

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВ

*Методические указания
к выполнению лабораторных работ
дисциплины «Техническая термодинамика» для студентов
направления подготовки 08.03.01 «Строительство»,
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,
21.03.01 «Нефтегазовое дело»
всех форм обучения*

Воронеж 2021

УДК 621.1
ББК 31.361

Составители Д.Н. Китаев, Г.Н. Мартыненко

Исследование термодинамических параметров газов: метод. указания к выполнению лабораторных работ дисциплины «Техническая термодинамика» для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 21.03.01 «Нефтегазовое дело» всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Д.Н. Китаев, Г.Н. Мартыненко. – Воронеж, 2021. – 36 с.

Представлены методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Техническая термодинамика».

Предназначены для студентов бакалавриата направления 08.03.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 21.03.01 «Нефтегазовое дело» всех форм обучения.

Ил. 8. Табл. 6. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.1
ББК 31.361

Рецензент – *Т.В. Щукина, канд. техн. наук, доцент
кафедры жилищно-коммунальное хозяйство
Воронежского государственного технического университета*

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к лабораторным работам составлены в соответствии с программами курсов «Техническая термодинамика» бакалавриата направления 08.03.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

Целью лабораторных работ являются углубленное усвоение материала по соответствующим разделам упомянутых курсов, а также приобретение навыков в проведении экспериментальных исследований, получении и обобщении данных.

В каждой работе указано ее назначение, приведены краткие теоретические сведения, методика проведения, порядок оформления результатов опытов, анализ точности полученных результатов.

Перед каждой лабораторной работой студент должен изучить соответствующие теоретические части курса, понять цель работы, сущность происходящих процессов, порядок проведения исследования, ожидаемые результаты. Студент должен ознакомиться с измерительными средствами, используемыми в данной работе, четко представлять особенности их работы, точность измерения и другие характеристики. Преподаватель, ведущий лабораторные занятия, прежде чем допустить студента к выполнению работы, проверяет его подготовку и знание им правил техники безопасности при проведении работы. Лабораторная работа выполняется студентом самостоятельно или группами по 3 – 4 человека (по указанию преподавателя). Результаты замеров, полученные при проведении работы, до их обработки должны быть проанализированы с целью выявления грубых ошибок измерений и после этого при необходимости усреднены. Выявление грубых ошибок измерений (при числе измерений значений величины $n \leq 25$) производится в следующем порядке.

Вычисляется среднее значение измеряемой величины N_{cp} по формуле

$$N_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n}, \quad (1)$$

где N_i – значение измеренной величины; n – число измерений.

Вычисляется среднеквадратическая ошибка σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - N_{cp})^2}{n - 1}}. \quad (2)$$

Определяется величина максимального относительного отклонения $\delta_{\max}$

$$\delta_{\max} = \frac{(N_i - N_{cp})}{\sigma}, \quad (3)$$

где N_i – крайнее (наибольшее или наименьшее) значение измеренной величины.

Полученное по уравнению (3) значение $\delta_{\max}$ сравнивают с табличным $\delta_{\text{таб}}$ (см. табл. 1). Если выполняется условие $\delta_{\max} \leq \delta_{\text{таб}}$, то значение измеренной величины не считается грубой ошибкой, в противном случае «подозрительное» значение N_i отбрасывается и в дальнейших расчетах не используется.

Таблица 1

Значения величины $\delta_{\text{таб}}$

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\delta_{\text{таб}}$	1,41	1,72	1,96	2,13	2,27	2,37	2,46	2,54	2,61	2,66	2,71	2,76	2,8

Все полученные экспериментальные данные должны иметь размерность, соответствующую международной системе единиц (СИ). Соотношения между часто встречающимися единицами измерения приведены в прил. П. 1.

Результаты наблюдений и соответствующие расчеты студент должен показать преподавателю, проводящему лабораторную работу, и только после этого приступить к оформлению отчета. Оформление отчета по лабораторным работам производится в тонкой тетради или на отдельных листах, которые после выполнения всех работ подшиваются.

Отчет по работе, выполняемый каждым студентом индивидуально, должен включать в себя следующие разделы:

- задание;
- схему экспериментальной установки с обозначениями;
- опытные данные (журнал наблюдений);
- обработку опытных данных (расчеты);
- анализ результатов по работе (выводы).

Журнал наблюдений должен быть подписан преподавателем. Оформленный отчет по выполненной лабораторной работе предъявляется преподавателю не позднее следующего лабораторного занятия. Без отчета о выполненной работе студент не допускается к последующей работе.

По правильно оформленному индивидуальному отчету студенту предлагается ответить на несколько вопросов, при положительном ответе на которые отчет по работе считается принятым, а лабораторная работа – зачтенной. Перечень некоторых вопросов к лабораторным работам приведен в конце каждой работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Определение газовой постоянной воздуха

1.1. ЗАДАНИЕ

- а) экспериментально определить удельную газовую постоянную воздуха;
- б) вычислить универсальную газовую постоянную;
- в) оформить отчет по работе.

