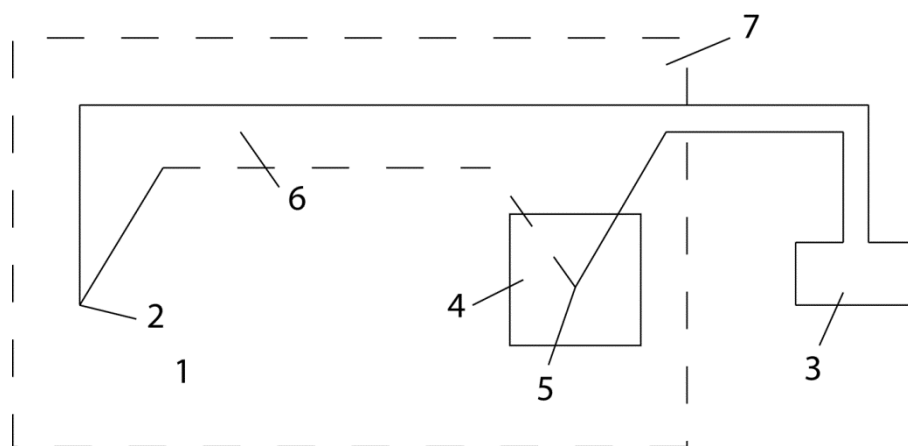
Метод регулярного теплового режима, предложенный Г.М. Кондратьевым, дает возможность быстрее и достаточно точно определить коэффициент теплообмена экспериментальным путем. Между коэффициентом теплообмена и теплом охлаждения существует зависимость в виде уравнения:

$$\alpha = \frac{mC_p pV}{F}, \quad (9.2)$$

где C_p – теплоемкость тела, Дж/кг.град; ρ – удельный вес тела, кг/м³; V – объем тела, м³; F – площадь поверхности тела, площадь теплообмена, м²; m – темп охлаждения, 1/с;

Из уравнения (9.2) следует, что определение коэффициента теплообмена сводится к нахождению темпа охлаждения.

Методика определения заключается в следующем. Внутри тела, коэффициент теплоотдачи которого нужно определить, закладывают термодатчик, один спай термодатчика выводится наружу, другой укрепляется в какой-либо точке (рисунок 9.1).



1 – образец, 2 – «горячий» спай термодатчика, 3 – «холодный» спай термодатчика, 4 – сосуд Дьюара, 5 – потенциометр или гальванометр, 6 – термодатчик, 7 – камера спокойного воздуха

Рисунок 9.1 – Принципиальная схема опытной установки

«Холодные» спаи термодатчика 3 погружаются в сосуд Дьюара 4 и подключаются к гальванометру 5. Образец 1 нагревают до определенной температуры и затем помещают в среду, температура которой ниже температуры образца. Наблюдая изменение температуры образца, определяют темп охлаждения. Для этого необходимо замерить температуру образца для двух моментов времени τ_1 и τ_2 . Тогда темп охлаждения:

$$m = \frac{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (9.3)$$

где θ_1 – разность температур образца и окружающей среды для момента времени τ_1 : $\theta_1 = t_{1\text{обр.}} - t_f$; θ_2 – разность температур образца и окружающей среды для момента времени τ_2 : $\theta_2 = t_{2\text{обр.}} - t_f$; t_f – температура окружающей среды, °C.

Имея ряд таких наблюдений, строят по точкам график (рисунок 9.2). Этот график, начиная с момента времени τ_1 , представляет собой прямую линию. При этом наступает регулярный режим охлаждения. Угловой коэффициент прямой линии $\text{tg}\gamma$ и есть темп охлаждения m (рисунок 2). По формуле (9.2) определяют темп охлаждения. Затем, выписав из справочника теплофизические свойства материала образца, из уравнения (9.1) определяют коэффициент теплообмена.

