

Министерство образования Российской Федерации

Владивостокский государственный университет
экономики и сервиса

С.А. ОСТРЕНКО

ТЕПЛОТЕХНИКА

Практикум

Владивосток
Издательство ВГУЭС
2004

ББК 31.3
О 76

Рецензенты: А.И. Ключин, канд техн. наук,
доцент
В.Ф. Юхименко, канд. техн. наук,
доцент

Остренко С.А.
О 76 ТЕПЛОТЕХНИКА: Практикум. – Владивосток:
Изд-во ВГУЭС, 2004. – 84 с.

В практикуме представлены десять лабораторных работ по дисциплине «Теплотехника». Описание каждой лабораторной работы дополнено краткой теорией, методическими указаниями и списком контрольных вопросов. Справочный материал вынесен в приложение. Словарь терминов содержит используемые понятия и их определения. Содержание и объем пособия соответствует государственному стандарту.

Для студентов специальности 230100 – «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования (автомобильный транспорт)».

ББК 31.3

© Издательство Владивостокского
государственного университета
экономики и сервиса, 2004

ВВЕДЕНИЕ

Целью лабораторного практикума является закрепление студентами материала лекционного курса, развитие навыков самостоятельной работы с приборами при проведении теплотехнических экспериментов, обучение методам определения теплофизических свойств рабочего тела и проведению расчетов, а также умению делать выводы на основании полученных результатов.

На выполнение каждой работы отводится 4 часа. Так как лекционный курс не всегда опережает лабораторный практикум и часть материала передана студентам для самостоятельного изучения, то в методических указаниях к каждой работе кратко излагается теоретический материал.

Основные понятия и определения, используемые в процессе выполнения лабораторных работ, сведены в словарь терминов (электронная версия лабораторного практикума позволяет осуществлять доступ к ним с помощью гиперссылок).

При составлении пособия использовались описания лабораторных работ, опубликованные Слесаренко В.В., Ильиным А.К., Чайкой В.Д.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Основные правила работы в лаборатории

На первом занятии каждый студент обязан познакомиться с правилами техники безопасности при работе в лаборатории теплотехники и расписаться в соответствующем журнале.

Находясь в лаборатории, студент обязан строго соблюдать правила техники безопасности. Включение лабораторных стендов разрешается только в присутствии обслуживающего персонала или преподавателя после проверки готовности студента к работе.

При выполнении лабораторных работ следует соблюдать инструкции по эксплуатации измерительных приборов и оборудования.

1.2. Порядок выполнения лабораторных работ

Преподаватель в соответствии с календарным планом прохождения курса составляет график выполнения и защиты лабораторных работ и сообщает его студентам в начале семестра.

Студенту необходимо подготовиться к выполнению лабораторной работы, изучив соответствующий материал лекций, учебников, а также данного методического руководства. При этом студент должен усвоить цель работы, методику выполнения, схему лабораторной установки, а также подготовить журнал наблюдений.

Перед началом работы преподаватель проводит опрос студентов для выяснения уровня их подготовки.

После проведения экспериментов студент подписывает у преподавателя протокол испытаний и расчеты, приводит в порядок свое рабочее место, оформляет и защищает отчет по выполненной работе.

Выполнение и защита работ производится группами, состоящими из 2–3 студентов. *К выполнению следующей лабораторной работы допускаются студенты только после защиты предыдущей работы.*

В конце семестра, при условии защиты всех работ, студент получает зачет по лабораторному практикуму.

1.3. Требования к оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется рукописным или машинописным способами, аккуратно и грамотно.

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- краткое изложение теории и схему экспериментальной установки;

- журнал наблюдений;
- необходимые расчеты, графики;
- выводы, где дается оценка точности и заключение о полученных результатах.

Изложение содержания отчета должно быть логически последовательным и кратким. Сокращение слов в тексте, за исключением общепринятых в русском языке, не допускается.

Результаты экспериментов оформляют в виде таблиц. Над правым верхним углом помещают надпись «Таблица» с указанием ее порядкового номера, ниже – название таблицы.

Значения символов и числовых коэффициентов расшифровывают непосредственно под формулой в той последовательности, в какой они приведены в ней, например:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_1 - t_2),$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности материала образца, Вт/(м·К); δ – толщина образца, м; t_1 и t_2 – значения температур на противоположных поверхностях образца, °С.

2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1. Основные термодинамические процессы

Исследование термодинамических процессов проводят, используя основные положения технической термодинамики, которые включают:

- *первый закон термодинамики* – теплота Q , подведенная к рабочему телу, расходуется на изменение его внутренней энергии ΔU и на совершение работы против внешних сил L (работы изменения объема)

$$Q = \Delta U + L, \text{ Дж};$$

- *уравнение состояния рабочего тела*, которое для идеального газа имеет вид:

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T,$$

где p – абсолютное давление, Па; V – объем, занимаемый рабочим телом, м³; m – масса рабочего тела, кг; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); T – абсолютная температура, К.

В термодинамических процессах, наряду с основными параметрами состояния рабочего тела (p, V, T) используют функции состояния:

- *энтальпию* – сумму внутренней энергии и произведения абсолютного давления на объем

$$H = U + p \cdot V, \text{ Дж}$$

- *энтропию* – функцию состояния, дифференциал которой численно равен отношению количества подведенной теплоты к температуре системы:

$$dS = \frac{dQ}{T}, \text{ Дж/К}.$$

Параметры и функции состояния рабочего тела Q, U, L, V, H, S , отнесенные к его массе m называют удельными, например, удельная теплота q , удельная внутренняя энергия u , удельная работа l , удельный объем v , удельная энтальпия h и удельная энтропия s .

К основным термодинамическим процессам относят: *изотермический, изохорный, изобарный, адиабатный* и *политропный* процессы. Их изображения и характеристики представлены ниже на рис. 2.1 и в табл. 2.1.

Исследование термодинамического процесса предполагает:

- вывод уравнения процесса;
- изображение процесса на диаграммах « $p-v$ » и « $T-s$ »;
- установление зависимостей между основными параметрами рабочего тела в начальной и конечной точках процесса;
- определение изменения внутренней энергии в процессе;

- определение работы изменения объема;
- определение количества теплоты, участвующей в термодинамическом процессе;
- определение изменения энтальпии;
- определение изменения энтропии.

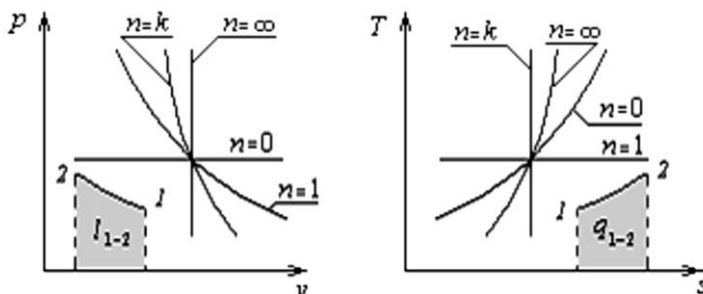


Рис. 2.1. Изображение основных термодинамических процессов

Таблица 2.1

Характеристики основных термодинамических процессов

Название процесса	Уравнение процесса	Значение показателя политропы	Уравнение первого закона термодинамики	Изменение энтропии
Политропный	$p \cdot v^n = const$	n	$\delta q = du + \delta l$	$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$
Изохорный	$v = const$	$n = \pm\infty$	$\delta q = du$	$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$
Изобарный	$p = const$	$n = 0$	$\delta q = dh$	$\Delta s = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$
Изотермический	$T = const$	$n = 1$	$\delta q = \delta l$	$\Delta s = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = R \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$
Адиабатный	$p \cdot v^k = const$	$n = k$	$\delta q = 0$	$\Delta s = 0$

Исследование изохорного процесса

Цель работы: экспериментальное исследование изохорного процесса.

Основы теории

Изохорным называют процесс, в котором объем рабочего тела остается постоянным. Уравнение изохорного процесса имеет вид

$$v = \text{const} . \quad (2.1.1)$$

Из уравнения состояния идеального газа (2) следует, что для рассматриваемого процесса

$$\frac{p}{T} = \frac{R}{v} = \text{const} , \quad (2.1.2)$$

или для процесса, протекающего между точками 1 и 2, находящимися на одной изохоре,

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} . \quad (2.1.3)$$

В уравнениях (2.1.1–2.1.3) p – абсолютное давление газа, Па; v – удельный объем (объем, занимаемый единицей массы вещества), м³/кг; R – газовая постоянная, Дж/(кг К); T – абсолютная температура, К.

Из уравнения (2.1.3) видно, что в изохорном процессе давление идеального газа изменяется прямо пропорционально его температуре.

В соответствии с первым законом термодинамики, вся подводимая к газу удельная теплота (δq) идет на изменение его удельной внутренней энергии (du), так как работа расширения газа (работа изменения объема) равна нулю. При нагревании внутренняя энергия увеличивается, а при охлаждении – уменьшается.

$$\delta q = du = c_v \cdot dT , \quad (2.1.4)$$

где c_v – удельная массовая теплоемкость газа в изохорном процессе, Дж/(кг К).

В изохорном процессе, происходящем между начальной 1 и конечной 2 точками, изменение внутренней энергии газа, масса которого m , определяют по уравнению:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) . \quad (2.1.5)$$

Изменение энтропии массы газа в процессе при постоянном объеме рассчитывают по формуле

$$\Delta S = S_2 - S_1 = m \cdot c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} . \quad (2.1.6)$$

Описание экспериментальной установки

Основным элементом экспериментальной установки, схема которой представлена на рис. 2.1.1, является толстостенный сосуд *1*, в котором находится рабочее тело (воздух).

Измерение избыточного давления и разряжения рабочего тела осуществляют мановакуумметр *2*, который соединен с сосудом через манометрический клапан *3*. Клапан используют для сообщения (разобщения) рассматриваемой термодинамической системы с атмосферой. Для измерения температуры газа, внутри сосуда помещена термопара *4*. Прибором, показывающим значение температуры, является автоматический потенциометр. К нему непосредственно присоединены горячий и холодный спаи термопары.

Сосуд *1* помещен в термостат. Термостат имеет в своем составе нагревательные элементы *7*, которые позволяют с помощью переключателя *B2* изменять режим нагрева, и электродвигатель *б* с мешалкой *8* – для создания равномерного температурного поля в водяной ванне. Включение электродвигателя производят тумблером *B3*. Контактный термометр *5* позволяет задавать температуру в термостате, которая автоматически поддерживается регулятором при включенном тумблере *B1*.

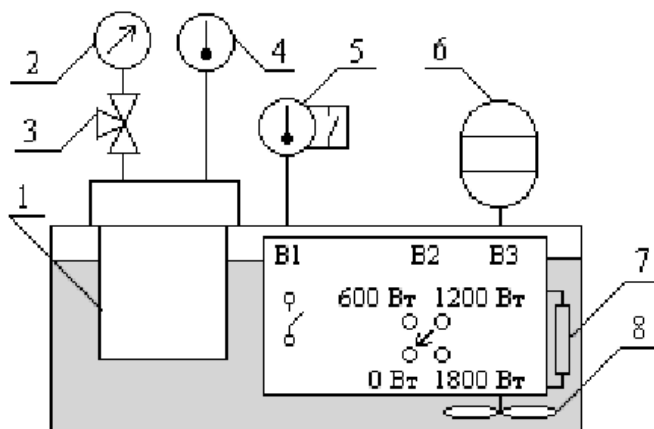


Рис. 2.1.1. Схема экспериментальной установки

Порядок проведения опытов и обработки результатов

Изохорный нагрев воздуха

1. Включить термостат в электрическую сеть. Тумблеры *B1* и *B3* установить в положение «ВКЛ.». Переключатель *B2* перевести в поло-

жение, обеспечивающее максимальную мощность нагревателя. Выполнение указанных действий приводит к разогреву установки.

2. Вращением головки контактного термометра 5 задать температуру нагрева жидкости в термостате 90°C.

3. Открыть клапан 3. Поместить сосуд с газом 1 в термостат.

4. Включить потенциометр.

5. Следить за нагревом воздуха в сосуде. При достижении температуры воздуха значения 40°C, закрыть клапан 3 (этим обеспечивают дальнейшее изохорное протекание процесса).

6. Записать начальные показания приборов: мановакуумметра ($p_u = 0 \text{ кг/см}^2$), потенциометра ($t = 40^\circ\text{C}$) и барометра в табл. 2.1.1.

7. Проводить одновременно измерения давления и температуры с интервалом 0,05 кг/см² до момента прекращения повышения избыточного давления.

Изохорное охлаждение воздуха

1. Выключить нагреватель переключателем В2. Отключить электродвигатель тумблером В3.

2. Открыть вентиль 3, выпустить воздух из сосуда (значение избыточного давления должно равняться нулю). Вынуть сосуд 1 из термостата, соблюдая меры предосторожности, и установить его на подставку.

3. Закрыть вентиль 3 и измерить начальные значения температуры и давления.

4. По мере охлаждения воздуха одновременно проводить измерения температуры и разрежения (p_v) с интервалом 0,05 кг/см².

5. Привести установку в исходное состояние. Потенциометр, нагреватель и электродвигатель отключить от сети. Сосуд поместить на специальную подставку. Вентиль 3 – открыть.

Обработка результатов исследования

1. Определить удельный объем газа в начале процесса

$$v_1 = R \cdot \frac{T_1}{p_1}, \quad (2.1.7)$$

где R – газовая постоянная (для воздуха $R = 287 \text{ Дж/(кг К)}$).

2. Рассчитать значения абсолютных температур и абсолютных давлений во всех точках процесса:

$$\begin{aligned} T_i &= t_i + 273,15; \\ p_i &= p_o + p_{ui} \cdot \\ p_i &= p_o - |p_{vi}| \end{aligned} \quad (2.1.8)$$

Все расчеты выполнять в системе СИ.

3. Вычислить массу воздуха, находящегося в цилиндре во время исследуемого процесса,

$$m = \frac{V_u}{v_1}, \quad (2.1.9)$$

где V_u – объем сосуда, м³.

4. Нанести на диаграмму « $p-v$ », выполненную в масштабе, теоретические линии изохорных процессов нагревания и охлаждения по значениям начальных удельных объемов.

5. Рассчитать и нанести на диаграмму значения удельных объемов для каждой измеренной точки процесса нагревания и охлаждения по формуле (2.1.7), используя в качестве индексов номера соответствующих экспериментальных точек.

6. Проверить соотношение (2.1.3) для нескольких точек процессов нагрева и охлаждения.

7. Вычислить изменения значений внутренних энергий и энтропий по параметрам газа в конце и начале процессов нагрева и охлаждения по формулам (2.1.5 и 2.1.6). Значение удельной теплоемкости воздуха определить по уравнению

$$c_v = \frac{R}{k-1}, \quad (2.1.10)$$

где k – показатель адиабаты (для воздуха $k = 1,4$).

8. Рассчитать относительную ошибку определения удельного объема и объяснить отклонение экспериментальных данных.

Таблица 2.1.1

Протокол наблюдений и результатов расчета

Нагрев					Охлаждение				
№	p_n , кг/см ²	p , Па	t , °С	T , К	№	p_n , кг/см ²	p , Па	t , °С	T , К

Таблица результатов

$p_6,$ Па	Нагрев			Охлаждение		
	$v,$ м ³ /кг	$\Delta S,$ Дж/К	$\Delta U,$ Дж	$v,$ м ³ /кг	$\Delta S,$ Дж/К	$\Delta U,$ Дж

Контрольные вопросы

1. Какой процесс называют изохорным?
2. Как определяют изменения энтропии и внутренней энергии в изохорном процессе?
3. Приведите пример изохорного процесса.
4. Объясните назначение элементов экспериментальной установки.
5. Что называют удельным объемом?
6. Как определяют погрешность измерений?
7. Как изображают изохорный процесс в диаграммах « $p-v$ » и « $T-S$ »?
8. Запишите первый закон термодинамики для изохорного процесса.

Исследование адиабатного процесса

Цель работы: экспериментально определить показатель адиабаты воздуха.

Основы теории

Адиабатным называют термодинамический процесс изменения состояния рабочего тела, протекающий без теплообмена с окружающей средой

$$\delta Q = 0.$$

В этом случае работа расширения совершается за счет изменения внутренней энергии рабочего тела

$$dU = -\delta L.$$

Уравнение адиабатного процесса имеет вид:

$$p \cdot V^k = const, \quad (2.1.11)$$

где k – показатель адиабаты, численно равный отношению теплоемкостей в изобарном и изохорном процессах.

Соотношения между основными параметрами рабочего тела в адиабатном процессе:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}; \quad (2.1.12)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k. \quad (2.1.13)$$

Энергетические характеристики адиабатного процесса определяются следующими уравнениями:

удельная работа расширения

$$l_{1-2} = \frac{R}{k-1} \cdot (T_2 - T_1); \quad (2.1.14)$$

изменение удельной внутренней энергии

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1); \quad (2.1.15)$$

удельная массовая теплоемкость

$$c = \frac{\delta q}{dT} = 0; \quad (2.1.16)$$

изменение удельной энтропии

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \frac{\delta q}{T} = 0 \text{ или } s_1 = s_2. \quad (2.1.17)$$

Показатель адиабаты может быть определен на основании зависимости (2.3), прологарифмировав которую, получим

$$k = \frac{\ln(p_1/p_2)}{\ln(v_2/v_1)}. \quad (2.1.18)$$

Следовательно, для определения показателя адиабаты необходимо знать начальные и конечные значения параметров рабочего тела в адиабатном процессе.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 2.1.2) состоит из сосуда 1, закрытого пробкой, в котором с помощью компрессора 2 создается избыточное давление. Сосуд 2 соединен трубками через клапан 3 с компрессором, а через пробковый кран 4 – с U-образным жидкостным манометром 5, который служит для определения избыточного давления в сосуде. Кнопочный выключатель 6 используют для подключения компрессора к электрической сети.