1.2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Основными термодинамическими параметрами газа, определяющими его состояние, являются абсолютное давление P , абсолютная температура T и удельный объем v . Эти параметры находятся между собой в зависимости, аналитически выражаемой уравнением состояния $F(P, v, T) = 0$.

Для 1 кг идеального газа уравнение состояния примет вид

$$Pv = RT, \quad (1.1)$$

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

Удельная газовая постоянная представляет собой работу, совершаемую в изобарном процессе одним килограммом газа, при его нагреве на 1 градус. Данная величина зависит только от природы газа.

Уравнение состояния идеального газа (1.1) носит название уравнения Клапейрона. Уравнение (1.1) может быть записано для киломоля вещества, тогда оно называется уравнением Менделеева – Клапейрона и примет вид

$$PV_\mu = R_\mu T, \quad (1.2)$$

где V_μ – объем киломоля газа, м³/кмоль, соответствующий давлению P и температуре T ; R_μ – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К).

При нормальных условиях ($P=760$ мм рт.ст.=0,101325 МПа, $T=273,15$ К) объем одного киломоля любого идеального газа $V_\mu = 22,4$ м³/кмоль, а значение $R_\mu = 8314$ Дж/(кмоль·К).

Величины R и R_μ являются важнейшими термодинамическими константами, используемыми в теплотехнических расчетах, и они связаны между собой соотношением

$$R = \frac{R_\mu}{\mu}, \quad (1.3)$$

где μ – молекулярная масса газа, кг/кмоль.

Для чистых газов молекулярная масса соответствует массе молекулы, выраженной в килограммах, то есть непосредственно определяется из таблицы Д.И. Менделеева. Для смесей идеальных газов вводится понятие кажущейся молекулярной массы $\mu_{см}$, под которой понимается молекулярная масса воображаемого газа, заменяющего действительную смесь и состоящего из одинаковых, средних по массе молекул. Кажущаяся молекулярная масса определяется по выражению

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^n \mu_i r_i, \quad (1.4)$$

где μ_i - молекулярная масса компонента смеси, кг/кмоль; r_i - объемная доля компонента; n - число компонентов смеси.

Для воздуха кажущаяся молекулярная масса равна 28,96 кг/кмоль.

1.3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Экспериментальная установка (рис. 1.1) состоит из промежуточного сосуда 1, на котором установлен вакуумметр 2, колбы 3 с вентилем 4 (объем колбы $V_k = 980 \text{ см}^3$), вакуумного насоса 5 и соединительных трубок 6 и 7. Для взвешивания колбы используются аналитические весы, а для измерения параметров окружающего воздуха требуется барометр и термометр.

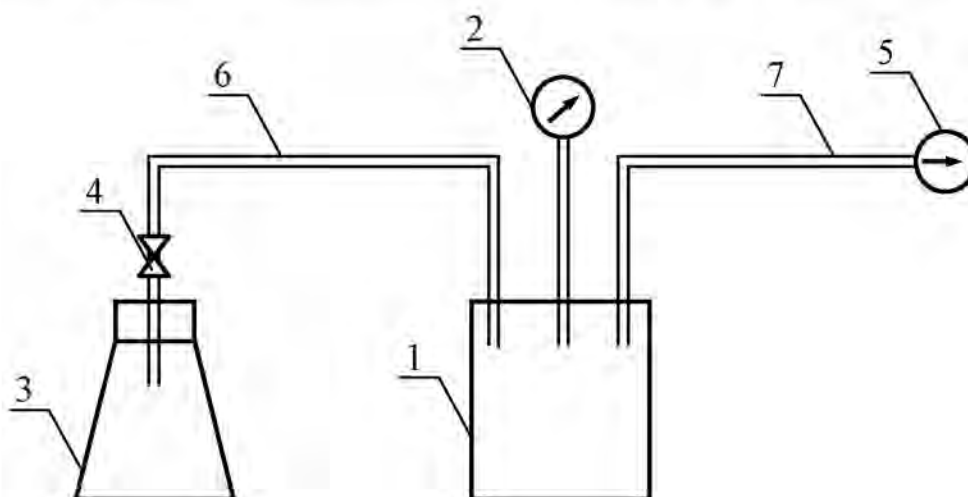


Рис. 1.1. Схема установки для определения газовой постоянной воздуха:
1 - промежуточный сосуд; 2 - вакуумметр; 3 - колба; 4 - вентиль; 5 - вакуумный насос;
6, 7 - соединительные трубки

Численное значение газовой постоянной воздуха может быть определено из уравнения (1.1). Для этого необходимо измерить атмосферное давле-

ние P и комнатную температуру t , а также определить удельный объем воздуха ν .