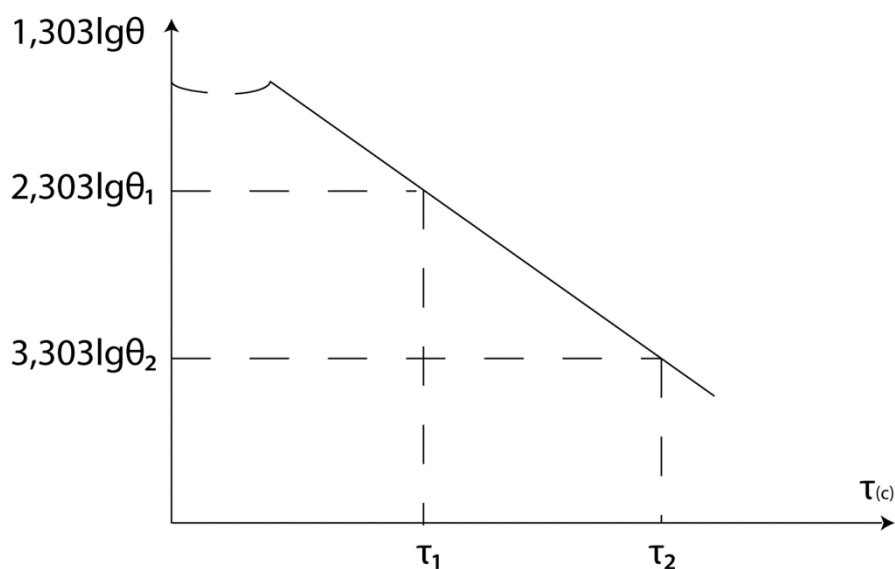


Рисунок 9.2 – График темпа охлаждения

После этого необходимо произвести обработку опытных данных в критериальной зависимости:

$$\text{Nu} = C(\text{GrPr})^n, \quad (9.4)$$

где Nu – критерий Нуссельта; Gr – критерий Грасгофа; Pr – критерий Прандтля; C и n – константы, определяемые для тел различной формы и размеров экспериментальным путем.

Критерий Нуссельта определяется по формуле:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (9.5)$$

где α – коэффициент теплообмена, $Вт/м^2 \text{ К}$; l – характерный размер (для цилиндрических стержней он равен диаметру), м; λ – коэффициент теплопроводности, $Вт/м \text{ К}$.

Коэффициент теплопроводности выбирается по таблице по температуре окружающей среды.

Критерий Грасгофа рассчитывается по формуле:

$$Gr = \frac{\beta g l^3 \Delta t}{\nu^2}, \quad (9.6)$$

где g – ускорение силы тяжести, $м/с^2$; l – характерный размер (для цилиндрических стержней равен диаметру), м; ν – коэффициент кинематической вязкости (выбирается по таблицам по температуре окружающей среды), $м^2/с$; β – коэффициент объемного расширения воздуха; t – температура среды, $^{\circ}C$.

Среднелогарифмический температурный напор определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{\theta_n - \theta_k}{2,3 \lg \frac{\theta_n}{\theta_k}}, \quad (9.7)$$

где $\theta_n = t_n - t_f$ – разность температур образца и воздуха (окружающей среды) в начале опыта, $^{\circ}C$; $\theta_k = t_k - t_f$ – разность температур образца и воздуха в конце опыта, $^{\circ}C$.

Критерий Прандтля Pr выбирается по таблице по температуре окружающей среды. Коэффициент C и показатель степени n определяют после построения графической зависимости.

Порядок проведения опытов и обработка данных.

1. Собрать электрическую схему установки.
2. Нагреть образец в электропечи примерно до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, проверяя температуру по градуировочной кривой.
3. Вынуть образец из печи и установить его на подставку.
4. Измерить одновременно температуру воздуха помещения на расстоянии $1,5\text{ м}$ от образца.
5. Записать показания потенциометра через каждые $0,5$ минуты в течение 2 минут и затем через 2 минуты в течение 10 минут.
6. Данные опытов записать в таблицу 1.