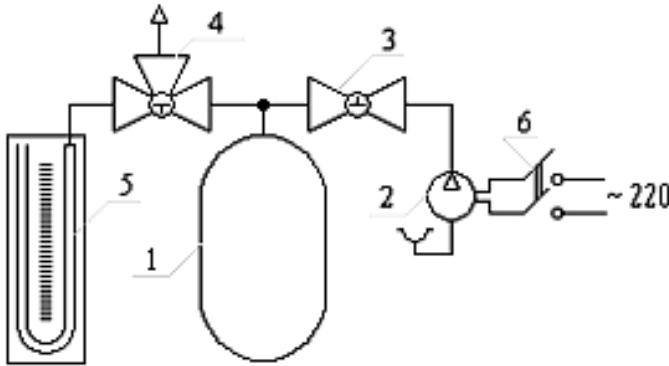


Рис. 2.1.2. Схема экспериментальной установки

Последовательность процессов, изображенных на рис. 2.1.3, следующая: сжатый воздух с давлением p_1 , объемом v_1 и температурой T_1 (точка 1) адиабатно расширяется после открытия крана 4 до атмосферного давления p_2 (точка 2). При этом воздух охлаждается ниже температуры окружающей среды. Через стенки сосуда к нему подводится теплота, происходит изохорный процесс нагрева 2–3 до температуры в помещении (при этом кран 4 закрыт и сосуд разобщен с атмосферой). Возврат рабочего тела в исходное состояние 1 осуществляется в результате нагнетания сжатого воздуха из компрессора в сосуд (линия 3–4) с последующим охлаждением до состояния теплового равновесия с окружающей средой (процесс 4–1). В точках 1 и 3 температуры воздуха одинаковые, т.е. данные точки принадлежат одной и той же изотерме 1–3.

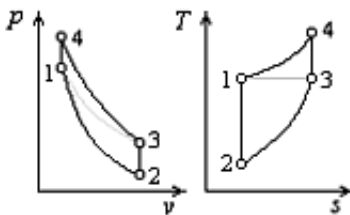


Рис. 2.1.3. Последовательность процессов, совершающихся в ходе эксперимента:
 1–2 – адиабатное расширение;
 2–3 – изохорный подвод теплоты;
 3–4 – нагнетание воздуха в сосуд;
 4–1 – изохорный отвод теплоты

Для вычисления показателя адиабаты воздуха используют зависимость (2.1.18).

Абсолютные давления в характерных точках процесса рассчитывают по формуле

$$P_i = P_0 + P_{ui}$$

где p_0 – атмосферное (барометрическое) давление, Па; p_{ui} – манометрическое (избыточное) давление в сосуде в i -й точке процесса, Па.

Манометрическое давление измеряется жидкостным U-образным манометром и равно

$$p_{ui} = \rho \cdot g \cdot \Delta H_i,$$

где ρ – плотность жидкости, находящейся в манометре, кг/м^3 (для воды $\rho \cong 1000 \text{ кг/м}^3$); g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; ΔH_i – разность уровней в «коленах» манометра, м.

Величину отношения объемов (v_2/v_1) можно представить в виде отношения абсолютных давлений в точках 1, 3 (см. рис. 2.1.3):

для изохорного процесса 2 – 3 справедливо равенство

$$v_2 = v_3;$$

для изотермического процесса 3 – 1 выполняется соотношение

$$\frac{v_3}{v_1} = \frac{p_1}{p_3}.$$

Следовательно,

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_3} = \frac{p_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta H_1}{p_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta H_3}.$$

Сделав подстановку вышеуказанных величин в уравнение (2.1.18), получим

$$k = \frac{\ln \frac{p_1}{p_2}}{\ln \frac{p_1}{p_3}} = \frac{\ln \frac{p_0 + p_{u1}}{p_0 + p_{u2}}}{\ln \frac{p_0 + p_{u1}}{p_0 + p_{u3}}}. \quad (2.1.19)$$

Адиабатное расширение проводят до атмосферного давления, т.е. $P_{u2} = 0$.

Если эксперимент проводить так, чтобы манометрическое давление в сосуде не превышало 200 мм в. ст. (2% атмосферного), то можно использовать вместо (2.1.19) упрощенное уравнение

$$k = \frac{\Delta H_1}{\Delta H_1 - \Delta H_3}, \quad (2.1.20)$$

где ΔH_1 – показание манометра в точке 1, мм в.ст.; ΔH_3 – показание манометра в точке 3, мм в.ст.

Порядок проведения опытов и обработки результатов

1. Открыть клапан 3 (см. рис. 2.1.2).
2. Включить компрессор 2, создать в сосуде 1 избыточное давление 150–200 мм в. ст., после чего выключателем 6 отключить питание.

3. Закрыть клапан 3. Через 1–2 минуты измерить избыточное давление в сосуде ΔH_1 .

4. Открыть пробковый кран 4 и примерно через 1 секунду закрыть его. За это время произойдет процесс, который можно считать адиабатным, истечения воздуха из сосуда.

5. Через 1–2 минуты после сброса воздуха из сосуда измерить избыточное давление ΔH_3 .

6. Повторить 12 раз операции 1–5, занося результаты измерений в табл. 1.1.3.

7. Рассчитать по формуле (2.1.20) значения показателя адиабаты воздуха для каждого опыта.

8. Определить среднее значение показателя адиабаты для серии проведенных опытов

$$\bar{k} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m k_i, \quad (2.1.21)$$

где m – количество опытов.

9. Вычислить отклонение значений показателей адиабаты в каждом опыте от среднего

$$\Delta k_i = \left| k_i - \bar{k} \right|$$

10. Выбрав два наибольших отклонения, исключить неудачные опыты из расчета среднего значения показателя адиабаты и уточнить значение \bar{k} по зависимости (2.1.21), используя оставшиеся данные.

Сравнить известное значение показателя адиабаты k_0 для воздуха (табл. 2.1.4) с полученным вами значением, и вычислить относительную ошибку эксперимента

$$\delta = \pm \left| \frac{k_0 - \bar{k}}{k_0} \right| \cdot 100\%.$$

11. Рассчитать среднеквадратичную ошибку эксперимента

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \Delta k_i^2}{m \cdot (n-1)}} \cdot 100\%.$$

Результаты замеров и расчетов занести в табл. 2.1.3.

Таблица 2.1.3

Таблица наблюдений и результатов обработки

№ опыта (i)	Показания манометра		Показатель адиабаты, k_i	Отклонение $ \bar{k} - k_i $
	ΔH_1 , мм в.ст.	ΔH_3 , мм в.ст.		
1				
...				
12				
Среднее значение показателя адиабаты \bar{k}				
Относительная ошибка эксперимента, δ				
Среднеквадратичная ошибка эксперимента σ				

Таблица 2.1.4

Таблица значений показателя адиабаты
для реальных газов и паров

Рабочее тело	Значение показателя адиабаты
Идеальные газы:	
одноатомные	5/3
двухатомные	7/5
трех- и многоатомные	9/7
Воздух	1,4
Водяной пар:	
влажный	1,25
перегретый	1,33

Контрольные вопросы

1. Дать определение первого закона термодинамики.
2. Какая зависимость связывает основные параметры состояния?
3. Охарактеризовать основные термодинамические процессы.
4. Что называют теплоемкостью рабочего тела?
5. Как найти работу расширения в термодинамическом процессе?
6. Какие диаграммы используют для анализа термодинамических процессов?
7. Как найти количество теплоты, подводимой в термодинамическом процессе?

8. Записать уравнение адиабатного процесса.
9. Как изменяется энтропия в адиабатном процессе?
10. Привести пример адиабатного процесса.
11. Какие соотношения связывают основные параметры рабочего тела?

2.2. Теплоемкость

Теплоемкостью называют теплофизическую характеристику вещества, устанавливающую количественное соотношение между теплотой, переданной в термодинамическом процессе, и изменением температуры рабочего тела.

Истинная теплоемкость представляет собой отношение количества теплоты (δQ), полученной веществом при бесконечно малом изменении его состояния, к изменению температуры тела (dT) в данном процессе

$$C_x = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_x, \text{ Дж/К.}$$

Теплоемкость зависит от условий протекания термодинамического процесса (индекс x указывает на особенности рассматриваемого процесса).

В термодинамике особое место занимают:

- теплоемкость в процессе, происходящем при постоянном объеме ($V=\text{const}$) – *изохорная теплоемкость*

$$C_V = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V;$$

- теплоемкость в процессе, происходящем при постоянном давлении ($p=\text{const}$) – *изобарная теплоемкость*

$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p.$$

В *адиабатном процессе* теплоемкость равна нулю, а в *изотермическом* – стремится к бесконечности.

Обычно величину теплоемкости относят к количеству вещества. В зависимости от единицы измерения количества вещества различают:

удельную массовую теплоемкость

$$c = \frac{C}{M}, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)};$$

удельную объемную теплоемкость

$$c' = \frac{C}{V}, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

удельную мольную теплоемкость

$$\mu c = \frac{C}{N}, \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

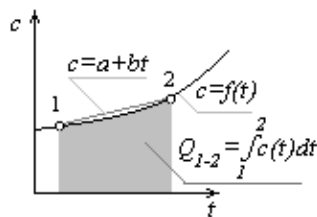
Здесь M , V и N – соответственно, масса вещества, его объем при нормальных физических условиях ($p=101,3$ кПа, $t=0^\circ\text{C}$) и число молей вещества.

Для идеального газа справедливо уравнение Майера, которое устанавливает соотношение между удельными массовыми изобарной и изохорной теплоемкостями

$$c_p - c_v = R,$$

где R – газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Теплоемкость реального газа зависит от температуры, поэтому при практических расчетах используют среднюю теплоемкость, которую определяют для процесса, происходящего в интервале температур от t_1 до t_2 , по формуле



$$c_x^{cp} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{Q_{1-2}}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c \, dt}{t_2 - t_1}.$$

Зависимость истинной теплоемкости от температуры может быть представлена в виде полинома степени n :

$$c = f(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_n \cdot t^n.$$

Для инженерных расчетов используют упрощенную зависимость

$$c = a_0 + a_1 \cdot t.$$

Значения средних теплоемкостей для различных веществ приводятся в термодинамических таблицах в интервале температур от 0°C до заданной температуры t . Среднюю теплоемкость в интервале температур от t_1 до t_2 определяют по формуле:

$$c_x^{cp} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_x^{cp} \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_x^{cp} \Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}.$$

Рассчитанную среднюю теплоемкость в интервале температур от t_1 до t_2 используют для нахождения количества теплоты, переданной рабочему телу.

$$Q_{1-2} = c_x^{cp} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (m_2 - t_1)$$

Определение теплоемкости воздуха

Цель работы: ознакомиться с методикой проведения калориметрического эксперимента и определить удельную массовую теплоемкость воздуха.

Описание экспериментальной установки

Определение теплоемкости воздуха проводится с помощью проточного калориметра (рис. 2.2.1), который состоит из канала, образованного трубой 1, покрытой слоем тепловой изоляции 2. Внутри него находится электрический нагреватель 3. В цепь электрического нагревателя включен лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 4, который позволяет регулировать количество тепловой энергии, выделяющейся в единицу времени. Вольтметр 8 и амперметр 9 служат для измерения напряжения и силы тока в цепи нагревателя. Поток воздуха через калориметр создается компрессором 5, пуск которого осуществляют тумблером 10. Для измерения температур рабочего тела на входе и выходе из калориметра используются термометры 6. Расход воздуха, проходящего через калориметр, определяют ротаметром 7. Выдача питания на установку производится переключателем 11.

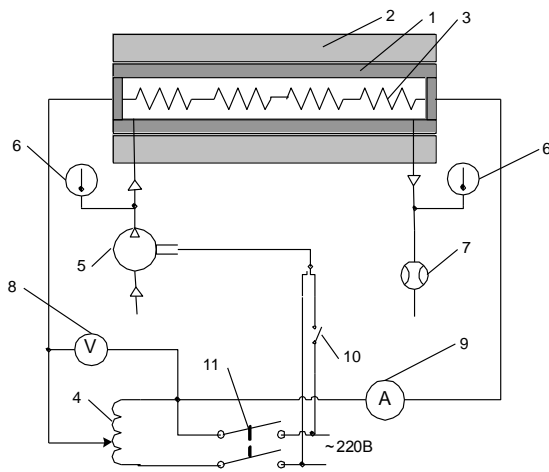


Рис. 2.2.1. Схема экспериментальной установки

Методика проведения эксперимента

1. Провести внешний осмотр установки. Убедиться в герметичности соединений трубопроводов и отсутствии оголенных проводов и посторонних предметов.

2. Подключить переключателем *11* установку к электрической сети и тумблером *10* выдать питание на компрессор.

3. Установить ЛАТРом *4* напряжение в цепи нагревателя, заданное преподавателем ($50 \div 100$ В).

4. Осуществить прогрев установки в течение $20 \div 25$ минут. За это время познакомиться с инструкцией по эксплуатации электрических термометров *6*, марки ЭТП-М (приложение П. 2) и привести их в действие.

5. Провести измерения температур воздуха на входе в калорифер t_1 и выходе из него t_2 . Полученные значения занести в таблицу наблюдений. С интервалом в 2 минуты повторять измерения температур с занесением результатов в таблицу до тех пор, пока отличия в значениях, полученных в соседних опытах, станут меньше 2°C . При этом режим работы установки можно считать установившимся.

6. Измерить вольтметром напряжение, а амперметром – силу тока в цепи нагревателя. Ротаметром *8* измерить объемный расход воздуха. Результаты замеров внести в протокол наблюдений.

7. Выключить переключателем *11* нагревательный элемент *3* и, по истечении $5 \div 10$ минут (что достаточно для охлаждения установки), остановить тумблером *10* компрессор.

8. Выключить электрические термометры ЭТП-М.

Обработка экспериментальных данных

При расчете средней удельной массовой изобарной теплоемкости воздуха тепловыми потерями в окружающую среду пренебрегаем.

1. Вычислить тепловой поток, создаваемый нагревателем,

$$Q = U \cdot I, \text{ Вт.}$$

2. Рассчитать массовый расход воздуха, проходящего через калорифер

$$\dot{M} = W \cdot \rho, \text{ кг/с,}$$

где ρ – плотность воздуха при температуре его t_2 на выходе из установки, кг/м^3 .

3. Определить удельную массовую изобарную теплоемкость воздуха (процесс теплообмена в проточном калорифере считают изобарным, т.к. его гидравлическое сопротивление много меньше абсолютного давления воздуха, протекающего через установку)

$$c_p = \frac{Q}{\dot{M} \cdot (t_2 - t_1)}, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К).}$$

4. Вычислить удельную массовую теплоемкость воздуха в изохорном процессе по уравнению Майера

$$c_v = c_p - R, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),$$

где R – газовая постоянная воздуха [$R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$].

5. Найти среднее значение удельной массовой изобарной теплоемкости с помощью таблиц и формулы

$$c_p^{\text{табл}} = \frac{c_p^{\text{сп}}|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_p^{\text{сп}}|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

6. Определить относительную погрешность эксперимента

$$\delta = \left| \frac{c_p - c_p^{\text{табл}}}{c_p^{\text{табл}}} \right| \cdot 100, \%$$

7. Вычислить приборную погрешность

$$\gamma = \left(\frac{2 \cdot \Delta t}{t_2 - t_1} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \right) \cdot 100, \%$$

где Δt , ΔU и ΔI – максимальные отклонения контролируемых параметров: температуры, напряжения и силы тока, соответственно. Они определяются классами точности приборов (K_t , K_U и K_I) и максимальными значениями шкал приборов (t_{max} , U_{max} и I_{max}). Например, максимально допустимое отклонение силы тока от истинного значения при измерении амперметром равно:

$$\Delta I = 0,01 \cdot K_I \cdot I_{\text{max}}, \text{ А.}$$

Таблица 2.2.1

Результаты измерения температур

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_1, ^\circ\text{C}$										
$t_2, ^\circ\text{C}$										

Таблица 2.2.2

Протокол наблюдений

№ п/п	Параметры	Значения
1	Сила тока I , А	
2	Напряжение U , В	
3	Объемный расход воздуха W , м ³ /с	
4	Массовый расход воздуха \dot{M} , кг/с	
5	Температура холодного воздуха t_1 , °С	
6	Температура горячего воздуха t_2 , °С	
7	Тепловой поток Q , Вт	
8	Удельная массовая изобарная теплоемкость воздуха c_p , Дж/(кг·К)	
9	Удельная массовая изохорная теплоемкость воздуха c_v , Дж/(кг·К)	
10	Табличное значение удельной массовой изобарной теплоемкости воздуха $c_p^{\text{табл}}$, Дж/(кг·К)	
11	Относительная погрешность эксперимента δ , %	
12	Приборная погрешность измерений γ , %	

Контрольные вопросы

1. Какую теплофизическую характеристику вещества называют теплоемкостью?
2. Какие виды удельных теплоемкостей вы знаете?
3. От каких факторов зависит теплоемкость газов?
4. Как определить среднюю теплоемкость в заданном интервале температур?
5. Какая связь существует между изобарной и изохорной теплоемкостями?
6. Объяснить назначение основных элементов установки.
7. Объяснить порядок работы с термометром ЭТП-М.
8. Какую размерность имеет удельная объемная теплоемкость?