Определение удельного объема производится исходя из следующих соображений. Предположим, что воздух, заключенный в какой-либо сосуд (в лабораторной работе – колба), в исходном состоянии имеет параметры P_1, ν_1, T_1 . Искомая величина ν_1 может быть определена исходя из понятия удельного объема (объем единицы массы)

$$\nu = \frac{V}{m}, \quad (1.5)$$

где V – объем воздуха, м^3 ; m – масса воздуха, кг.

Поскольку прямым взвешиванием массу воздуха измерить невозможно, для ее нахождения используем закон Бойля-Мариотта, связывающий параметры газа в изотермическом процессе. Расширим воздух в колбе, выполнив откачку с помощью вакуумного насоса, а так как этот процесс достаточно медленный, будем полагать, что температура при этом остается неизменной. В конечном состоянии (после откачки) воздух в колбе будет иметь параметры P_2, ν_2, T_1 , а в силу изотермичности процесса можно записать

$$P_1 \nu_1 = P_2 \nu_2. \quad (1.6)$$

Так как объем колбы до и после откачки один и тот же (уменьшилась лишь масса воздуха в колбе), то с учетом понятия удельного объема очевидно, что между давлением и массой существует прямо пропорциональная зависимость вида $\frac{P_1}{m_1} = \frac{P_2}{m_2}$. Отсюда следует, что начальная (искомая) масса

воздуха m_1 может быть определена из соотношения $m_1 = P_1 \frac{m_2}{P_2}$. Или, меняя

отношение $\frac{m_2}{P_2}$ на отношение приращений $\frac{\Delta m}{\Delta P}$, получим

$$m_1 = P_1 \frac{\Delta m}{\Delta P} = P_1 \frac{M_1 - M_2}{P_1 - P_2}. \quad (1.7)$$

В последнем выражении вместо разности масс воздуха в начальном и конечном состоянии фигурируют массы воздуха с колбой (M_1, M_2). Очевидно, что такая замена не вносит погрешности, поскольку при расчетах отклонений масса самой колбы исключается. По найденному значению массы воздуха в колбе до откачки определяется удельный объем

$$\nu_1 = V_k / m_1. \quad (1.8)$$

Последовательность проведения опыта

1. Взвешивается колба с краном 4 и трубкой 6 (кран 5 открыт). Результат взвешивания M_1 заносится в журнал наблюдений. По барометру измеряется атмосферное давление P_1 и температура воздуха T_1 .
2. Колба 3 через трубку 6 соединяется со штуцером на промежуточном сосуде 1 (кран 4 открыт). С помощью вакуумного насоса 5 вращением маховика по часовой стрелке из колбы откачивается воздух до давления $p_2 = -0,4 \text{ кгс/см}^2$ (по вакуумметру).
3. Закрывается кран 4, отсоединяется трубка 6 от штуцера на промежуточном сосуде 1. Выполняется повторное взвешивание колбы после откачки M_2 .
4. Открывается кран 4, и последовательность операций 2 – 3 повторяется еще два раза, при этом разряжение в колбе создается равным $-0,5 \text{ кгс/см}^2$ и $-0,6 \text{ кгс/см}^2$ соответственно.

Журнал наблюдений

№ опыта	Экспериментальные данные							Расчетные данные									
	P_1		p_2		T_1	M_1	M_2	P_2	ΔM	ΔP	m_1	v_1	v_i	R	R_μ	R_{cp}	$R_{иср.}$
	мм рт.ст.	Па	кгс/см ²	Па	К	кг	кг	Па	кг	Па	кг	м ³ /кг	м ³ /кг	Дж/(кг·К)	Дж/(кмоль·К)	Дж/(кг·К)	Дж/(кмоль·К)
1																	
2																	
3																	

Техника безопасности. При создании вакуума в колбе 3 необходимо медленно вращать маховик вакуумного насоса во избежание резкого падения давления внутри колбы и ее разрушения. При наличии вакуума в колбе оберегать ее от толчков и ударов, так как ее разрушение сопровождается «хлопком» и может привести к порезам осколками стекла.

1.4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Перевести экспериментальные данные (P_1, p_2, T_1) в систему единиц СИ.
2. Избыточное давление p_2 преобразовать в абсолютное, добавив к нему барометрическое P_1 .
3. Определить изменения $\Delta M, \Delta P$.
4. Вычислить по формуле (1.7) массу воздуха в колбе до откачки m_1 .
5. Определить удельный объем воздуха в колбе до откачки по формуле (1.8).

6. Привести удельный объем воздуха в условиях лабораторной работы к нормальным условиям по формуле

$$\nu_n = \nu_1 \frac{P_1 \cdot 273,15}{T_1 \cdot 101325}.$$

7. Из уравнения (1.1) определить удельную газовую постоянную воздуха R .