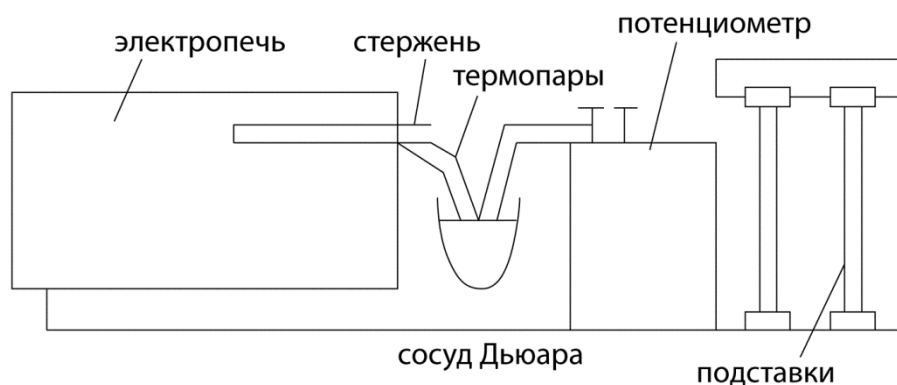


Рисунок 9.3 – Схема установки

7. Построить графическую зависимость (рисунок 9.2) и определить темп охлаждения.
8. Определить величину коэффициента теплоотдачи α .

Таблица 1 – Исходные и расчетные данные

$$t_f = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Время, с	Температура образца	$t_{\text{обр}} - t_f$	$\lg\theta$	$2,303 \lg\theta$
Диаметр 12 мм				
0	144			
30	140			
60	136			
90	131			
120	127			
240	110			
360	96			
480	83			
600	74			
720	66			
Диаметр 12 мм				
0	160			
30	157			
60	154			
90	150			
120	148			
240	136			
360	126			
480	118			
600	110			
720	103			

Для цилиндра диаметром $d = 12$ мм отношение объема к площади $V/F = 0,003$ м, для цилиндра $d = 20$ мм – $V/F = 0,005$ м.

9. Подсчитать по данным двух опытов значение критериев и внести в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчетные данные

№ режима	m	α	Nu	$\lg Nu$	Gr	Pr	$\lg(GrPr)$
1							
2							

10. Построить графическую зависимость $Nu = f(GrPr)$.

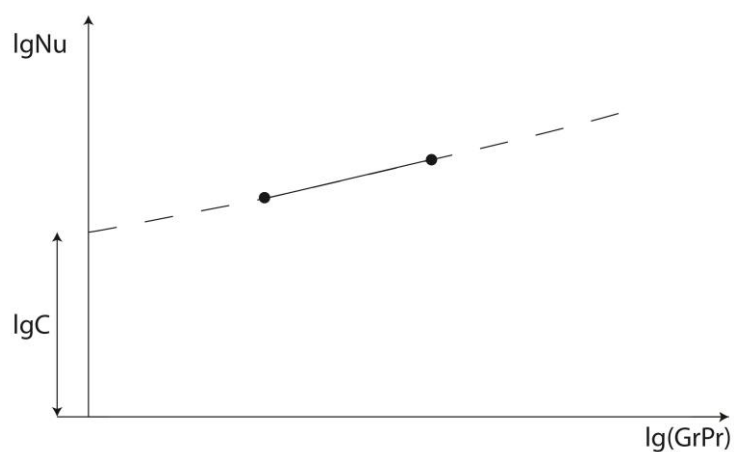


Рисунок 9.4 – График функции

11. По графику (рисунок 4) определить значение коэффициентов C и n в критической зависимости $Nu = f(GrPr)^n$

Коэффициент находится как тангенс угла наклона прямой:

$$n = \operatorname{tg} \gamma = \frac{\lg Nu_2 - \lg Nu_1}{\lg(GrPr)_2 - \lg(GrPr)_1}.$$

Коэффициент C определяется по формуле:

$$C = \frac{Nu}{(GrPr)^n}.$$

12. Сравнить полученное критериальное уравнение с известными литературными данными.

Литература, рекомендуемая для выполнения работы

1. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1973.
2. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплоотдача / В.В. Нащокин. – М.: Высшая школа, 1980.