Определение теплоемкости вещества методом регулярного теплового режима

Цель работы: изучить метод регулярного теплового режима и определить удельную массовую теплоемкость предложенного образца.

Основы теории

При постоянстве температуры окружающей среды, постоянстве коэффициента теплоотдачи между телом и средой и отсутствии внутренних источников тепловыделения процесс охлаждения или нагревания тела может быть разделен на две стадии: начальную и стадию регулярного теплового режима. На начальной стадии график изменения температурного поля во времени имеет неупорядоченный вид, который существенно зависит от начального состояния тела и внешних факторов. Регулярный тепловой режим наступает, когда начальные условия процесса перестают влиять на нагрев (охлаждение) тела. На этой стадии изменение температурного поля однозначно определяется условиями нагрева (охлаждения) и физическими свойствами тела.

Разность между температурами любой точки тела t и окружающей среды t_0 называют избыточной температурой

$$\theta = t - t_0.$$

На стадии регулярного теплового режима избыточная температура любой точки тела изменяется во времени по экспоненциальному закону:

$$\theta = A \cdot e^{-m\tau} \text{ или } \ln\theta = C - m \cdot \tau,$$

где A и C – постоянные величины ($C = \ln A$), τ – время, с.

Величину $m = \frac{1}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$, характеризующую интенсивность нагревания (охлаждения) тела на стадии регулярного теплового режима (относительную скорость изменения избыточной температуры тела), называют темпом нагревания (темпом охлаждения). Эта величина не зависит ни от координат точек тела, ни от времени.

На рисунке представлена графическая интерпретация процесса охлаждения.

В области регулярного теплового режима темп нагревания (охлаждения) может быть определен графически как тангенс угла наклона прямой, изображающей изменение избыточной температуры во времени, построенной в полулогарифмических координатах, или по формуле:



$$m = \left| \frac{\ln \theta_a - \ln \theta_b}{\tau_b - \tau_a} \right|, \text{с}^{-1}, \quad (2.2.1)$$

где a и b – любые точки, принадлежащие линии процесса в области регулярного теплового режима.

Основные положения теории регулярного теплового режима разработаны Кондратьевым Г.М. Согласно его исследованиям:

1. Соотношение $\ln \theta = C - m \cdot \tau$ выполняется независимо от формы тела и его физических свойств;

2. Темп нагревания (охлаждения) однородного тела при конечном значении коэффициента теплоотдачи пропорционален площади внешней поверхности тела F , коэффициенту теплоотдачи α и обратно пропорционален полной теплоемкости тела $C = c \cdot M = c \cdot \rho \cdot V$:

$$m = \psi \frac{\alpha \cdot F}{C},$$

где $\psi = \theta_F / \theta_V$ – коэффициент неравномерности распределения температур в теле, зависящий от условий нагревания (охлаждения) тела; θ_F – избыточная температура поверхности тела, °С; θ_V – средняя избыточная температура всего объема тела, °С.

3. Темп нагревания (охлаждения) m_∞ для однородных тел при высокой интенсивности теплоотдачи ($\alpha \rightarrow \infty$) пропорционален коэффициенту температуропроводности a материала:

$$a = K \cdot m_\infty, \quad (2.2.2)$$

где K – коэффициент формы тела, м².

Коэффициент формы тела определяют по следующим зависимостям:

- для шара радиуса R $K = \pi R^2$;
- для цилиндра радиуса R , высотой H $K = \left[2,405/R + \pi/H \right]^{-1}$;
- для параллелепипеда со сторонами l_1, l_2, l_3 $K = \left(\sum_{i=1}^3 \pi/l_i \right)^{-1}$.

Коэффициент температуропроводности представляет собой комбинацию следующих теплофизических параметров вещества:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho},$$

где λ – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·К); c – удельная массовая теплоемкость вещества, Дж/(кг·К); ρ – плотность вещества, кг/м³.

Метод регулярного теплового режима применяют для:

- определения времени нагрева (охлаждения) тел;
- нахождения теплофизических свойств веществ (коэффициентов температуропроводности, теплопроводности, удельной массовой теплоемкости);
- оценки коэффициента теплоотдачи.

Достоинством рассматриваемого метода является простота эксперимента, малая продолжительность и приемлемая точность получаемых результатов.

Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.2.2.

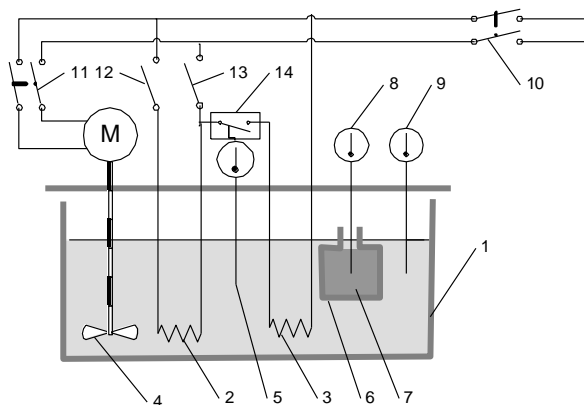


Рис. 2.2.2. Схема экспериментальной установки

Установка состоит из термостата 1 и калориметра 6, заполненного исследуемым материалом 7.

Термостат представляет собой теплоизолированный сосуд, заполненный дистиллированной водой. Вода нагревается электрическими нагревателями 2 и 3 мощностью 700 и 1300 ватт, соответственно. Нагреватель 2 предназначен для быстрого вывода термостата на режим, после чего его отключают тумблером 12. Автоматическое поддержание постоянной температуры воды в термостате осуществляется с помощью контактного термометра 5, который управляет подачей питания на нагреватель 3 через реле 14.

Одинаковая температура жидкости во всем объеме термостата достигается работой мешалки 4, приводимой в действие электродвигате-

лем. Создаваемое мешалкой интенсивное движение жидкости обеспечивает высокое значение коэффициента теплоотдачи при нагревании образца.

Термометр 8 служит для измерения температуры исследуемого материала, а термометр 9 – для определения температуры воды в термостате.

Переключатели 10, 11, 12 и 13 позволяют управлять соответствующими электрическими цепями. Переключатели и рукоятки управления термостатом расположены на щитке управления и имеют соответствующие надписи.

В работе возможно использование калориметров, имеющих цилиндрическую и сферическую формы. Цилиндрический калориметр имеет высоту 0,1 м и радиус 0,05 м. Диаметр сферического калориметра равен 0,1 м.

Методика проведения эксперимента

1. Включить выключателем 10 термостат в сеть.
2. Тумблером 11 выдать питание на электродвигатель мешалки.
3. Переключателями 12 и 13 включить нагреватели мощностью 700 и 1300 Вт.
4. Вращением наконечника контактного термометра 5 установить температуру срабатывания реле 14. Значение температуры для конкретного опыта узнать у преподавателя.
5. Наблюдать за нагревом воды в термостате. Когда температура воды, измеряемая термометром 9, окажется на $(2 \div 4)^\circ\text{C}$ меньше заданной в пункте 4, отключить тумблером 12 нагреватель 2. После этого заданная температура в термостате будет поддерживаться автоматически.
6. Опустить калориметр в термостат с помощью штатива: ослабить стопорные винты на штативе; поднять штатив; поставить на него калориметр; опустить калориметр в воду (горловина калориметра должна оставаться выше уровня воды); завернуть стопорные винты.
7. Термометром 8 через каждые 3 минуты измерять температуру образца. Результаты измерений заносить в протокол. Процесс измерений закончить, когда разность между температурами воды и образца станет меньше 4°C .
8. Тумблером 13 отключить нагреватель, выключателем 11 остановить мешалку, переключателем 10 отключить установку от сети.
9. Вынуть калориметр из термостата. Последовательность действий при выполнении этой операции обратная той, которая изложена в пункте 6. Калориметр горячий, поэтому следует соблюдать меры безопасности.

Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитать значения избыточной температуры для каждой i -й точки опыта:

$$\theta_i = t_0 - t_i .$$

2. Вычислить значения натуральных логарифмов избыточной температуры в каждой точке.

3. Построить в полулогарифмических координатах зависимость избыточной температуры от времени и определить область регулярного теплового режима. В области регулярного теплового режима аппроксимировать экспериментальные точки прямой линией.

4. Выбрать две любые точки, принадлежащие области регулярного режима, и определить по их координатам с помощью (2.2.1) темп нагревания.

5. Рассчитать коэффициент формы для используемого в опыте калориметра [список формул приведен в пояснении к зависимости (2.2.2)].

6. Вычислить по (2.2.2) коэффициент температуропроводности.

7. Определить значение удельной массовой теплоемкости

$$c = \frac{\lambda}{a \cdot \rho} , \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

8. Найти относительную погрешность найденного значения

$$\delta = \left| \frac{c - c_0}{c_0} \right| \cdot 100, \%,$$

где c_0 – табличное значение удельной массовой теплоемкости образца.

Таблица 2.2.3

Протокол экспериментальных и расчетных данных

№ п/п	Наименование	Номер замера							
		1	2	3	4	...	i	...	n
1	2	3							
1	Время измерения τ , с								
2	Температура воды t_0 , °C								
3	Температура образца, t , °C								
4	Избыточная температура θ , °C								
5	Логарифм избыточной температуры $\ln \theta$								

1	2	3
6	Темп нагревания m , $с^{-1}$	
7	Коэффициент формы K , $м^2$	
8	Коэффициент температуропроводности a , $м^2/с$	
9	Удельная массовая теплоемкость c , $Дж/(кг·К)$	
10	Относительная погрешность δ , %	

Контрольные вопросы

1. На какие стадии можно разделить процесс нагревания (охлаждения) тел?
2. В чем особенность начальной стадии процесса нагревания?
3. Какую стадию нестационарного процесса называют регулярным тепловым режимом?
4. Что называют темпом нагревания (охлаждения)?
5. От каких параметров зависит темп нагревания?
6. От чего зависит коэффициент формы тела?
7. Какую размерность имеют темп нагревания и коэффициент температуропроводности?
8. Что называют коэффициентом температуропроводности?
9. Что можно определять методом регулярного теплового режима?
10. Какую теплофизическую характеристику вещества называют теплоемкостью?
11. Как определить среднюю теплоемкость в заданном интервале температур?
12. Объяснить назначение основных элементов экспериментальной установки.

2.3. Изучение свойств влажного воздуха

Цель работы: изучить основные параметры, характеризующие состояние влажного воздуха, методы их определения, получить навыки в исследовании процессов с помощью диаграммы «Энтальпия – влагосодержание».

Основы теории

Влажным воздухом называют смесь сухого воздуха с водяным паром, а в наиболее общем случае – с водяным паром, мельчайшими каплями воды и кристаллами льда. Влажный воздух бывает *насыщенным* и *ненасыщенным*. Путем охлаждения ненасыщенный влажный воздух можно превратить в насыщенный. Температуру, при которой происходит это превращение, называют температурой точки росы.

Процессы, происходящие во влажном воздухе, встречаются при расчете и эксплуатации систем вентиляции и кондиционирования воздуха, сушке различных материалов и продуктов, осушении газов.

Чаще всего процессы во влажном воздухе протекают при давлениях близких к атмосферному. Плотность водяного пара в воздухе невелика. На основании вышесказанного свойства влажного воздуха с достаточной точностью описываются уравнениями для смеси идеальных газов.

Абсолютной влажностью воздуха называют массу водяного пара, содержащегося в одном кубическом метре влажного воздуха. Так как частички пара могут находиться в любой точке объема, то абсолютная влажность численно равна плотности пара (ρ_n) при его *парциальном давлении* и температуре влажного воздуха.

$$\rho_n = \frac{m_n}{V_g}, \text{ кг/м}^3$$

Относительной влажностью воздуха (φ) называют отношение его действительной абсолютной влажности к максимально возможной абсолютной влажности при данной температуре влажного воздуха, т.е. это отношение плотности пара во влажном воздухе к плотности насыщенного пара (ρ_s) при температуре влажного воздуха

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_s} \cdot 100\%.$$

С достаточной точностью справедливо также выражение

$$\varphi = \frac{p_n}{p_s} \cdot 100\%,$$

где p_n – парциальное давление пара во влажном воздухе, Па; p_s – давление насыщенного пара при температуре влажного воздуха, Па.

Влажный воздух при данной температуре будет насыщенным в том случае, когда пар в нем будет *насыщенным*, т.е.

$$\rho_n = \rho_s; \quad p_n = p_s; \quad \varphi = 100\%.$$

Относительную влажность наиболее точно определяют с помощью прибора, называемого психрометром, который имеет в своем составе

сухой и смоченный водой термометры. Имея показания сухого (t_c) и мокрого (t_m) термометров, по психрометрическим таблицам или диаграммам влажного воздуха можно найти относительную влажность воздуха.

Влагосодержанием называют массу водяного пара, приходящуюся на один килограмм сухого воздуха. Оно рассчитывается по формуле:

$$d = 0,622 \cdot \frac{p_n}{p_6 - p_n}, \text{ кг/кг сухого воздуха,} \quad (2.3.1)$$

где p_6 – барометрическое давление влажного воздуха, Па.

Парциальное давление водяного пара определяют по относительной влажности воздуха

$$p_n = p_s \cdot \frac{\varphi}{100}, \text{ Па} \quad (2.3.2)$$

Одним из параметров состояния газа является удельная энтальпия.

Энтальпия смеси газов равна сумме произведений энтальпий компонентов смеси на их концентрации. Энтальпию влажного воздуха, рассчитанную для одного килограмма сухого воздуха и d килограммов водяного пара, содержащегося в нем, т.е. для массы равной $(1+d)$ килограммов влажного воздуха, называют *удельной энтальпией влажного воздуха*

$$h = h_g + d \cdot h_n, \text{ кДж/кг сухого воздуха} \quad (2.3.3)$$

где h_g – удельная энтальпия сухого воздуха, кДж/кг, которая в приближенных расчетах принимается равной температуре влажного воздуха (поскольку удельная массовая теплоемкость сухого воздуха приближенно равна 1 кДж/(кг·К)):

$$h_g \cong t_c. \quad (2.3.4)$$

Удельная энтальпия водяного пара может быть определена по приближенной зависимости

$$h_n \cong 2500 + 1,93 \cdot t_c, \text{ кДж/кг сухого воздуха} \quad (2.3.5)$$

Энтальпия влажного воздуха, как видно из (2.3.3–2.3.5), является функцией температуры и влагосодержания. Она может быть определена и с помощью диаграммы «Энтальпия – влагосодержание».

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 2.3.1) состоит из аспирационного психрометра 1, установленного в штативе 3, электрического нагревателя 4 и цилиндра 2.

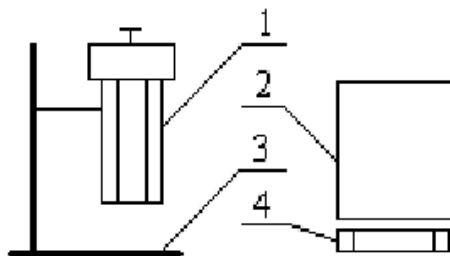


Рис. 2.3.1. Схема экспериментальной установки

Психрометр – это прибор, служащий для измерения относительной влажности и температуры влажного воздуха в стационарных условиях. Аспирационный психрометр состоит из двух термометров – сухого и влажного (мокрого). У влажного термометра ртутный "шарик" обернут смоченной водой тканью. В верхней части прибора встроен вентилятор, который создает восходящий поток воздуха, омывающего термометры.

Вследствие испарения воды с поверхности ткани ее температура понижается. В результате тепло- и массообмена влажной ткани с воздухом устанавливается равновесие, которому соответствует температура, показываемая обернутым влажной тканью термометром. Эту температуру принято называть температурой мокрого термометра (t_m). Она меньше температуры сухого термометра (t_c), показывающего действительную температуру влажного воздуха.

Чем ниже относительная влажность воздуха, тем интенсивнее испарение и больше разность в показаниях сухого и влажного термометров.

Порядок проведения опытов и обработки результатов

1. Смочить ткань влажного термометра.
2. Осторожным вращением рукоятки завести механизм вращения вентилятора.
3. Дождаться установившегося режима (когда показания термометров перестают изменяться) и записать показания сухого и мокрого термометров в журнал наблюдений.
4. Определить относительную влажность воздуха по психрометрической таблице (табл. П-1 приложения) или диаграмме «Энтальпия – влагосодержание».
5. Определить давление насыщенного водяного пара (p_s) при температуре влажного воздуха с помощью таблицы П-2 «Свойства водяного пара в состоянии насыщения» приложения и рассчитать по формуле (2.3.2) парциальное давление пара в данных условиях.
6. Произвести расчет влагосодержания и энтальпии влажного воздуха по уравнениям (2.3.1), (2.3.3–2.3.5) и занести в табл. 2.3.1.

Таблица 2.3.1

Журнал наблюдений и результатов расчета

№ опыта	$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$	$p_s, \text{Па}$	$p_p, \text{Па}$	$d, \text{кг/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$\Delta d/d_d, \%$	$\Delta h/h_d, \%$
1									
2									
3									

7. Подвести под аспирационный психрометр электронагреватель с установленным на нем цилиндром так, чтобы края термометров находились на уровне кромки цилиндра в его центре.