8. Вычислить значение универсальной газовой постоянной R_μ , используя выражение (1.3) (значение кажущейся молекулярной массы воздуха принять равным $\mu = 28,96$ кг/кмоль).

9. По результатам трех опытов установить среднее значение газовых постоянных R и R_μ . Сравнить полученные результаты со справочными данными.

10. Выполнить статистическую обработку экспериментальных данных по формулам (1) и (2) (данный расчет выполняется по требованию преподавателя).

11. Оформить отчет по работе.

1.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем физический смысл универсальной и удельной газовых постоянных?

2. Что такое киломоль (моль) воздуха?

3. Почему величина R_μ получила название универсальной газовой постоянной?

4. Дать определение идеального газа.

5. Почему при определении массы воздуха в колбе приходится прибегать к закону Бойля-Мариотта вместо прямого взвешивания?

6. Дать определения основных положений о смесях идеальных газов: парциальных давлений, объемов и взаимосвязи между ними (законы Дальтона и Амага).

7. Назвать способы задания газовых смесей. Знать взаимосвязь между объемными, массовыми и мольными долями смеси газов.

8. Знать единицы измерения основных термодинамических параметров.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Определение средней объемной изобарной теплоемкости воздуха

2.1. ЗАДАНИЕ

а) экспериментально определить среднюю объемную изобарную теплоемкость воздуха в интервале температур от 30 до 50 °С;

- б) рассчитать средние изобарные теплоемкости воздуха (массовую и мольную), а также соответствующие теплоемкости в изохорном процессе в том же интервале температур;
- в) оформить отчет по работе.

2.2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Теплоемкость является одним из важнейших теплофизических параметров вещества и определяется количеством тепловой энергии, которую необходимо сообщить системе для повышения ее температуры на 1 градус, то есть

$$c = \frac{Q}{\Delta t}, \quad (2.1)$$

Различают теплоемкость среднюю c_m (в интервале температур от t_1 до t_2)

$$c_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q}{t_2 - t_1}, \quad (2.2)$$

и истинную c (при стремлении температурного интервала к 0)

$$c = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}. \quad (2.3)$$

В общем случае теплоемкость зависит от свойств самого вещества, характера термодинамического процесса, при котором происходит подвод или отвод тепла, температуры и давления, и от того, к какому количеству вещества она относится. Теплоемкость идеальных газов зависит от температуры.

В зависимости от принятой единицы количества вещества различают теплоемкости: массовую c , кДж/(кг·К); объемную c' , кДж/(м³·К); мольную μc , кДж/(моль·К). Перечисленные теплоемкости связаны между собой следующим соотношением

$$c = \frac{\mu c}{\mu} = c' \cdot \nu, \quad (2.4)$$

где μ – масса одного киломоля вещества, кг/кмоль; ν – удельный объем, м³/кг.

Особое значение имеют теплоемкости изохорного c_v и изобарного – c_p процессов, которые связаны между собой уравнением Майера

$$c_p = c_v + R, \quad (2.5)$$

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

Отношение изобарной и изохорной теплоемкостей определяет показатель адиабаты k

$$\frac{c_p}{c_v} = k. \quad (2.6)$$

2.3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

В лабораторной работе экспериментально определяется лишь одна величина – средняя изобарная объемная теплоемкость воздуха. Остальные значения теплоемкостей (согласно заданию) устанавливаются в результате расчетов.

Для определения средней изобарной теплоемкости воздуха используется метод проточного калориметрирования. Схема экспериментальной установки (рис. 2.1) включает: проточный калориметр 1, представляющий собой стеклянную трубку, внутри которой расположен электрический нагреватель, вентилятор 3, ротаметр для измерения объемного расхода воздуха 3, амперметр 4 и вольтметр 5 для измерения мощности нагревателя, автотрансформатор для регулирования мощности 6, дифференциальный манометр для измерения избыточного давления 7 и два ртутных термометра для измерения температуры воздуха на входе 8 и выходе из калориметра 9.