8. Включить нагреватель в розетку на 3 минуты, произвести измерения температур в соответствии с пунктами 2 и 3 и определить относительную влажность, влагосодержание и энтальпию после окончания процесса изобарного нагрева, т.е. выполнить пункты 4–6.

9. Повторить пункт 8, увеличив время нагрева до 5 минут.

10. Нанести на диаграмму «Энтальпия – влагосодержание» данные ваших экспериментов (используя значения температур сухого и мокрого термометров) и определить с ее помощью значения энтальпий и влагосодержаний для всех опытов.

11. Вычислить относительные погрешности влагосодержаний и энтальпий, используя расчетные данные d , h и определенные с помощью диаграммы значения d_d и h_d [знак Δ в табл. 2.3.1 означает абсолютную погрешность – разность между рассчитанным значением и истинным (найденным по диаграмме)].

Контрольные вопросы

1. Что называют влажным воздухом?
2. Какой воздух называют насыщенным влажным воздухом?
3. Дать определения абсолютной влажности воздуха, относительной влажности воздуха, влагосодержания.
4. Какой прибор используют для определения относительной влажности воздуха? Как он устроен?
5. Как пользоваться психрометрическими таблицами?
6. Как изображают на диаграмме «Энтальпия – влагосодержание» процессы нагревания, охлаждения и увлажнения влажного воздуха?
7. Какую температуру называют температурой точки росы? Как ее найти с помощью диаграммы «Энтальпия – влагосодержание»?
8. Как определить с помощью диаграммы «Энтальпия – влагосодержание» количество теплоты, затраченной на нагревание влажного воздуха от начальной температуры до конечной?

2.4. Теплопроводность материалов

Значение температур в различных точках сплошной среды, как правило, не одинаково и может изменяться с течением времени. Другими словами *температурное поле* неоднородно и нестационарно. В любом твердом теле, жидкости или газе в случае неоднородного поля температур происходит самопроизвольный перенос теплоты за счет энергетического взаимодействия атомов или молекул из области с более высокой температурой в область, где температура ниже. Молекулярный процесс переноса тепловой энергии в сплошной среде называют *теплопроводностью*.

Согласно основному закону теплопроводности (закону Фурье) *тепловой поток*, проходящий через изотермическую поверхность тела, пропорционален площади этой поверхности и *градиенту температур*:

$$Q = -\lambda \cdot F \cdot \text{grad } t, \quad (2.4.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); F – площадь изотермической поверхности, через которую проходит тепловой поток, м², $\text{grad}(t)$ – градиент температур, К/м.

Коэффициент теплопроводности – это теплофизический параметр, который характеризует способность материала проводить теплоту. Он зависит от рода и структуры материала, температуры, давления, а для пористых и волокнистых материалов – от влажности. Наибольшей теплопроводностью обладают металлы, наименьшей – газы.

Знак «-» в законе Фурье указывает на взаимно противоположное направление векторов теплового потока и градиента температур.

Для *стационарного одномерного температурного поля* в зависимости от формы тела (формы изотермических поверхностей) основной закон теплопроводности может принимать различный вид:

- для плоской формы (пластины, толщиной δ)

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_1 - t_2); \quad (2.4.2)$$

- для цилиндрической формы (трубы длиной l , внутренний диаметр которой d_1 , а наружный – d_2)

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot (t_1 - t_2); \quad (2.4.3)$$

- для шаровой формы (полый сферы, внутренний диаметр которой d_1 , а наружный – d_2)

$$Q = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right)} \cdot (t_1 - t_2); \quad (2.4.4)$$

Определение коэффициента теплопроводности методом пластины

Цель работы: экспериментально определить коэффициент теплопроводности предложенного образца методом пластины и провести анализ результата.

Основы теории

Определение коэффициента теплопроводности материала методом пластины основано на использовании уравнения (2.4.2). Этот метод предполагает экспериментальное определение *плотности теплового потока*, толщины образца, имеющего форму пластины, и значений температур на противоположных поверхностях образцов.

Часть теплового потока Q_n (потери теплоты), создаваемого внешним нагревателем, проходит, минуя испытываемый образец, непосредственно в окружающую среду. Это не позволяет использовать значение теплового потока, создаваемого электрическим нагревателем $Q_{эл}$, в качестве известного значения теплового потока Q , проходящего через образец, в формуле (2.4.2).

Для уменьшения влияния потерь теплоты на результаты экспериментального определения коэффициента теплопроводности опыты проводят с образцами одинаковых размеров из эталонного и исследуемого материалов. Считается, что у этих образцов, находящихся в одинаковых условиях, потери теплоты также одинаковы. Следовательно, при одинаковом тепловом потоке нагревателя одинаковые тепловые потоки пройдут и через образцы.

Плотность теплового потока, проходящего через эталонный образец, для которого коэффициент теплопроводности λ^* известен, рассчитывают по (2.4.2) после экспериментального измерения разности температур. Найденное значение используют для определения коэффициента теплопроводности исследуемого образца, значения температур на поверхностях которого определяют в опыте с этим образцом.

Описание экспериментальной установки

Объектом исследования является образец материала, предложенный преподавателем.

Основные измеряющие и контролирующие приборы смонтированы на стенде УБ-82, подключенном к сети с напряжением 220 вольт. Схема стенда представлена на рис. 2.4.1.

Включение установки осуществляется переключателем 1, при этом загорается индикаторная лампочка 2 «Напряжение подано».

Для регулирования уровня напряжения в пределах от 0 до 250 вольт установлен лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 3, через который осуществляется подвод энергии к нагревателю 8.

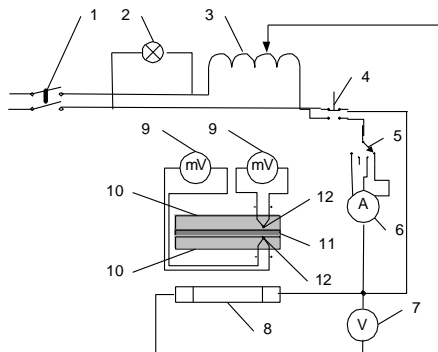


Рис. 2.4.1. Схема экспериментальной установки

Для измерения силы тока, протекающего через нагреватель, установлен амперметр 6, подключаемый к цепи кнопкой 4. Амперметр имеет три предела измерений, выбор которых осуществляется переключателем 5. Напряжение в цепи нагревателя контролируют с помощью вольтметра 7.

Измерение температур поверхностей образца исследуемого материала 11 производят с помощью термопар 12, подключенных к милливольтметрам 9, шкала которых имеет размерность температуры. Термопары вмонтированы в алюминиевые диски 10.

Методика проведения эксперимента

Включение экспериментальной установки осуществляется только под наблюдением преподавателя.

1. Поместить эталонный образец между алюминиевыми дисками 10, находящимися на нагревателе 8.

2. Переключателем 1 подключить установку к электрической сети и с помощью лабораторного автотрансформатора 3 установить напряжение, заданное преподавателем (50 ± 100 В).

3. Дождаться установившегося (стационарного) режима. Режим считается установившимся, если температуры образца (показания милливольтметров) не изменяются с течением времени.

4. Измерить: температуры t_1 и t_2 с помощью милливольтметров 9; напряжение U вольтметром 7; силу тока I в цепи нагревателя амперметром 6 (нажатием кнопки 4 подключить амперметр к сети, при необхо-

димости переключателем 5 изменить диапазон значений). Измеренные значения занести в протокол наблюдений.

5. Отключить переключателем 1 установку от сети.

6. Сменить эталонный образец на образец из исследуемого материала. При смене соблюдать осторожность. Эталонный образец, поверхность нагревателя и алюминиевые диски горячие. При этой операции следует пользоваться пинцетом или надеть на руку тепловой изолятор (рукавицу).

7. Подключить переключателем 1 установку к сети. Убедиться, что напряжение, выдаваемое на установку, не изменилось (рукоятка ЛАТРа должна находиться в прежнем положении).

8. Повторить пункты 3 – 5.

Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитать тепловую мощность нагревателя

$$Q = U \cdot I, \text{ Вт.}$$

2. Вычислить плотность теплового потока, проходящего через эталонный образец,

$$q = \frac{\lambda^*}{\delta} \cdot (t_1 - t_2), \text{ Вт/м}^2,$$

где λ^* – коэффициент теплопроводности эталонного образца Вт/(м·К);
 δ – толщина образца, м.

3. Определить коэффициент теплопроводности исследуемого образца

$$\lambda = q \cdot \frac{\delta}{t_1 - t_2}, \text{ Вт/(м·К).}$$

4. Рассчитать значение средней температуры образца

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}, \text{ }^\circ\text{C.}$$

5. Найти по справочным данным для исследуемого материала при его средней температуре действительное значение коэффициента теплопроводности λ_0 .

6. Оценить относительную погрешность эксперимента

$$\sigma = \left| \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} \right| \cdot 100, \%$$

7. Вычислить приборную погрешность измерений:

$$\gamma = \left(\frac{2 \cdot \Delta t}{t_1 - t_2} \right) \cdot 100, \%,$$

где Δt – максимальная ошибка в измерении температуры определяется по классу точности прибора К и максимальному значению шкалы прибора t_{\max}

$$\Delta t = 0,01 \cdot K \cdot t_{\max}.$$

Таблица 2.4.1

Протокол экспериментальных и расчетных данных

№ п/п	Наименование величины	Эталонный образец	Исследуемый образец
1	Толщина образца δ , м		
2	Напряжение U , В		
3	Сила тока I , А		
4	Температура нижней поверхности образца t_1 , °С		
5	Температура верхней поверхности образца t_2 , °С		
6	Тепловая мощность нагревателя Q , Вт		
7	Плотность теплового потока, проходящего через образцы, q , Вт/м ²		
8	Экспериментальное значение коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·К)		
9	Табличное значение коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·К)		
10	Относительная погрешность эксперимента σ , %		
11	Приборная погрешность измерений γ , %		

Контрольные вопросы

1. Какой процесс называют теплопроводностью?
2. В какой среде наблюдается явление теплопроводности?
3. Что называют температурным полем? Какие бывают температурные поля?
4. Что понимают под градиентом температур?
5. Привести одну из формулировок основного закона теплопроводности (закона Фурье).
6. В каких единицах измеряют плотность теплового потока?
7. Что называют коэффициентом теплопроводности, и в каких единицах он измеряется?
8. От чего зависит коэффициент теплопроводности?
9. Какой вид имеет закон Фурье для пластины?
10. Объяснить назначение основных элементов экспериментальной установки.
11. Что используют для измерения температуры поверхности?
12. Какие условия называют установившимися?
13. Для чего используют эталонный образец при определении коэффициента теплопроводности в данной работе?

Определение коэффициента теплопроводности методом трубы

Цель работы: экспериментально определить коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала методом трубы (методом неограниченного цилиндрического слоя), провести анализ результата и исследовать эффективность тепловой изоляции.

Основы теории

Определение коэффициента теплопроводности материала методом трубы основано на использовании уравнения (2.4.3). Этот метод предполагает экспериментальное определение *линейной плотности теплового потока*, внутреннего и наружного диаметров образца, имеющего форму цилиндра, и значений температур на противоположных границах слоя.

Формула (2.4.3) справедлива, когда температурное поле одномерно, т.е. в случае изменения температуры только вдоль радиуса цилиндрического слоя. Из-за утечек теплоты с торцевых поверхностей цилиндра у краев трубы условие одномерности нарушается. Для уменьшения влияния указанного краевого эффекта на результат определения коэффициента теплопроводности данным методом труба должна иметь достаточно большую длину (теоретически неограниченную длину).

Для уменьшения потерь тепловой энергии в окружающую среду и снижения температуры наружных поверхностей объектов до безопасно-

го значения их горячие поверхности покрывают слоем *тепловой изоляции*. В качестве материалов для тепловой изоляции используют вещества с низкими значениями коэффициентов теплопроводности (как правило, имеющие пористую или волокнистую структуру). Например, асбест, минеральная вата, пенопласт, войлок и т.д.

Особенностью изолирования *цилиндрических поверхностей* является немонотонное изменение тепловых потерь от толщины слоя изоляции в случае неправильного выбора теплоизоляционного материала. Увеличение толщины слоя изоляции способствует, с одной стороны, увеличению *термического сопротивления теплопроводности*, что направлено на снижение тепловых потерь, а с другой, – приводит к увеличению площади наружной (теплоотдающей) поверхности, что уменьшает *термическое сопротивление теплоотдачи* и вызывает увеличение потерь теплоты. Рис. 2.4.2а показывает изменение тепловых потерь при неправильном выборе материала для тепловой изоляции, когда сумма термических сопротивлений теплопроводности и теплоотдачи сначала понижается, что приводит к росту потерь, а затем возрастает, что соответствует снижению потерь.

Диаметр изоляции, при котором тепловые потери максимальны, называют *критическим диаметром изоляции*.

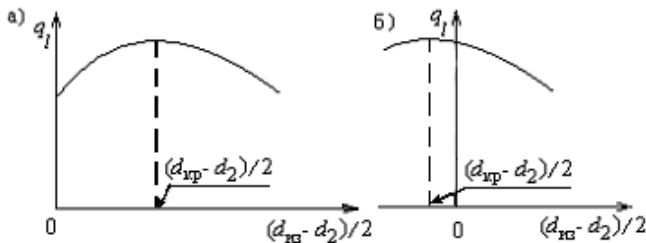


Рис. 2.4.2. Зависимость потерь теплоты с цилиндрической поверхности от толщины слоя изоляции: а – при неправильном выборе материала, б – при правильном выборе

При правильном выборе материала тепловой изоляции (рис. 2.4.2б) критический диаметр меньше диаметра неизолированного трубопровода d_2 . Материал, соответствующий такому условию, имеет коэффициент теплопроводности

$$\lambda_{из} \leq \frac{\alpha_2 \cdot d_2}{2}, \tag{2.4.5}$$

где α_2 – коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающей среде.

Описание экспериментальной установки

Схема установки представлена на рис. 2.4.3. Экспериментальная установка состоит из металлической трубы 1, покрытой слоем исследуемого изоляционного материала 2, которым является асботкань. Для снижения тепловых потерь торцы трубы закрыты тепловой изоляцией.

Нагрев трубы осуществляется электрическим нагревательным элементом 3. Регулировка напряжения осуществляется лабораторным автотрансформатором (ЛАТР) 11. Для определения мощности, потребляемой нагревательным элементом, в цепь питания включены вольтметр 9 и амперметр 10.

Температура исследуемого материала измеряется десятью хромель-копелевыми термопарами: термопарами 4 измеряют температуру внутренней поверхности изоляции, а термопарами 5 – наружной поверхности, которые подключаются к милливольтметру 7 с помощью многопозиционного переключателя 6. Термометр 8 служит для измерения температуры окружающей среды.

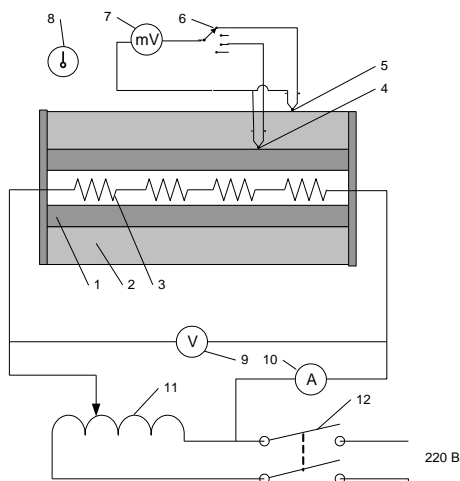


Рис. 2.4.3. Схема экспериментальной установки

Переключатель 12 осуществляет подключение установки к электрической сети.

Геометрические размеры слоя исследуемого материала:

- внутренний диаметр изоляции $d_2 = 0,032$ м;
- наружный диаметр изоляции $d_3 = 0,05$ м;
- длина цилиндрического слоя $l = 0,6$ м.

Методика проведения эксперимента

Включение экспериментальной установки осуществляется только под наблюдением преподавателя.

1. Подключить переключателем 12 установку к сети.
2. Установить ЛАТРОм 11 заданное преподавателем напряжение в цепи нагревателя.
3. Дождаться установившегося (стационарного) режима работы установки, т.е. режима, при котором *поле температур стационарное*. Признаком наступления данного режима является прекращение движения стрелки милливольтметра, подключенного к одной из термопар.
4. Измерить амперметром 10 силу тока и вольтметром 9 напряжение в цепи нагревателя. Измерить показания всех термопар, последовательно подключая их с помощью переключателя 6 к милливольтметру 7. Термометром 8 измерить температуру окружающей среды. Занести показания приборов в протокол наблюдений.
5. Провести повторные измерения температур и занести их в протокол наблюдений через 5÷10 минут, чтобы убедиться в стационарности протекания процесса. (При существенных различиях в показаниях одних и тех же термопар повторить этот еще раз).
6. Выключить переключателем 12 установку.

Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитать тепловой поток, создаваемый нагревателем,

$$Q = U \cdot I, \text{ Вт.}$$

2. Определить средние значения температур внутренней \bar{t}_1 и наружной \bar{t}_2 поверхностей изоляции:

$$\bar{t}_1 = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5};$$
$$\bar{t}_2 = \frac{t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}}{5}.$$

3. Вычислить значение коэффициента теплопроводности исследуемого материала

$$\lambda_{из} = \frac{Q \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (\bar{t}_1 - \bar{t}_2)}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

4. Рассчитать коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающей среде

$$\alpha_2 = \frac{Q}{\pi \cdot d_3 \cdot l \cdot (t_2 - t_0)}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где t_0 – температура окружающей среды, °С.

5. Проверить исследуемый материал на соответствие условию (2.4.5) эффективности его использования в качестве теплоизоляционного.

6. Определить критический диаметр изоляции:

$$d_{кр} = \frac{2 \cdot \lambda_{из}}{\alpha_2}, \text{ м.}$$

7. Оценить относительную погрешность эксперимента

$$\delta = \left| \frac{\lambda_{из} - \lambda_0}{\lambda_0} \right| \cdot 100, \%,$$

где λ_0 – истинное значение коэффициента теплопроводности исследуемого материала (находится по справочным данным, приведенным в приложении).

8. Вычислить приборную погрешность измерений

$$\gamma = \left(\frac{\Delta U_n}{U} + \frac{\Delta I_n}{I} + \frac{2 \cdot \Delta t_n}{t_1 - t_2} \right) \cdot 100, \%,$$

где ΔU_n , ΔI_n и Δt_n – максимальные ошибки в измерениях напряжения, силы тока и температуры, соответственно. Они определяются по классу точности соответствующего прибора K_i и максимальному значению шкалы прибора. Например, максимальная ошибка, допускаемая при измерении силы тока амперметром с классом точности K_A и верхним пределом шкалы измерения I_{max} , равна

$$\Delta I_n = 0,01 \cdot K_A \cdot I_{max}.$$

Таблица 2.4.2

Показания термопар

Время измерения	Значения температур, °С в местах установки термопар									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Таблица 2.4.3

Протокол экспериментальных и расчетных данных

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Напряжение U , В	
2	Сила тока I , А	
3	Тепловой поток Q , Вт	
4	Температура окружающей среды t_0 , °С	
5	Средняя температура внутренней поверхности изоляции \bar{t}_1 , °С	
6	Средняя температура внутренней поверхности изоляции \bar{t}_2 , °С	
7	Коэффициент теплопроводности материала $\lambda_{из}$, Вт/(м·К)	
8	Коэффициент теплоотдачи от изоляции в окружающую среду α_2 , Вт/(м ² ·К)	
9	Критический диаметр изоляции $d_{кр}$, м	
10	Относительная погрешность определения коэффициента теплопроводности δ , %	
11	Приборная погрешность γ , %	

Контрольные вопросы

1. Как происходит перенос тепловой энергии в твердых телах?
2. Чем определяется интенсивность процесса переноса теплоты в твердых телах?
3. Что называют коэффициентом теплопроводности?
4. От чего зависит величина коэффициента теплопроводности?
5. Что понимают под термином термическое сопротивление?
6. Какие вещества используют в качестве тепловой изоляции?
7. В чем назначение тепловой изоляции?
8. Как изменяются потери теплоты при наложении на трубу теплового изолятора при неправильном выборе материала?
9. Что понимают под термином «критический диаметр изоляции»?
10. Почему, как правило, трубопроводы малых диаметров не изолируют?

11. В чем состоит условие рационального выбора материала для тепловой изоляции трубопроводов?
12. Какой тепловой режим называют установившимся?
13. Почему при определении коэффициента теплопроводности материала методом трубы длина рабочего участка должна быть достаточно большой?
14. При соблюдении каких условий уравнение, которое использовалось для определения коэффициента теплопроводности, справедливо?
15. Объяснить назначение основных элементов экспериментальной установки.

2.5. Теплоотдача

Конвективным теплообменом, или *теплоотдачей*, называют процесс переноса тепловой энергии между поверхностью твердого тела и теплоносителем (средой, в качестве которой обычно выступают жидкости или газы), который сопровождается движением их относительно друг друга.

Различают свободное и вынужденное движение среды. *Свободным* называют движение, возникающее вследствие разности плотностей нагретых и холодных элементарных объемов среды в гравитационном поле. *Вынужденным* называют движение среды, возникающее под действием внешних источников (часто источниками движения являются насосы и вентиляторы).

Теплоотдачу в условиях свободного движения называют *свободной (естественной) конвекцией*, а в условиях вынужденного движения – *вынужденной конвекцией*.

Основным законом теплоотдачи является закон Ньютона-Рихмана, согласно которому *тепловой поток* Q , передаваемый в условиях конвективного теплообмена, пропорционален площади теплоотдающей поверхности F и разности температур Δt между поверхностью и омывающей ее средой

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t, \text{ Вт.} \quad (2.5.1)$$

Коэффициент пропорциональности α получил название *коэффициента теплоотдачи*. Он характеризует интенсивность конвективного теплообмена и численно равен тепловому потоку, проходящему через единицу площади теплоотдающей поверхности при разности температур между поверхностью и средой в один градус, т.е.

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot (t_c - t_{ж})}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (2.5.2)$$

где t_c и $t_{ж}$ – температуры поверхности тела и среды, °С, соответственно.

Коэффициент теплоотдачи зависит от большого числа факторов. На него оказывают влияние:

- температура, форма и размеры тела, ориентация его в пространстве;
- температура, скорость и *режим движения* среды;
- физические свойства среды: вязкость, плотность, теплоемкость, теплопроводность, коэффициент объемного расширения и ряд других величин.

Различают *локальный* (местный, определенный для данной точки поверхности) коэффициент теплоотдачи и *средний* коэффициент теплоотдачи для всей теплоотдающей поверхности.

Для экспериментального определения коэффициента теплоотдачи используют формулу (2.5.2).

Обобщение накопленного экспериментального материала проводят с помощью *теории подобия*. Из величин, оказывающих влияние на процесс теплоотдачи, составляют *критерии подобия*. Наиболее часто используют следующие критерии подобия:

- критерий Нуссельта
$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}; \quad (2.5.3)$$

- критерий Рейнольдса
$$Re = \frac{V \cdot l}{\nu}; \quad (2.5.4)$$

- критерий Грасгофа
$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2}; \quad (2.5.5)$$

- критерий Прандтля
$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}. \quad (2.5.6)$$

Здесь α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); l – характерный линейный размер теплоотдающей поверхности (размер, определяющий протекание процесса), м; λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К); V – скорость движения среды, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости среды, м²/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; β – температурный коэффициент объемного расширения среды, К⁻¹; Δt – разности температур поверхности тела и среды, °С; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость среды, Дж/(кг·К).

Температуру, при которой определяют значения теплофизических параметров среды, называют *определяющей*.

Массив экспериментальных данных описывают *критериальными уравнениями*. В наиболее общем случае критериальное уравнение для процесса теплоотдачи имеет следующий вид

$$Nu = f(Re, Gr, Pr).$$

Теплоотдача горизонтальной трубы при свободном движении воздуха

Цель работы: изучить методику исследования процесса теплоотдачи в условиях свободного движения среды и экспериментально определить коэффициент теплоотдачи.

Основы теории

Для экспериментального определения коэффициента теплоотдачи используют формулу (2.5.2). Величины, входящие в правую часть этой зависимости, определяют в процессе проведения опыта при стационарных условиях (при *установившемся поле температур*).

Критериальное уравнение, полученное М.А. Михеевым в результате обработки экспериментальных данных по теплоотдаче горизонтальной цилиндрической поверхности в условиях свободного движения среды, имеет вид:

$$Nu_{d_{жс}} = C \cdot Gr_{d_{жс}} \cdot Pr_{жс}^n, \quad (2.5.7)$$

где C и n – постоянные величины. Их значения, в зависимости от режима движения среды, берут из табл. 2.5.1.

Индекс « d » указывает, что в качестве характерного линейного размера в критериях подобия следует использовать наружный диаметр цилиндра. Индекс « $ж$ » указывает, что в качестве определяющей температуры следует использовать температуру среды (воздуха), причем в данной зависимости следует использовать среднюю температуру *теплового пограничного слоя* воздуха.

Таблица 2.5.1

Значения постоянных величин в формуле М.А. Михеева

№ п/п	Режим движения среды	Gr·Pr	C	n
1	Ламинарный	$5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^8$	0,5	0,25
2	Турбулентный	$5 \cdot 10^8 \div 1 \cdot 10^9$	0,15	0,33

Описание экспериментальной установки

Объектом исследования (рис. 2.5.1) является горизонтальная металлическая труба 1, внутри которой расположен нагревательный элемент 2. Торцы трубы защищены тепловой изоляцией. Наружный диаметр трубы $d = 0,036$ м, длина трубы $l = 0,6$ м.

Нагревательный элемент получает питание от лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) 5, который, в свою очередь, подключен к сети переменного тока напряжением 220 вольт через сетевой выключатель 6.

Тепловой поток, отводимый с поверхности трубы, определяется по расходу электрической энергии с помощью вольтметра 3 и амперметра 4.

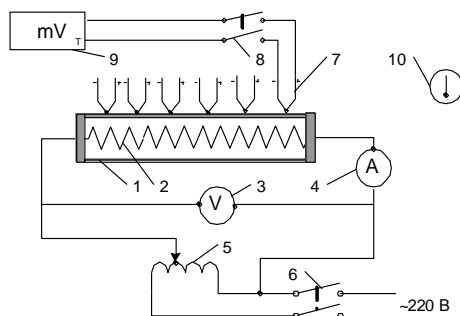


Рис. 2.5.1. Схема экспериментальной установки

Для измерения температуры теплоотдающей поверхности используют термомпары 7, равномерно расположенные по длине трубы.

Милливольтметр 9, шкала которого проградуирована в градусах Цельсия, последовательно подключается к термомпарам с помощью переключателей 8.

Температуру окружающего воздуха измеряют термометром 10, который расположен на достаточном удалении от нагревателя.

Методика проведения эксперимента

1. Подключить сетевым переключателем 6 установку к сети. Включение производить под наблюдением преподавателя.

2. ЛАТРом 5 установить заданное преподавателем напряжение в цепи нагревателя (рекомендуемый диапазон напряжений 80÷120 В).

3. Дождаться наступления стационарного теплового режима (ориентировочно он наступает через 20 минут после включения установки).

4. Провести измерения:

- напряжения (вольтметром 3) и силы тока (амперметром 4) в цепи нагревателя;

- температуры поверхности трубы в N точках, подключая последовательно термомпары 7 к милливольтметру 9 с помощью переключателей 8;

- температуры воздуха в помещении (термометром 10).

Полученные значения занести в протокол экспериментальных данных.

5. Повторить измерения, согласно пункту 4, через 5 и 10 минут.

Обработка экспериментальных данных

1. Определить тепловой поток, создаваемый нагревателем

$$Q = U \cdot I, \text{ Вт.}$$

2. Рассчитать среднее значение температуры теплоотдающей поверхности

$$t_c = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где N – число термомпар, используемых для определения средней температуры.

3. Вычислить долю теплового потока, передаваемого в окружающую среду излучением,

$$Q_u = c_{np} \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт},$$

где c_{np} – приведенный коэффициент излучения тела [для используемой в работе трубы $c_{np} = 1,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$]; T_c и $T_{жс}$ – соответственно, абсолютные температуры поверхности тела и окружающей среды, К; F – площадь теплоотдающей поверхности трубы (площадь боковой поверхности цилиндра), м^2 .

4. Найти значение теплового потока, отдаваемого среде путем конвективного теплообмена

$$Q_k = Q - Q_u, \text{ Вт}.$$

5. Определить средний коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Q_k}{F \cdot (t_c - t_{жс})}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

6. Рассчитать по (2.5.3), (2.5.5) и (2.5.6) значения критериев Нуссельта Nu_3 , Грасгофа и Прандтля. Физические параметры воздуха ν , λ и a , входящие в эти формулы, берут из таблиц физических свойств воздуха при средней температуре воздуха

$$\bar{t}_{жс} = \frac{t_c + t_{жс}}{2}.$$

Температурный коэффициент объемного расширения воздуха равен

$$\beta = \frac{1}{t_{жс} + 273,15}, \text{ К}^{-1}.$$

7. Определить по табл. 2.5.1 значения коэффициентов C и n , входящих в формулу (2.5.7) и рассчитать по ней значение критерия Nu .

8. Вычислить относительную погрешность формулы Михеева для условий опыта

$$\delta = \left| \frac{Nu - Nu_3}{Nu_3} \right| \cdot 100\%.$$

9. Определить максимально возможную относительную ошибку при использовании установленных приборов (приборную погрешность)

$$\gamma = \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta t_c + \Delta t_{жс}}{t_c - t_{жс}} \right) \cdot 100, \%$$

где знаком Δ с последующим буквенным символом обозначены максимальные отклонения контролируемых параметров. Их определяют по классам точности приборов К и максимумам их шкал. Например:

$$\Delta I = 0,01 \cdot K_I \cdot I_{max}.$$

Для приборов, на которых отсутствует класс точности, максимальные отклонения измеряемого параметра считают равными половине цены деления. Например, для жидкостного термометра с ценой деления 1°C

$$\Delta t_{жс} = 0,5^\circ\text{C}.$$

Таблица 2.5.2

Протокол экспериментальных и расчетных данных

№ п/п	Наименование параметра	№опыта		
		1	2	3
1	Время			
2	Напряжение U , В			
3	Сила тока I , А			
4	Температура поверхности в i -й точке t_{ci} , $^\circ\text{C}$	1		
		2		
		3		
		4		
		5		
		6		
5	Средняя температура поверхности трубы t_c , $^\circ\text{C}$			
6	Температура воздуха в помещении $t_{ж}$, $^\circ\text{C}$			
7	Тепловой поток, создаваемый нагревателем Q , Вт			
8	Тепловой поток, передаваемый излучением $Q_{и}$			
9	Конвективный тепловой поток $Q_{к}$, Вт			

10	Средний коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К)			
11	Критерий Нуссельта Nu_s			
12	Критерий Грасгофа Gr			
13	Критерий Прандтля Pr			
14	Расчетное значение критерия Нуссельта по формуле Михеева Nu			
15	Относительная погрешность формулы (1.1) δ , %			
16	Приборная погрешность γ , %			

Контрольные вопросы

1. Какой процесс называют конвективным теплообменом?
2. Сформулируйте основной закон теплоотдачи.
3. Какую величину называют коэффициентом теплоотдачи и какие факторы оказывают на нее влияние?
4. Какое движение называют свободным?
5. Что называют критерием подобия?
6. Какой процесс называют вынужденной конвекцией?
7. Какой режим называют установившимся?
8. Что понимают под понятиями «определяющий размер» и «определяющая температура»?
9. Какие критерии используют для описания процесса естественной конвекции?
10. Какой вид имеют критерии Нуссельта, Грасгофа, Прандтля и какой у них физический смысл?
11. Что представляет собой критериальное уравнение процесса свободной конвекции?
12. Какая величина использовалась в качестве определяющего размера в данной работе?

Теплоотдача вертикальной трубы при свободном и вынужденном движении воздуха

Цель работы: изучить методику исследования процесса теплоотдачи в условиях свободного и вынужденного движения среды; экспериментально определить коэффициент теплоотдачи и выяснить влияние на него скорости потока.

Основы теории

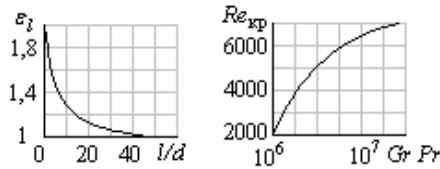
Для экспериментального определения коэффициента теплоотдачи используют формулу (2.5.2). Величины, входящие в правую часть этой зависимости, определяют в процессе проведения опыта при стационарных условиях (при *установившемся поле температур*).

Вид критериальных уравнений, обобщающих экспериментальные данные по теплоотдаче при движении жидкостей в каналах, зависит от формы и размеров канала, *режима движения* и теплофизических свойств жидкостей.

При ламинарном течении жидкостей и газов в прямых трубах используют следующие зависимости:

Условия применения зависимости	Критериальное уравнение
$Gr \cdot Pr < 5 \cdot 10^5$ и $Re \cdot Pr \cdot d/l < 12$	$Nu = 3,66 \cdot \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_c} \right)^{0,14} \cdot \varepsilon_l$
$Gr \cdot Pr < 5 \cdot 10^5$ и $Re \cdot Pr \cdot d/l > 12$	$Nu = 1,6 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot d/l \right)^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_c} \right)^{0,14} \cdot \varepsilon_l$
$5 \cdot 10^5 < Gr \cdot Pr < 1,5 \cdot 10^7$ и $Re < Re_{кр}$	$Nu = 0,74 \cdot \left(Re \cdot Pr \right)^{0,2} \cdot \varepsilon_l + k \cdot \left(\delta t \right)^{0,02} \cdot \left(Gr \cdot Pr \right)^{0,1} \cdot \varepsilon_l$

Здесь определяющие параметры: диаметр канала d , температура потока $t_{ж}$ и его скорость V (при определении критерия Грасгофа для горизонтальной трубы определяющим размером является диаметр d , а для вертикальной – длина трубы l).



Коэффициент $k=0$ для горизонтальной трубы и $k=1$ для вертикальной трубы. Критическое значение критерия Рейнольдса $Re_{кр}$ для горизонтальной трубы и вертикальной, при взаимно противоположных направлениях вынужденной и свободной конвекции, равен 2300. Для вертикальной трубы при совпадении направления свободной и вынужденной конвекции $Re_{кр}$ находят из графика. Поправочный множитель ε_l , учитывающий влияние начального участка на среднее значение коэффициента теплоотдачи, находят по графику.