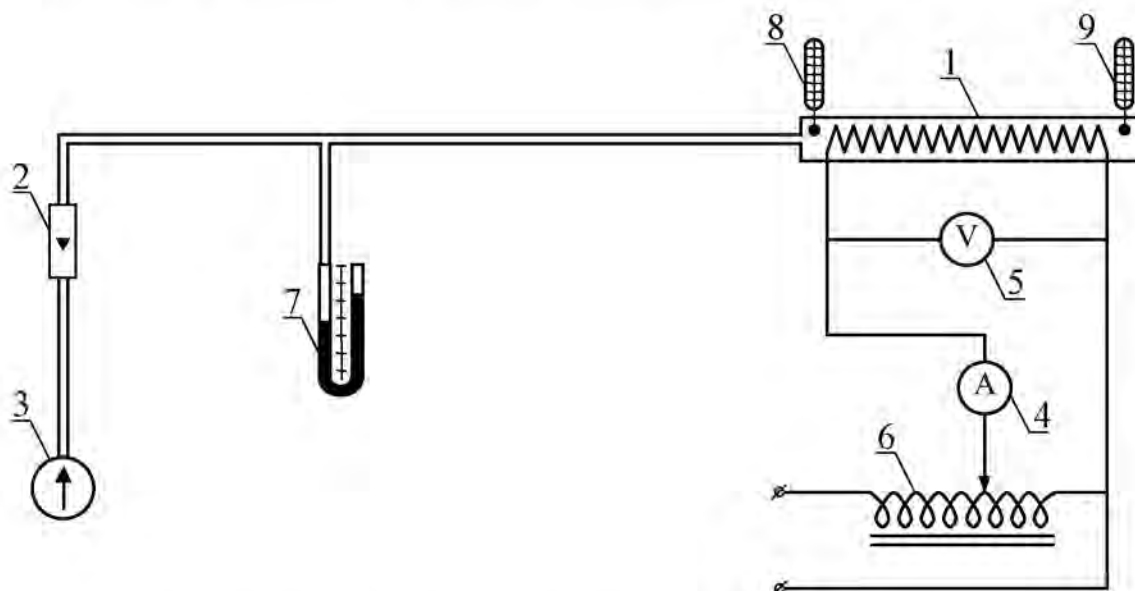


Рис. 2.1. Схема установки для определения средней объемной изобарной теплоемкости воздуха: 1 – проточный калориметр; 2 – ротаметр; 3 – вентилятор; 4 – амперметр; 5 – вольтметр; 6 – автотрансформатор; 7 – жидкостный манометр; 8,9 - термометры

Численное значение объемной изобарной теплоемкости c'_{pm} может быть определено из уравнения (2.1), если считать, что подводимая теплота Q , Вт равна мощности электрического нагревателя W (произведение силы тока I на напряжение U), и, кроме того, учесть объемный расход воздуха G_v , м³/с (определяемый с помощью ротаметра). Тогда окончательное соотношение для вычисления объемной изобарной теплоемкости воздуха c'_{pm} , Дж/(м³К) примет вид

$$c'_{pm} = \frac{Q}{(t_2 - t_1)G_v} = \frac{I \cdot U}{(t_2 - t_1)G_v} \quad (2.7)$$

Последовательность проведения опыта

1. Включить вентилятор и нагреватель калориметра. Установить с помощью автотрансформатора мощность нагревателя таким образом, чтобы подогрев воздуха в калориметре (т.е. разность $t_2 - t_1$) ориентировочно составлял 15 – 20 °С. Для этого сила тока по амперметру должен быть в пределах 0,25 – 0,3 А.
2. Убедившись в стационарности теплового режима работы установки (т.е. через 2 – 3 мин), снять показания вольтметра, амперметра, ротаметра, обоих термометров и барометра. Результаты занести в журнал наблюдений.
3. Во избежание промахов в эксперименте с интервалом в 2 минуты повторить замеры по всем приборам еще два раза, не меняя при этом мощность электрического нагревателя.

Журнал наблюдений

№ опыта	Экспериментальные данные								Расчетные данные											
	I	U	t_1	t_2	N	P_o	P_u	t_0	P_v	W	G_m	G_v	Δt	c'_{pm}	v_v	c_{pm}	μc_{pm}	c_{vm}	c'_{vm}	μc_{vm}
	A	B	°C	°C		мм рт. ст.	мм вод. ст.	°C	Па	Вт	м³/с	м³/с	°C	Дж/(м³K)	м³/кг	Дж/(кг·K)	Дж/(кмоль·K)	Дж/(кг·K)	Дж/(м³K)	Дж/(кмоль·K)
1																				
2																				
3																				

Техника безопасности. Электрический нагреватель в проточном калориметре может работать только при включенном вентиляторе. В противном случае спираль может выйти из строя.

2.4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Используя показания ротаметра, определить по графику (прил. 2) объемный расход воздуха G_m , м³/ч, и преобразовать в размерность м³/с. Более точно объемный расход в зависимости от показаний ротаметра N можно определить по формуле

$$G_o = 1,644 \cdot 10^{-6} N^3 - 1,34 \cdot 10^{-4} N^2 + 0,055 N + 0,923. \quad (2.8)$$

Поскольку тарировочный график ротаметра получен при определенном атмосферном давлении P_m и температуре t_m окружающего воздуха ($t_m = 23$ °С, $P_m = 744$ мм.рт.ст.), необходимо привести полученное значение расхода воздуха по тарировочному графику G_m к условиям опыта G_o , используя соотношение

$$G_o = G_m \frac{P_m T_o}{P_o T_m}, \quad (2.9)$$

где P_m , T_m - абсолютное давление, Па, и абсолютная температура, К, при которых строился тарировочный график ротаметра; P_o , T_o - то же при условиях опыта.