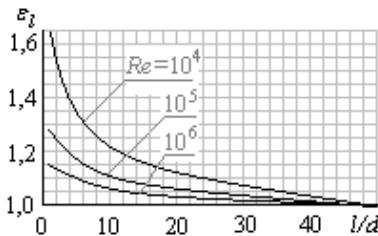
Для переходного режима течения ($2300 \leq Re \leq 10000$) используют критериальное уравнение следующего вида:

$$Nu \approx 0,001 Re^{1,2} .$$

При турбулентном течении жидкостей и газов в прямых трубах, когда $Re > 10^4$ и $0,6 < Pr < 100$

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \epsilon_{\psi} \cdot \epsilon_i \quad (2.5.8)$$

Здесь определяющие параметры: диаметр трубы d (или эквивалентный диаметр $d_s = 4 \cdot S / \Pi$ для труб некруглого поперечного сечения площадью S и «смоченным» периметром Π), температура потока $t_{ж}$ и его скорость V .



Поправочный множитель ϵ_i , учитывающий влияние начального участка на среднее значение коэффициента теплоотдачи при турбулентном режиме, находят по графику.

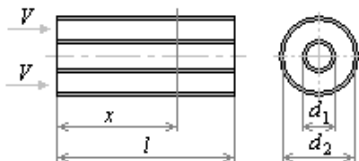
Поправочный множитель ϵ_{ψ} определяют по зависимостям, приведенным в следующей таблице.

Среда	Условие	Формула
Газы	$0,5 < T_c / T_{жс} < 0,9$	$\epsilon_{\psi} = 1,27 - 0,27 T_c / T_{жс}$
	$0,9 < T_c / T_{жс} < 1,1$	$\epsilon_{\psi} = 1$
	$1,1 < T_c / T_{жс} < 3,5$	$\epsilon_{\psi} = (T_c / T_{жс})^{0,55}$
Жидкости	$T_c / T_{жс} < 0,9$ и $T_c / T_{жс} > 1,1$	$\epsilon_{\psi} = (Pr_{жс} / Pr_c)^{0,25}$
	$0,9 < T_c / T_{жс} < 1,1$	$\epsilon_{\psi} = 1$

Для турбулентного течения газов по каналам кольцевого сечения при $Re > 10^4$ используют следующую зависимость:

$$\frac{Nu_i}{Nu_{i\infty}} = 0,86 + 0,54 \cdot \left[\left(\frac{d_2 - d_1}{x} \right)^{0,4} \cdot \left(1 + 1,2 \cdot \frac{d_1}{d_2} \right) - 0,188 \cdot \frac{d_1}{d_2} \right], \quad (2.5.9)$$

где $Nu_i = \alpha_i \cdot (d_2 - d_1) \lambda$ — локальное значение критерия Нуссельта (при $i=1$ — для внутренней стенки канала, а при $i=2$ — для наружной стенки).



Предельные значения критериев Нуссельта $Nu_{i\infty}$ определяют для сечения x , расположенного на расстоянии большем длины термического начального участка ($x > l_{HT}$):

$$Nu_{1\infty} = Nu_{mp\infty} \cdot 0,86 \cdot \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-0,16} \cdot \xi;$$

$$Nu_{2\infty} = Nu_{mp\infty} \cdot \left[1 - 0,14 \cdot \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{0,6}\right],$$

где $Nu_{mp\infty}$ – предельное (при $\varepsilon_l = 1$) значение критерия Нуссельта для круглой трубы, рассчитанное по (2.5.8); $\xi = 1 + 7,5 \cdot \left[\frac{d_2/d_1 - 5}{Re} \right]^{0,6}$ при $d_1/d_2 < 0,2$ и $\xi = 1$ при $d_1/d_2 > 0,2$.

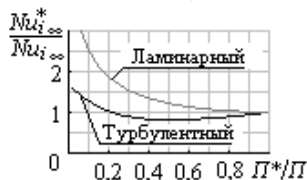
Уравнение (2.5.9) справедливо:

- при постоянных плотностях тепловых потоков вдоль внутренней и наружной стенок канала;

- для теплоотдачи от внутренней стенки (Nu_1) при $0,14 \leq d_1/d_2 \leq 1$;

- для теплоотдачи от наружной стенки (Nu_2) при $0 \leq d_1/d_2 \leq 1$;

- для сечения, находящегося на расстоянии x , измеренном от входа в кольцевой канал, соответствующему условию $1 \leq x / (d_2 - d_1) \leq 15 \cdot (1 + 1,2 \cdot d_1/d_2)$.



Для расчета предельных значений критериев Нуссельта $Nu_{i\infty}^*$ при течении газа в каналах с необогреваемой частью периметра используют график, на котором по оси абсцисс откладывают отношение обогреваемой части периметра поперечного сечения канала Π^* к «смоченному» периметру Π .

Описание экспериментальной установки

Объектом исследования является вертикальный кольцевой канал, образованный трубой 1, внутри которой находится электрический нагреватель 2, и цилиндрическим кожухом 3. Размеры канала: длина $l = 0,6$ м, внутренний диаметр $d_1 = 0,036$ м и наружный диаметр $d_2 = 0,15$ м.

В нижней части кожуха установлен вентилятор 4, который создает вынужденное движение воздуха. Вентилятор к сети подключен с помощью преобразователя напряжения 5, предназначенного для регулирования скорости вращения двигателя вентилятора.

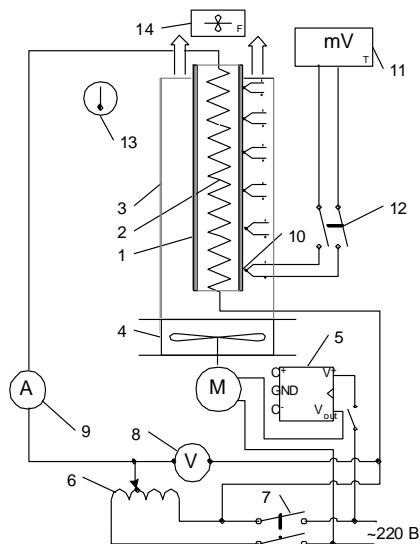


Рис. 2.5.2. Схема экспериментальной установки

Регулирование мощности электрического нагревателя осуществляют лабораторным автотрансформатором 6 (ЛАТРом), который связан с сетью переменного тока напряжением 220 вольт с помощью сетевого выключателя 7. Тепловой поток, создаваемый нагревателем, равен его электрической мощности. Для его определения в цепи нагревателя установлены вольтметр 8 и амперметр 9.

Измерение температуры внешней поверхности трубы 1 производят шестью термопарами 10, расположенными равномерно по ее длине. Электродвижущая сила, развиваемая термопарами, измеряется милливольтметром 11, шкала которого проградуирована в °С. Поочередное подключение термопар к милливольтметру производят переключателями 12.

Температуры окружающей среды и воздуха, выходящего из канала, измеряют жидкостным термометром 13.

Анемометр 14 используют для определения скорости движения воздуха в канале.

Методика проведения эксперимента

1. Подключить сетевым переключателем 7 установку к сети. Включение производить под наблюдением преподавателя.

2. ЛАТРом 6 установить рекомендуемый режим нагрева (напряжение в цепи нагревателя не выше 150 вольт).

3. Дождаться наступления стационарного теплового режима (ориентировочно он наступает через 20–30 минут после включения установки). При стационарном тепловом режиме показания термомпар не меняются с течением времени.

4. Провести измерения:

- напряжения (вольтметром 8) и силы тока (амперметром 9) в цепи нагревателя;

- температуры поверхности трубы в N точках, подключая последовательно термомпары 10 к милливольтметру 11 с помощью переключателей 12;

- температуры воздуха в помещении (термометром 13).

Полученные значения занести в протокол экспериментальных данных.

5. Включить вентилятор 4 и преобразователем напряжения 5 установить максимальную частоту его вращения.

6. Дождаться стационарного режима, определив его наступление по прекращению изменения температуры, измеряемой термомпарой 10.

7. Провести измерения:

- напряжения (вольтметром 8) и силы тока (амперметром 9) в цепи нагревателя;

- температуры поверхности трубы в N точках, подключая последовательно термомпары 10 к милливольтметру 11 с помощью переключателей 12;

- температуры воздуха в помещении (термометром 13);

- температуры воздуха на выходе из кольцевого канала (термометром 13);

- скорости движения воздуха в выходном сечении кольцевого канала (анемометром 14).

Полученные значения занести в протокол экспериментальных данных.

8. Преобразователем напряжения 5 уменьшить частоту вращения вентилятора.

9. Повторить пункты 6 и 7.

Обработка экспериментальных данных

1. Определить тепловой поток, создаваемый нагревателем,

$$Q = U \cdot I, \text{ Вт.}$$

2. Рассчитать среднее значение температуры теплоотдающей поверхности

$$t_c = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где N – число термомпар, используемых для определения температуры.

3. Вычислить долю теплового потока, передаваемого в окружающую среду излучением,

$$Q_u = c_{np} \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт},$$

где c_{np} – приведенный коэффициент излучения тела [для используемой в работе трубы $c_{np} = 1,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$]; T_c и $T_{жс}$ – соответственно, абсолютные температуры поверхности тела и окружающей среды, К; F – площадь теплоотдающей поверхности трубы (площадь боковой поверхности цилиндра), м^2 .

4. Найти значение теплового потока, отдаваемого среде путем конвективного теплообмена

$$Q_k = Q - Q_u, \text{ Вт}.$$

5. Определить средний коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Q_k}{F \cdot (t_c - t_{жс})}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

6. Рассчитать по (2.5.3), (2.5.4), (2.5.5) и (2.5.6) значения критериев Нуссельта Nu , Рейнольдса, Грасгофа и Прандтля. Физические параметры воздуха ν , λ и a , входящие в эти формулы, берут из таблиц физических свойств воздуха при средней температуре воздуха

$$t_{жс} = (t_c + t_{жс})/2,$$

где $t_{жс} = (t_{жс}^{вх} + t_{жс}^{вых})/2$ – среднее арифметическое между значениями температур воздуха на входе и выходе из канала.

Температурный коэффициент объемного расширения воздуха равен

$$\beta = \frac{1}{t_{жс} + 273,15}, \text{ К}^{-1}.$$

7. Определить режим движения воздуха по каналу и соответствующее режиму критериальное уравнение. Рассчитать по нему значение критерия Nu .

8. Вычислить относительную погрешность критериального уравнения для условий опыта

$$\delta = \left| \frac{Nu - Nu_э}{Nu_э} \right| \cdot 100\%.$$

9. Определить максимально возможную относительную ошибку при использовании установленных приборов (приборную погрешность)

$$\gamma = \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta t_c + \Delta t_{жс}}{t_c - t_{жс}} \right) \cdot 100, \%$$

где знаком Δ с последующим буквенным символом обозначены максимальные отклонения контролируемых параметров. Их определяют по классам точности приборов K и максимумам их шкал. Например:

$$\Delta I = 0,01 \cdot K_I \cdot I_{max}.$$

Для приборов, на которых отсутствует класс точности, максимальные отклонения измеряемого параметра считают равными половине цены деления. Например, для жидкостного термометра с ценой деления 1°C

$$\Delta t_{жс} = 0,5^\circ\text{C}.$$

Таблица 2.5.3

Протокол экспериментальных и расчетных данных

№ п/п	Наименование параметра	№опыта			
		1	2	3	4
1	Время				
2	Напряжение U , В				
3	Сила тока I , А				
4	Температура поверхности в i -й точке t_{ci} , $^\circ\text{C}$	1			
		2			
		3			
		4			
		5			
		6			
5	Средняя температура поверхности трубы t_c , $^\circ\text{C}$				
6	Температура воздуха в помещении $t_{ж}^{вх}$, $^\circ\text{C}$				
7	Температура воздуха на выходе их канала $t_{ж}^{вых}$, $^\circ\text{C}$				
8	Тепловой поток, создаваемый нагревателем Q , Вт				
9	Тепловой поток, передаваемый излучением $Q_{и}$				
10	Конвективный тепловой поток $Q_{к}$, Вт				
11	Средний коэффициент теплоотдачи α , Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$)				

12	Критерий Нуссельта Nu_s				
13	Критерий Рейнольдса Re				
14	Критерий Грасгофа Gr				
15	Критерий Прандтля Pr				
16	Расчетное значение критерия Нуссельта Nu				
17	Относительная погрешность критериального уравнения δ , %				
18	Приборная погрешность γ , %				

Контрольные вопросы

1. Какой процесс называют конвективным теплообменом?
2. Сформулируйте основной закон теплоотдачи.
3. Какую величину называют коэффициентом теплоотдачи и какие факторы оказывают на нее влияние?
4. Какое движение называют свободным?
5. Что называют критерием подобия?
6. Какой процесс называют вынужденной конвекцией?
7. Какой режим называют установившимся?
8. Что понимают под понятиями «определяющий размер» и «определяющая температура»?
9. Какие критерии используют для описания процесса вынужденной конвекции?
10. Какой вид имеют критерии Нуссельта, Рейнольдса, Грасгофа, Прандтля и какой у них физический смысл?
11. Что представляет собой критериальное уравнение процесса вынужденной конвекции?
12. Какая величина использовалась в качестве определяющего размера в данной работе?
13. Какую размерность имеет коэффициент теплоотдачи?

2.6. Исследование процесса теплообмена при кипении

Цель работы: экспериментальное исследование процесса пузырькового кипения и сравнение результатов опыта с данными, приводимыми в учебной и научной литературе.

Основы теории

Кипением называется процесс образования пара, происходящий в объеме жидкости, температура которой выше температуры насыщения. Процесс кипения сопровождается образованием паровых объемов в виде пузырьков или сплошной пленки. На практике наиболее часто встречается кипение жидкости на твердой поверхности теплообмена, через которую подводится тепловая энергия.

Процесс кипения является частным случаем конвективного теплообмена, в котором происходит дополнительный перенос массы вещества и теплоты паровыми пузырями от поверхности нагрева в объем жидкости.

Для кипения необходим перегрев жидкости выше *температуры насыщения*. Зависимость плотности теплового потока от температурного напора при кипении называют кривой кипения (рис. 2.6.1).

На обогреваемой поверхности зарождение паровых пузырьков происходит в микроскопических впадинах, на поверхности микроскопических пузырьков газа, на микрочастицах пыли и других инициаторах процесса парообразования

Различают два основных режима кипения: пузырьковый и пленочный. Во втором случае множество пузырьков, образующихся на поверхности нагрева, сливается в сплошную паровую пленку, при этом интенсивность кипения существенно снижается. Между пузырьковым и пленочным режимами кипения при определенных условиях подвода теплоты (например, при обогреве поверхности конденсирующимся паром) может иметь место переходный режим. Для него характерно наличие областей как с пузырьковым кипением, так и с пленочным.

Тепловой поток, затрачиваемый на образование пара при кипении, рассчитывают по уравнению

$$Q'' = r \cdot G, \text{ Вт,}$$

где r – *теплота парообразования*, Дж/кг; G – масса пара, образующегося при кипении в единицу времени, кг/с.

Тепловой поток Q'' возрастает при увеличении температурного напора $\Delta t = t_c - t_s$, зависящего от температур поверхности нагрева t_c и кипящей жидкости t_s .

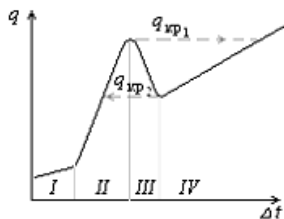


Рис. 2.6.1. Кривая кипения
Режимы: I – свободная конвекция; II – пузырьковый; III – переходный; IV – пленочный

Пузырьковый режим кипения наблюдается при значении плотности теплового потока $q = Q''/F_c$, меньшей предельного (критического) значения, которое называют *первой критической плотностью теплового потока*. Превышение критического значения приводит к кризису кипения первого рода – к очень быстрой смене пузырькового режима кипения пленочным режимом. Результатом этого является значительный разогрев теплоотдающей поверхности, который часто приводит к разрушению (пережогу) технологического оборудования.

При кипении жидкостей в большом объеме значение критической плотности теплового потока рассчитывают по формуле С.С. Кутателадзе

$$q_{кр1} = 0,14 \cdot r \cdot \sqrt{\rho''} \cdot \sqrt[4]{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'')}, \text{ Вт/м}^2,$$

где r – теплота парообразования, Дж/кг; ρ' и ρ'' – плотности насыщенной жидкости и сухого насыщенного пара, соответственно, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м.

Обычно при проведении теплотехнических расчетов определяют запас до кризиса кипения первого рода

$$\psi = \frac{q_{кр1}}{q},$$

который позволяет судить о степени надежности работы теплоэнергетического оборудования.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 2.6.2) состоит из вертикально расположенной толстостенной стеклянной трубы 1, наружный диаметр которой равен 44 мм, а внутренний – 38 мм, с обоих концов закрытой специальными заглушками 2. Труба заполнена нагреваемой жидкостью, уровень которой контролируется мерной линейкой 5.

В объеме жидкости помещен электрический нагревательный элемент 3 в виде спирали. Термометр 4 предназначен для измерения температуры среды. Питание нагревателя производится от сети переменного тока напряжением 220 В через выключатель 12 и лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 11, который обеспечивает регулирование напряжения, подаваемого через переключатель 7 к вилочному разъему 6. Измерение напряжения и силы тока осуществляется вольтметром 9 и амперметром 10.

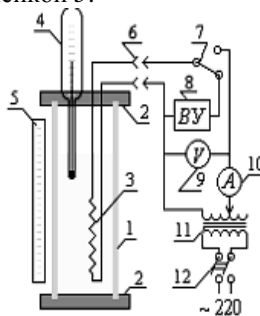


Рис. 2.6.2. Схема экспериментальной установки

Определение температуры поверхности нагревателя t_c производится косвенным методом, который основан на измерении электрического сопротивления R_c спирали и использовании известной зависимости $t_c = f(R_c)$.

Для определения сопротивления нагревательного элемента к нему периодически через переключатель 7 подключается универсальный вольтметр типа В7-21А.

Методика проведения эксперимента

Включение установки в сеть выключателем 12 (рис. 2.6.2) осуществляется под наблюдением преподавателя или лаборанта. По рекомендации преподавателя устанавливается тепловой режим (задается значение напряжения, которое регулируется при помощи ЛАТРа 11).

Длительность проведения эксперимента τ контролируется с помощью секундомера, при этом измеряется время, в течение которого продолжается процесс кипения (оно должно быть не менее 20–25 минут).

Момент начала процесса кипения устанавливается визуально при условии интенсивного образования и отрыва паровых пузырей от поверхности нагрева (спирали).

Перед началом эксперимента фиксируется начальный уровень жидкости $H1$ по мерной линейке 5. В конце эксперимента после отключения установки от сети определяется уровень $H2$ оставшейся жидкости. Изменение уровня позволяет рассчитать количество испарившейся жидкости.

Данные измерений при пузырьковом режиме кипения заносят в протокол наблюдений. Они включают в себя: напряжение U (показания вольтметра 9), силу тока I (показания амперметра 10), температуру кипящей воды t_s (показания термометра 4), измеряемую через каждые 5 минут.

Определение температуры поверхности нагрева производят косвенным методом посредством измерения сопротивления спирали нагревателя R_c . Для этого к ней через каждые 5 минут переключателем 7 подключают универсальный вольтметр 8.

После завершения эксперимента выключателем 12 установка отключается от сети.

Обработка экспериментальных данных

Перед обработкой данных эксперимента необходимо подготовить протокол, в который должны быть занесены результаты наблюдений и расчетные параметры.

Таблица 2.6.1

Протокол результатов наблюдений и расчетов

№ п/п	Параметры	№ замера				
		1	2	3	4	5
1	Длительность процесса кипения τ , с					
2	Сила тока, I , А					
3	Напряжение, U , В					
4	Начальный уровень жидкости $H1$, мм					
5	Конечный уровень жидкости, $H2$, мм					
6	Массовый расход пара G , кг/с					
7	Тепловая мощность нагревателя Q , Вт					
8	Мощность процесса парообразования, Q'' , Вт					
9	Сопротивление R_c , Ом					
10	Температура спирали t_c , °С					
11	Температура воды t_s , °С					
12	Температурный напор, Δt , °С					
13	Плотность теплового потока в опыте q , Вт/м ²					
14	То же по графику q^* , Вт/м ²					
15	Критическая плотность теплового потока, $q_{кр}$					
16	Запас до кризиса ψ					
17	Относительная погрешность измерения δ , %					

1. Расход пара, получаемого при кипении воды:

$$G = \frac{F \cdot \rho' \cdot (H1 - H2)}{\tau},$$

где F – площадь поперечного сечения трубки, заполненной водой, м²; ρ' – плотность воды при температуре насыщения кг/м³; $H1$ и $H2$ – начальный и конечный уровни жидкости, м; τ – продолжительность процесса кипения, с.

2. Тепловая мощность нагревателя

$$Q = U \cdot I.$$

3. Тепловая мощность, затрачиваемая на испарение воды

$$Q'' = G \cdot r,$$

где r – теплота парообразования (при температуре кипения $t_s = 100^\circ\text{C}$ теплота парообразования $r = 2257$ кДж/кг).

4. Плотность теплового потока по результатам эксперимента

$$q = \frac{Q''}{F_c},$$

где $F_c = 6,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ – площадь теплоотдающей поверхности (спирали).

5. Температура t_c определяется по нормативной характеристике

$$t_c = 110 - \sqrt{q - 21},$$

6. При расчете температурного напора $\Delta t = \bar{t}_c - \bar{t}_s$ используют осредненные значения температур жидкости и стенки:

$$\bar{t}_s = \frac{\sum_{i=1}^n t_{si}}{n}; \quad \bar{t}_c = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ci}}{n},$$

где n – количество замеров параметра за период проведения опыта.

7. Относительная экспериментальная погрешность измерений определяется по формуле

$$\delta = \left| \frac{q - q^*}{q^*} \right| \cdot 100, \%,$$

где q^* – значение плотности теплового потока, определенное по графику (рис. 2.6.3).

8. Критическая плотность теплового потока:

$$q_{кр1} = 0,14 \cdot r \cdot \sqrt{\rho''} \cdot \sqrt[4]{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'')},$$

где ρ'' – плотность паров воды ($\rho'' = 0,597$ кг/м³); σ – поверхностное натяжение воды ($\sigma = 5,89 \cdot 10^{-2}$ Н/м).

9. Коэффициент, характеризующий запас до кризиса кипения:

$$\psi = \frac{q_{кр1}}{q}.$$

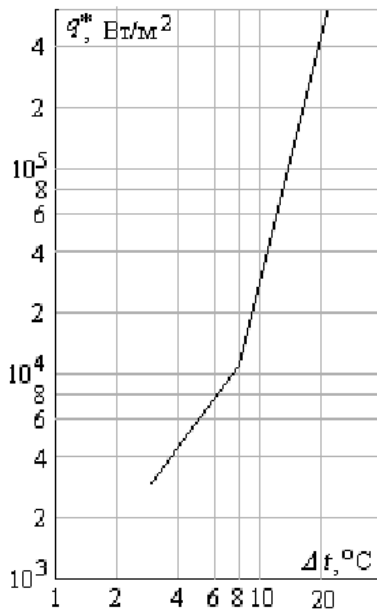


Рис. 2.6.3. Зависимость плотности теплового потока от температурного напора при кипении

Контрольные вопросы

1. Что называют кипением жидкостей?
2. Какие существуют режимы кипения?
3. Какие условия необходимы для осуществления процесса кипения?
4. Что служит центрами парообразования?
5. Как определить тепловую энергию, расходуемую на образование пара?
6. Что называют температурным напором? От чего он зависит?
7. Что называют кризисом кипения первого рода?
8. Объясните назначение основных элементов экспериментальной установки.
9. В чем сущность косвенного метода определения температуры нагревателя?
10. Приведите примеры теплотехнических устройств, в которых происходят процессы кипения.
11. При каких условиях наблюдается переходный режим кипения?

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Абсолютным называют давление, отсчитываемое от абсолютного вакуума.

Абсолютной называют *температуру*, значение которой определяют по шкале Кельвина. За начало отсчета этой шкалы принято состояние вещества, при котором средняя скорость поступательного движения молекул равна нулю.

Абсолютной влажностью воздуха называют массу водяного пара, содержащегося в одном кубическом метре влажного воздуха.

Адиабатный процесс – термодинамический процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой.

Влагосодержанием называют массу водяного пара, приходящуюся на один килограмм сухого воздуха.

Влажным воздухом называют смесь сухого воздуха с водяным паром, а в наиболее общем случае – с водяным паром, мельчайшими каплями воды и кристаллами льда.

Вынужденным называют движение среды, возникающее под действием внешних источников (часто источниками движения являются насосы и вентиляторы).

Гидродинамическим пограничным слоем называют пристенный слой среды, в пределах которого происходит изменение скорости потока от значения на стенке тела до скорости невозмущенного потока.

Градиентом температур называют предел отношения изменения температуры между изотермическими поверхностями к расстоянию между ними, при условии, что это расстояние стремится к нулю:

$$\text{grad } \Theta = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n}.$$

Градиент температур – это вектор, направленный в сторону увеличения температуры.

Идеальным называют газ, в котором отсутствуют силы взаимного притяжения и отталкивания между молекулами, а размерами молекул можно пренебречь, по сравнению с размерами термодинамической системы.

Изобарный процесс – термодинамический процесс, происходящий при постоянном давлении.

Изотермический процесс – термодинамический процесс, происходящий при постоянной температуре.

Изотермической называют поверхность, в различных точках которой температуры одинаковы.

Изохорный процесс – термодинамический процесс, происходящий при постоянном объеме.

Истинная теплоемкость представляет собой отношение количества теплоты (δQ), полученной веществом при бесконечно малом изменении его состояния, к изменению температуры тела (dT) в данном процессе.

Кипением называется процесс образования пара, происходящий в объеме жидкости, температура которой выше температуры насыщения.

Конвективным теплообменом, или *теплоотдачей*, называют процесс переноса тепловой энергии между поверхностью твердого тела и теплоносителем (жидкостью или газом), который сопровождается движением их относительно друг друга.

Теплоотдачу в условиях свободного движения называют *свободной конвекцией*, а в условиях вынужденного движения – *вынужденной конвекцией*.

Коэффициент теплопроводности – это теплофизический параметр, который характеризует способность материала проводить теплоту. Он численно равен количеству тепловой энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности при градиенте температур, равном единице,

$$\lambda = \frac{E_Q}{\tau \cdot F \cdot \text{grad } t} \rightarrow \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность конвективного теплообмена и численно равен тепловому потоку, проходящему через единицу площади теплоотдающей поверхности при разности температур между поверхностью и средой в один градус, т.е.

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot (t_{\text{ж}} - t_{\text{ср}})} \rightarrow \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Критериальным уравнением называют уравнение, связывающее между собой критерии подобия.

Критерием (числом) подобия называют безразмерный комплекс, составленный из величин, характеризующих рассматриваемое явление.

Критерий Грасгофа $Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2}$ – характеризует соотношение подъемной силы, возникающей вследствие теплового расширения жидкости, и сил вязкого трения в потоке.

Критерий Нуссельта $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$ – представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи и характеризует соотношение термических сопротивлений теплоотдачи и теплопроводности в тепловом пограничном слое.

Критерий Прандтля $Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$ – характеризует соотношение толщин теплового и гидродинамического пограничных слоев, возникающих в результате теплообмена тела с потоком движущейся среды.

Критерий Рейнольдса $Re = \frac{V \cdot l}{\nu}$ – характеризует соотношение сил инерции и вязкого трения в потоке жидкости.

Ламинарным называют режим, при котором жидкость движется упорядоченно, слоями, не смешивающимися друг с другом.

Линейной плотностью теплового потока (удельным тепловым потоком с единицы длины трубы) называют отношение теплового потока к длине l изотермической поверхности цилиндрической формы

$$q_l = \frac{Q}{l}, \text{ Вт/м.}$$

Насыщенным влажным воздухом называют смесь сухого воздуха с насыщенным водяным паром.

Ненасыщенным влажным воздухом называют смесь сухого воздуха с перегретым водяным паром.

Насыщенным называют пар, находящийся в термодинамическом равновесии с жидкостью, из которой он получен.

Нестационарным называют поле температур, которое изменяется с течением времени. Оно описывается уравнением следующего вида

$$t = f(x, y, z, \tau).$$

Относительной влажностью воздуха (φ) называют отношение его действительной абсолютной влажности к максимально возможной абсолютной влажности при данной температуре влажного воздуха.

Парциальным называют давление, которое создает данный компонент смеси газов на стенки сосуда, в котором он находится.

Первой критической плотностью теплового потока называют максимальную плотность теплового потока при пузырьковом режиме кипения.

Плотностью теплового потока называют отношение теплового потока к площади изотермической поверхности F , через которую он проходит

$$q = \frac{Q}{F}, \text{ Вт/м}^2.$$

Политропный процесс – термодинамический процесс, происходящий при постоянной теплоемкости.

Свободным называют движение, возникающее вследствие разности плотностей нагретых и холодных элементарных объемов среды в гравитационном поле.

Состоянием насыщения называют состояние, при котором пар находится в термодинамическом равновесии с жидкостью, из которой он получен.

В состоянии насыщения температура и давление взаимосвязаны и их называют *температурой насыщения* и *давлением насыщения*, соответственно.

Средней теплоемкостью называют отношение количества теплоты (Q_{1-2}), подведенной к телу и вызвавшее изменение его параметров состояния на конечную величину, к изменению температуры тела (t_2-t_1) в этом процессе.

Стационарным называют поле температур, которое не изменяется с течением времени. В уравнении стационарного поля температур отсутствует время: $t = f(x, y, z)$.

В соответствии с размерностью пространства, в котором наблюдается изменение температур, различают *трех-, двух- и одномерные температурные поля*.

Температурным полем называют значения температур в различных точках пространства в данный момент времени.

Теория подобия – это учение о подобии явлений.

Тепловой изоляцией называют любое покрытие поверхности, которое снижает потери теплоты в окружающую среду, либо уменьшает теплопритоки в изолируемую область.

Тепловым пограничным слоем называют пристенный слой среды, в пределах которого происходит изменение температуры от значения на стенке тела до температуры невозмущенного потока.

Тепловым потоком называют количество тепловой энергии E_Q , проходящей в единицу времени τ через изотермическую поверхность

$$Q = \frac{E_Q}{\tau}, \text{ Вт.}$$

Теплоемкостью называют теплофизическую характеристику вещества, устанавливающую количественное соотношение между теплотой, переданной в термодинамическом процессе, и изменением температуры рабочего тела.

Теплоемкость зависит от рода материала, температуры и давления и условий протекания термодинамического процесса (теплоемкость, определенную в изобарном процессе, называют изобарной теплоемкостью C_p , в изохорном процессе – изохорной теплоемкостью C_v , в политропном процессе – политропной теплоемкостью C_n).

Теплотой парообразования называют теплоту, необходимую для превращения одного килограмма насыщенной жидкости в сухой насыщенный пар.

Термическое сопротивление.

Уравнения теплопроводности, теплоотдачи и теплопередачи можно представить единым образом:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_1 - t_2) = \frac{(t_1 - t_2)}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{\Delta t}{R_\lambda};$$
$$q = \alpha \cdot (t_{ж1} - t_{ж2}) = \frac{(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha}} = \frac{\Delta t}{R_\alpha};$$
$$q = k \cdot (t_{ж1} - t_{ж2}) = \frac{(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{k}} = \frac{\Delta t}{R_m}.$$

По структуре итоговая форма этих уравнений аналогична закону Ома

$$i = \frac{\Delta u}{R}.$$

Это послужило предпосылкой к разработке теории электро-тепловой аналогии, в которой плотность теплового потока рассматривается в качестве аналога плотности тока, разность температур – разности электрических потенциалов, а величины, стоящие в знаменателях уравнений переноса теплоты (R_λ , R_α и R_m), – сопротивления. На основании этого возникли следующие термины:

- $R_\lambda = \frac{\delta}{\lambda}$ – *термическое сопротивление* теплопроводности;
- $R_\alpha = \frac{1}{\alpha}$ – *термическое сопротивление* теплоотдачи;
- $R_m = \frac{1}{k}$ – *термическое сопротивление* теплопередачи.

В задачах с поверхностями цилиндрической формы для термических сопротивлений используют следующие выражения:

$$R_{l\lambda} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right);$$
$$R_{l\alpha} = \frac{1}{\alpha \cdot d};$$
$$R_{lm} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{n+1}}.$$

Термодинамическим процессом называют совокупность состояний термодинамической системы, в которых она находится при переходе из одного равновесного состояния в другое.

Турбулентным называют режим, при котором в потоке присутствуют вихри, перемешивающие жидкость.

Между ламинарным и турбулентным режимами наблюдается переходная область.

Границы режимов размыты. Критические значения признаков, по которым определяют режим течения, зависят от формы поперечного сечения потока (или обтекаемого тела), вида движения (свободное или вынужденное) и наличия теплообмена.

Удельный объем – это объем, который занимает единица массы вещества.

Удельной массовой теплоемкостью [c , Дж/(кг·К)] называют отношение теплоемкости вещества к его массе.

Удельной мольной теплоемкостью [μc , Дж/(моль·К)] называют отношение теплоемкости вещества к числу молей вещества.

Удельной объемной теплоемкостью [c' , Дж/(м³·К)] называют отношение теплоемкости вещества к объему, который оно занимает при нормальных физических условиях.

Удельной энтальпией влажного воздуха называют энтальпию влажного воздуха, рассчитанную для одного килограмма сухого воздуха и d килограммов водяного пара, содержащегося в нем, т.е. для массы равной $(1+d)$ килограммов влажного воздуха.

П.1. Ошибки измеряемой величины

При экспериментальном определении теплофизических свойств веществ обычно используют приборы для измерения температуры, давления, массы вещества, силы тока, напряжения и т.д., а определяемые теплофизические величины – удельный объем, энтальпию, теплоемкость и т.д. – рассчитывают по соответствующим формулам.

Например, изобарная теплоемкость вычисляется по формуле:

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot (t_2 - t_1)} \quad (\text{П.1})$$

где Q – количество теплоты, подведенной к рабочему телу, Дж; m – масса рабочего тела, кг; $(t_2 - t_1)$ – изменение температуры вследствие подвода теплоты, К. Все перечисленные величины измеряются непосредственно в опыте.