Абсолютное давление потока воздуха в калориметре P_o определяется как сумма атмосферного давления P_b (взятого по барометру) и избыточного давления по манометру P_u .

2. Определить мощность электрического нагревателя W , Вт, по формуле

$$W = I \cdot U, \quad (2.10)$$

где I – сила тока, А; U – напряжение, В.

3. Определить среднюю объемную изобарную теплоемкость воздуха c'_{pm} по формуле (2.7).

4. Определить среднюю изобарную массовую теплоемкость воздуха c_{pm} , используя соотношение (2.4). Для этого необходимо предварительно найти удельный объем воздуха v_o , м³/кг, в условиях опыта по уравнению

$$v_o = \frac{R_o T_o}{P_o}, \quad (2.11)$$

где R_o - удельная газовая постоянная воздуха ($R_o = 287$ Дж/(кг·К)).

5. Определить среднюю изобарную мольную теплоемкость μc_{pm} , используя соотношение (2.4), при этом значение молекулярной массы воздуха принять равной $\mu = 28,96$ кг/кмоль.

6. По уравнению Майера (2.5) найти значение средней изохорной массовой теплоемкости воздуха c_{vm} .

7. Определить среднюю изохорную объемную $c'_{\text{от}}$ и мольную $\mu c_{\text{от}}$ теплоемкость воздуха, используя соотношение (2.4).
8. Сравнить полученные результаты со справочными данными.
9. Выполнить статистическую обработку экспериментальных данных по формулам (1) и (2) (данный расчет делается по требованию преподавателя).
10. Оформить отчет по работе.

2.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается физический смысл теплоемкости?
2. Укажите факторы, определяющие классификацию теплоемкости.
3. Как влияет характер процесса отвода и подвода тепла на значение теплоемкости?
4. Могут ли реально существовать процессы, теплоемкость в которых стремится к бесконечности?
5. Как влияет температура на величину теплоемкости и можно ли объяснить причину этого влияния с позиций молекулярно-кинетической теории?
6. Если известна зависимость истинной теплоемкости от температуры, то как определить величину средней теплоемкости в заданном интервале температур?
7. Может ли теплоемкость принимать отрицательное значение, и если да, то укажите необходимые условия?
8. Как определить значение теплоемкости, если имеется графическое изображение процесса в T - S диаграмме?
9. Запишите уравнения для определения количества теплоты при известных удельных теплоемкостях, расходах нагреваемых или охлаждаемых сред и температурах процесса (уравнения теплового баланса).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Определение показателя адиабаты воздуха

3.1. ЗАДАНИЕ

- а) экспериментально определить показатель адиабаты воздуха;
- б) оформить отчет по работе.

3.2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Процесс изменения состояния вещества, происходящий без теплообмена с окружающей средой, называется *адиабатным*. Обратимый адиабатный

процесс всегда является *изоэнтропным* ($S = \text{const}$, $dS = 0$). Уравнение адиабатного процесса, называемое уравнением Пуассона, имеет вид

$$p v^k = \text{const} . \quad (3.1)$$

Величина k называется показателем адиабаты (изоэнтропы) и определяется соотношением

$$k = -\frac{v}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right) , \quad (3.2)$$

Для идеального газа в результате преобразования производной в изоэнтропном процессе по дифференциальным уравнениям термодинамики [1] показатель адиабаты можно определять через соотношение теплоемкостей

$$k = \frac{c_p}{c_v} . \quad (3.3)$$

Согласно молекулярно-кинетической теории для идеального газа теплоемкости не зависят от температуры. Тогда для воздуха, основные компоненты которого (кислород и азот) являются двухатомными газами, показатель адиабаты в соответствии с уравнением (3.3) примет значение $k=1,4$. В действительности показатель адиабаты зависит от температуры и давления и для большинства газов находится в пределах $1,3 \dots 1,7$.

3.3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Методика экспериментального определения показателя адиабаты воздуха, применяемая в данной лабораторной работе, основана на непосредственном использовании уравнения адиабатного процесса (3.1). Рассмотрим процесс адиабатного расширения воздуха с начальными параметрами p_1, v_1 до параметров p_2, v_2 (рис. 3.1).