Так как измерения величин, входящих в правую часть уравнения (П.1), осуществляются с погрешностью, то и получаемое в результате расчета интересующее нас значение также не является абсолютно верным. Это означает, что окончательный результат экспериментального определения искомой характеристики, выраженный конкретным числом, содержит некоторую ошибку.

Чаще всего с понятием “точность экспериментальных данных” связывают величину максимально возможной ошибки (утверждение, что точность полученных значений изобарной теплоемкости 0,2 % означает, что величина максимально возможной ошибки в этих данных не превосходит 0,2 %).

Источниками ошибок экспериментальных данных являются: погрешности приборов, используемых при измерениях, несовершенство методики измерений, недостаточно строгое поддержание требуемого режима во время опыта, а также отдельные ошибки самого экспериментатора при работе на установке.

Ошибки измерения принято делить на систематические и случайные.

К *систематическим ошибкам* относят такие, которые получаются всегда на данной установке; они всегда имеют одну и ту же величину и в окончательный результат измерений вносят одну и ту же погрешность. К ним относят ошибки приборов, методик измерений и обработки данных.

Систематические ошибки лучше всего могут быть обнаружены при сравнении экспериментальных данных, полученных на различных уста-

новках. Некоторые из них могут быть устранены, а другие устранить невозможно на данном этапе развития науки и техники.

Случайные ошибки проявляются в так называемом разбросе экспериментальных данных. Это означает, что при многократном измерении одной и той же величины на одной и той же установке и с теми же приборами получаются несколько отличающиеся друг от друга значения.

Влияние случайных ошибок на окончательный результат можно значительно снизить, многократно повторяя измерения и выбирая в качестве окончательного среднее значение из многих полученных.

Максимально возможная ошибка одного измерения

Необходимо выяснить, как влияют ошибки измерения отдельных параметров на искомую величину, определяемую при помощи формулы.

Пусть искомая величина W является функцией нескольких параметров, измеряемых непосредственно в опыте:

$$W = f(x, y, z) . \quad (\text{П2})$$

Если бы ошибки в измерениях величин x, y, z были бесконечно малы (dx, dy, dz), то ошибка величины W определялась бы ее полным дифференциалом:

$$dW = \frac{\partial W}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial W}{\partial y} \cdot dy + \frac{\partial W}{\partial z} \cdot dz . \quad (\text{П3})$$

В действительности погрешности в измерениях величин x, y, z не будут бесконечно малы, однако для расчета величины ошибки можно воспользоваться аналогичной формулой, подставляя вместо dx, dy, dz действительные конечные величины ошибок $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, так как ошибки измерений малы по сравнению с самими измеряемыми величинами.

Это справедливо в том случае, если функция может быть представлена в виде ряда Тейлора, ограниченного слагаемыми, включающими только первые производные, т.е. в предположении, что отбрасываемые члены ряда оказывают существенно меньшее влияние на результат.

На основании вышесказанного получаем максимально возможную абсолютную ошибку искомой величины:

$$\Delta W = \left| \frac{\partial W}{\partial x} \cdot \Delta x \right| + \left| \frac{\partial W}{\partial y} \cdot \Delta y \right| + \left| \frac{\partial W}{\partial z} \cdot \Delta z \right| , \quad (\text{П4})$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – абсолютные ошибки в измерениях величин x, y, z .

По формуле (П4) вычисляют максимально возможную ошибку, поэтому все ее слагаемые берут по абсолютной величине. В действительности при проведении измерений ошибка может быть значительно меньшей, так как входящие в (П4) слагаемые могут иметь различные знаки, однако расчет ведут, полагаясь на наихудший вариант.

Часто требуется найти максимально возможную *относительную ошибку*, т.е. отношение абсолютной ошибки к действительному значению той же величины

$$\delta W = \frac{\Delta W}{W} . \tag{П5}$$

Когда вид функции, связывающей искомую зависимую величину с независимыми первичными (измеряемыми) величинами, известен, на основании общей формулы (П5) для определения относительной погрешности можно получить частные зависимости. Наиболее распространенные из них представлены в приведенной ниже таблице.

Для определения максимально возможной относительной ошибки искомой величины W в формулы таблицы в качестве δx , δy , δz , необходимо подставлять систематические ошибки, определяемые классом точности приборов. Например

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x} = \frac{0,01 \cdot \text{Кл.т} \cdot x_{\max}}{x} ,$$

где Δx – максимальная абсолютная ошибка величины x ; Кл.т – класс точности прибора; x_{\max} – максимальное значение величины x , измеряемое прибором (предел шкалы измерения данного прибора).

Определение относительной погрешности

Расчетная формула искомой величины	Формула для определения максимально возможной относительной ошибки
$W = A \cdot x^\alpha \cdot y^\beta \cdot z^\gamma \cdot \dots$	$\delta W = \alpha \cdot \delta x + \beta \cdot \delta y + \gamma \cdot \delta z + \dots$
$W = A \cdot x \pm B \cdot y \pm C \cdot z \pm \dots$	$\delta W = \left \frac{A \cdot x}{W} \cdot \delta x \right + \left \frac{B \cdot y}{W} \cdot \delta y \right + \left \frac{C \cdot z}{W} \cdot \delta z \right + \dots$
$W = A \cdot \frac{x \cdot y}{z \pm v}$	$\delta W = \delta x + \delta y + \left \frac{z}{z \pm v} \cdot \delta z \right + \left \frac{v}{z \pm v} \cdot \delta v \right $
$W = \frac{A \cdot x \pm B \cdot y}{C \cdot z \pm D \cdot v}$	$\delta W = \left \frac{A \cdot x}{A \cdot x \pm B \cdot y} \cdot \delta x \right + \left \frac{B \cdot y}{A \cdot x \pm B \cdot y} \cdot \delta y \right + \left \frac{C \cdot z}{C \cdot z \pm D \cdot v} \cdot \delta z \right + \left \frac{D \cdot v}{C \cdot z \pm D \cdot v} \cdot \delta v \right $
$W = A \cdot e^{\alpha \cdot x}$	$\delta W = \alpha \cdot x \cdot \delta x$
$W = A \cdot \ln \left(\dots \right)$	$\delta W = \frac{1}{\ln \left(\dots \right)} \cdot \delta x$

В таблице приняты следующие обозначения:

$A, B, C, D, \alpha, \beta, \gamma, \zeta$ – численные коэффициенты;

x, y, z, v – величины, непосредственно измеряемые в опыте;

$\delta x, \delta y, \delta z, \delta v$ – относительные ошибки измеряемых величин;

δW – максимально возможная относительная ошибка искомой величины.

Для приборов, у которых отсутствует класс точности, в качестве абсолютной ошибки берут величину, равную половине цены деления шкалы прибора. Примером такого прибора является жидкостный термометр.

Повышение точности и вычисление вероятной ошибки при многократных измерениях

В случае проведения многократных измерений искомой величины при одних и тех же параметрах процесса случайные ошибки проявляются в виде разброса получаемых данных.

При проведении нескольких измерений вполне естественно наиболее достоверным результатом считать среднеарифметическую величину из всех измерений. Такое усреднение уменьшает влияние случайных ошибок, которые в разных сериях опытов приводят как к положительным, так и к отрицательным искажениям истинного значения.

$$\bar{W} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n W_i, \quad (\text{П6})$$

где n – число реализаций (повторений опытов); W_i – значение измеряемого параметра в i -м опыте.

Абсолютную, случайную ошибку при нескольких измерениях (среднеквадратичное отклонение) вычисляют по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (\text{П7})$$

Из формулы следует, что при увеличении числа повторений опытов абсолютная, случайная ошибка уменьшается (особенно быстро при увеличении n от 2 до 10).

П.2. Инструкция по работе с прибором ЭТП-М

Термометр ЭТП-М предназначен для измерения температуры металлических поверхностей, неагрессивных жидкостей и газов.

Диапазон измерения – $30 \div 120^\circ\text{C}$.

Класс точности – 2,5.

Показатель тепловой инерции – 250 с.

Питание постоянным током – 6 В.

Измерение температуры термометром осуществляется по методу неуравновешенного одинарного моста постоянного тока.

Порядок работы

1. Повернуть ручку «Регулировка напряжения» против часовой стрелки.
2. Установить переключатель «Пределы °С» на требуемый предел измерения температуры.
3. Установить тумблер «Питание» в положение «Вкл.».
4. Ручкой «Регулировка напряжения» стрелку термометра установить на конечную отметку соответствующего предела.
5. Установить тумблер в положение «Измер.».
6. По шкале термометра определить значение измеряемой температуры.
7. По окончании измерений выключить прибор тумблером «Питание».

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П-1

Психрометрическая таблица влажного воздуха

t_M , °C	Разность показаний сухого и влажного термометров в °C												
	0	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	100	91	85	71	59	48	39	30	23	17	10		
6	100	92	85	72	61	50	41	33	25	19	13		
7	100	92	86	73	62	52	43	35	28	22	15	10	
8	100	93	86	74	63	54	45	37	30	25	18	14	
9	100	93	86	75	65	55	47	39	32	27	21	17	
10	100	94	87	76	66	57	48	41	34	28	23	19	
11	100	94	88	77	76	58	50	43	36	30	25	20	
12	100	94	88	78	68	59	52	44	38	32	27	22	
13	100	94	88	78	68	59	53	46	40	34	29	24	21
14	100	94	89	79	70	62	54	47	41	36	31	26	23
15	100	94	89	80	71	63	55	49	43	37	33	28	25
16	100	95	90	80	72	64	57	50	44	39	34	30	26
17	100	95	90	81	73	65	58	52	46	40	36	31	28
18	100	95	90	81	74	66	59	53	47	42	37	33	30
19	100	95	91	82	74	66	60	54	48	43	39	34	31
20	100	95	91	82	75	67	61	55	49	44	40	36	32
21	100	95	91	83	75	68	62	56	51	46	41	37	34
22	100	95	91	83	76	69	63	57	52	47	42	38	35
23	100	96	91	83	76	69	63	58	53	48	43	39	36

Таблица П-2

Термодинамические свойства воды и пара на линии насыщения

t , $^{\circ}\text{C}$	P_s , МПа	v' , $\text{м}^3/\text{кг}$	v'' , $\text{м}^3/\text{кг}$	h' ,	h''	r	s'	s''
				кДж/кг				
0	0,0006108	0,0010002	206,3	0,000	2500,8	2500,8	0,0000	9,1644
10	0,0012271	0,0010004	106,42	42,04	2519,2	2477,3	0,1511	8,8995
20	0,002337	0,0010018	57,84	83,90	2537,2	2453,4	0,2964	8,6663
30	0,004241	0,0010044	32,93	125,69	2555,6	2430,0	0,4367	8,4523
40	0,007375	0,0010079	19,55	167,51	2573,6	2406,1	0,5723	8,2560
50	0,012335	0,0010121	12,05	209,30	2591,6	2382,3	0,7038	8,0751
60	0,019920	0,0010171	7,678	251,12	2609,2	2358,0	0,8311	7,9084
70	0,031160	0,0010228	5,045	292,99	2626,4	2333,3	0,9550	7,7544
80	0,047360	0,0010290	3,409	334,94	2643,1	2308,2	1,0752	7,6116
90	0,070110	0,0010359	2,361	376,98	2659,5	2282,5	1,1924	7,4785
100	0,101320	0,0010435	1,673	419,10	2675,8	2256,7	1,3071	7,3545
110	0,143270	0,0010515	1,210	416,34	2691,3	2230,0	1,4185	7,2368
120	0,198540	0,0010603	0,8917	503,7	2706,3	2202,7	1,5278	7,1289
130	0,270000	0,0010710	0,6675	546,4	2720,7	2174,3	1,6348	7,0288
140	0,361000	0,0010805	0,5085	589,1	2734,0	2145,0	1,7392	6,9304
150	0,485400	0,0010915	0,3927	632,2	2747,0	2114,0	1,8418	6,8383

Таблица П-3

Физические параметры сухого воздуха при давлении 101325 Па

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$	Удельная массовая изобарная теплоем- кость $c_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	Удельная массовая изохорная теплоем- кость $c_v, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
0	1,293	1,003	0,7519
10	1,247	1,003	0,7161
20	1,205	1,004	0,7163
30	1,165	1,005	0,7170
40	1,128	1,005	0,7178
50	1,093	1,006	0,7184
60	1,060	1,006	0,7192
70	1,029	1,007	0,7200
80	1,000	1,007	0,7208
90	0,972	1,009	0,7211
100	0,946	1,009	0,7226
120	0,898	1,011	0,7243
140	0,854	1,013	0,7261
160	0,815	1,017	0,7292
180	0,779	1,021	0,7333
200	0,746	1,060	0,7369
250	0,674	1,038	0,7465
300	0,615	1,047	0,7574
400	0,462	1,068	0,7808

Таблица П-4

Плотность, коэффициент теплопроводности, удельная массовая теплоемкость и коэффициент температуропроводности различных материалов

Наименование материала	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
Асфальт	20	2110	0,698	2,09	0,159
Бетон	20	2300	1,280	1,013	0,494
Гравий	20	1840	0,361	-	-
Земля:	-				
сухая		1500	0,1385	-	-
влажная		1700	0,658	2,01	0,192
Лед	0	920	2,25	2,26	1,08
Песок	20				
сухой		1500	0,326	0,798	2,73
влажный		1650	1,130	2,09	0,492
Резина	0	1200	0,163	1,38	0,0985
Снег		560	0,465	2,09	0,398
Стекло	200	2500	0,745	0,67	0,445
Шлаковая вата	100	250	0,47	-	-

Таблица П-5

Коэффициенты теплопроводности различных веществ

Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Температура, $^\circ\text{C}$
1	2	3
Бумага	0,14	20
Древесина:		
дуб	0,33÷0,35	(15÷50)
сосна	0,35÷0,41	(20÷25)
Фанера	0,15	0
Картон	0,14÷0,35	20

Окончание табл. П-5

1	2	3
Плексиглас	0,184	20
Слюда	0,1	20
Стекло	0,74+0,001·t	<500
Текстолит	0,23÷0,24	20
Шерсть	0,052	(0÷100)
Эбонит	0,157÷0,174	20
Асбест	0,084+0,00015·t	<600
Асбокартон	0,157+0,00014·t	<450
Асботкань	0,11	-
Пенопласт	0,05	30
Пробка	0,042÷0,054	80
Стекловолокно	0,04+0,003·t	<450
Сталь	51,7	20
	51,1	100
	48,5	200
	44,4	300
Дуралюминий	159	0
	165	20
	181	100
	194	200
Латунь	102	0
	106	20
	117	100
	134	200
	149	300
Медь	393	0
	385	100
	378	200
	371	300
Чугун	50	20
	49	100
	46	300

Таблица П-6

Теплофизические свойства сухого воздуха

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Коэффициент теплопроводности $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	Коэффициент кинематической вязкости $\nu \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	Коэффициент темпера- туропроводности $a \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	Плотность $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	Тепло- $c_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
20	0,0259	15,06	21,39	1,205	1,005
30	0,0267	16,00	22,80	1,165	1,005
40	0,0276	16,96	24,35	1,128	1,005
50	0,0283	17,95	25,76	1,093	1,005
60	0,029	18,97	27,22	1,06	1,005
70	0,0296	20,02	28,51	1,029	1,009
80	0,0305	21,09	30,23	1,000	1,009
90	0,0313	22,1	31,91	0,972	1,009
100	0,0321	23,3	33,63	0,946	1,009
120	0,0334	23,45	36,86	0,898	1,009
140	0,0349	27,8	40,34	0,854	1,013
160	0,0364	30,09	43,92	0,815	1,017
180	0,0378	32,49	47,48	0,779	1,022
200	0,0393	34,85	51,35	0,746	1,026
250	0,0427	40,61	61,03	0,674	1,038
300	0,0460	48,33	71,44	0,615	1,047
350	0,0491	55,46	81,92	0,566	1,059

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	1
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	4
1.1. Основные правила работы в лаборатории	4
1.2. Порядок выполнения лабораторных работ	4
1.3. Требования к оформлению отчета	4
2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	6
2.1. Основные термодинамические процессы	6
Исследование изохорного процесса	8
Исследование адиабатного процесса	12
2.2. Теплоемкость	18
Определение теплоемкости воздуха	20
Определение теплоемкости вещества методом регулярного теплового режима	24
2.3. Изучение свойств влажного воздуха	29
2.4. Теплопроводность материалов	34
Определение коэффициента теплопроводности методом пластины	35
Определение коэффициента теплопроводности методом трубы	39
2.5. Теплоотдача	45
Теплоотдача горизонтальной трубы при свободном движении воздуха	47
Теплоотдача вертикальной трубы при свободном и вынужденном движении воздуха	51
2.6. Исследование процесса теплообмена при кипении	59
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ	66
Приложение 1	72
П.1. Ошибки измеряемой величины	72
П.2. Инструкция по работе с прибором ЭТП-М	75
Приложение 2	77

Учебное издание

Остренко Сергей Александрович

ТЕПЛОТЕХНИКА

Практикум

Редактор Л.И. Александрова
Компьютерная верстка М.А. Портновой

Лицензия на издательскую деятельность ИД № 03816 от 22.01.2001

Подписано в печать 24.03.2004. Формат 60×84/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,88.
Уч.-изд. л. 4,6. Тираж 150 экз. Заказ

Издательство Владивостокского государственного университета
экономики и сервиса

690600, Владивосток, ул. Гоголя, 41
Отпечатано в типографии ВГУЭС
690600, Владивосток, ул. Державина, 57