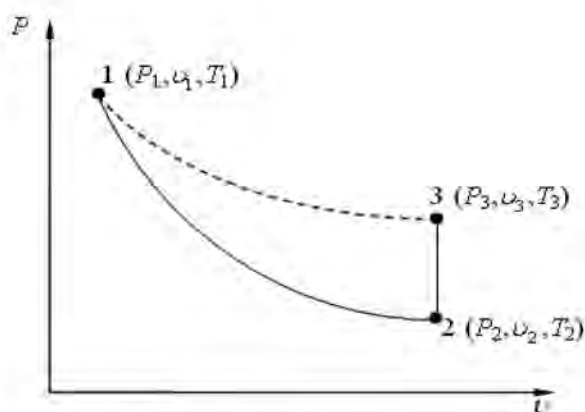


Рис. 3.1. Изображение процессов в P - v диаграмме:
1 - 2 – адиабатный; 2 - 3 – изохорный (пунктир - изотерма)

Реализацией такого процесса на практике можно считать самопроизвольный выход воздуха в окружающую среду из емкости 1 (рис. 3.2), в которой предварительно было создано некоторое избыточное давление с помощью насоса 2. Чем быстрее осуществляется процесс выхода воздуха, тем ближе он к адиабатному, поскольку малое время расширения практически исключает теплообмен между воздухом, остающимся в емкости, и окружающей средой. Разумеется, для реализации такого процесса необходима достаточная разность давлений, которую трудно обеспечить в лабораторных условиях. Поэтому будем считать, что проводимое в лабораторной работе расширение является адиабатным лишь приближенно.

После подстановки начальных и конечных параметров процесса расширения в уравнение (3.1) и его логарифмирования получим следующую зависимость:

$$k = \frac{\ln \frac{p_1}{p_2}}{\ln \frac{v_2}{v_1}} \quad (3.4)$$

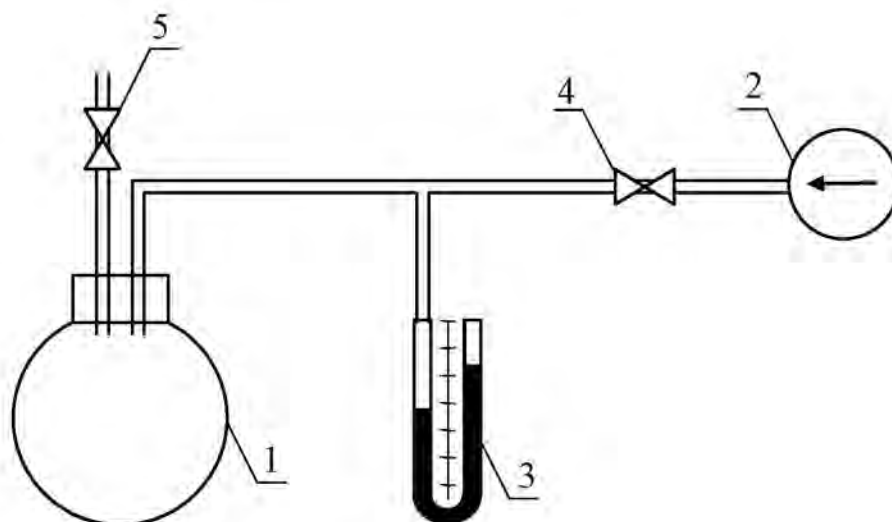


Рис. 3.2. Схема установки для определения показателя адиабаты воздуха:
1 – колба; 2 – вакуумный насос; 3 – дифференциальный манометр; 4,5 - краны

Непосредственное использование выражения (3.4) для экспериментального определения показателя адиабаты невозможно ввиду сложности установления значений удельных объемов. Давление можно измерить с помощью дифференциального U – образного водяного манометра. Используя уравнение состояния идеального газа, уравнение (3.4) перепишем в виде

$$k = \frac{\ln \frac{p_1}{p_2}}{\ln \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1}}. \quad (3.5)$$

В силу отсутствия теплообмена работа расширения производится за счет внутренней энергии воздуха в емкости, и, следовательно, температура в процессе будет понижаться. Чтобы не измерять это понижение температуры, достаточно после адиабатного расширения осуществить самопроизвольный изохорный теплообмен воздуха в емкости до температуры окружающей среды. Обозначим конечные параметры воздуха в емкости через p_3, v_3 . Для изохорного процесса 2 – 3 (рис. 3.1) справедливо соотношение $p_2 T_3 = p_3 T_2$. Выражая T_2 , учитывая что в конце изохорного процесса подогрева воздуха температура его станет равной температуре окружающей среды ($T_1 = T_3$), выражение (3.5) примет вид

$$k = \frac{\ln \frac{p_1}{p_2}}{\ln \frac{p_1}{p_3}}. \quad (3.6)$$

В силу того, что соотношение давлений как при адиабатном расширении, так и при изохорном подогреве слабо отличаются от единицы (если рассматривать абсолютные давления), то логарифмические функции можно разложить в ряд. Если ограничиться только первыми членами ряда, выражение (3.6) примет вид

$$k = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_3}. \quad (3.7)$$

Используя выражение (3.7), определяем показатель адиабаты в лабораторной работе. Поскольку в числителе и знаменателе выражения (3.7) фигурируют разности давлений, то расчеты можно выполнять на основе измеренных значений избыточных давлений.

Последовательность проведения опыта

1. Открыть кран 4 и закрыть кран 5. С помощью вакуумного насоса закачать воздух в емкость. Давление в емкости целесообразно поднимать до значений 600 – 800 мм вод. ст. Закрыть кран 4. По дифференциальному манометру измерить давление p_1 , результат занести в журнал наблюдений. Измеренное давление является параметром воздуха в начале адиабатного расширения.

2. Открыть кран 5 и в момент прохождения столбиком воды дифференциального манометра нулевой отметки закрыть кран 5. Данный процесс выхода части воздуха из емкости под действием избыточного давления (внут-

ренной энергии) и является адиабатным расширением. Момент перекрытия крана 5 считается окончанием процесса. Следовательно, избыточное давление p_2 равно нулю (нуль заносится в журнал наблюдений). В принципе прервать адиабатное расширение можно при любом значении избыточного давления, но нулевое значение удобнее фиксировать, и, кроме того, в этом случае происходит максимальное изменение температуры.

3. После перекрытия крана 5 начинается самопроизвольный (изохорный) процесс нагрева воздуха в емкости за счет теплообмена с окружающей средой, поскольку его начальная температура T_1 понизилась относительно комнатной. В результате процесса теплообмена температуры выравниваются ($T_1 = T_3$). Окончание этого процесса фиксируется, когда прекратится рост избыточного давления по дифференциальному манометру. Полученное значение давления p_3 занести в журнал наблюдений.

4. Повторить опыт 3-4 раза.

Журнал наблюдений

№ опыта	Экспериментальные данные			Расчетные данные			
	p_1 , мм вод. ст.	p_2 , мм вод. ст.	p_3 , мм вод. ст.	$p_1 - p_2$	$p_1 - p_3$	k	$k_{ср}$
1							
2							
3							

Техника безопасности. При нагнетании воздуха в емкость необходимо медленно вращать маховик вакуумного насоса во избежание резкого изменения давления, что может привести к выталкиванию воды из трубки дифференциального манометра.

3.4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Рассчитать разности давлений $p_1 - p_2$ и $p_1 - p_3$.
2. Определить показатель адиабаты k по формуле (3.7).
3. По результатам трех опытов установить среднее значение $k_{ср}$. Сравнить полученные результаты со справочными данными.
4. Выполнить статистическую обработку данных по формулам (1) и (2) (данный расчет выполняется по требованию преподавателя).
5. Оформить отчет по работе.

3.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем причина отклонения экспериментального значения показателя адиабаты от теоретического?
2. Почему реальный адиабатный процесс нельзя считать изоэнтропным?
3. Как в $p-v$ диаграмме определить работу расширения в адиабатном процессе?
4. Объясните на основе первого закона термодинамики причину падения температуры в адиабатном процессе расширения газа.
5. Можно ли определить численное значение температуры воздуха в конце адиабатного процесса расширения, если известна комнатная температура в опыте?
6. Изобразите процессы, протекающие во время опыта, в $T-S$ диаграмме.
7. Определите количество теплоты, переданное от окружающей среды воздуху в процессе изохорного нагрева 2-3.
8. Определите на основе молекулярно-кинетической теории газов показатели адиабаты основных компонентов воздуха.
9. Почему полученный экспериментально показатель адиабаты воздуха отличается от значения, полученного по молекулярно-кинетической теории?
10. Считая полученное значение показателем политропного (а не адиабатного) процесса, определите величину и знак теплоемкости для этого процесса и дайте его изображение в термодинамических диаграммах.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Исследование процессов во влажном воздухе

4.1. ЗАДАНИЕ

- а) исследовать процессы подогрева и испарения влажного воздуха;
- б) построить эти процессы в $i-d$ диаграмме и найти с ее помощью количество испаренной влаги, а также тепловые потери в калорифере и сушильной камере;
- в) оформить отчет по работе.

4.2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара. Водяной пар в воздухе может быть насыщенным или перегретым, и в зависимости от этого влажный воздух считается насыщенным или ненасыщенным соответственно.

Параметрами влажного воздуха являются абсолютная влажность ρ , кг/м³ (масса водяного пара, находящегося в 1 м³ влажного воздуха); относи-

тельная влажность φ (отношение абсолютной влажности к ее значению в состоянии насыщения); влагосодержание d , г/кг (масса водяного пара, отнесенная к 1 кг сухого воздуха, содержащегося во влажном); парциальное давление сухого воздуха $p_{с.в.}$ и водяного пара $p_{в.п.}$; температура сухого термометра t_c и мокрого термометра t_m ; температура точки росы t_p ; энтальпия i , кДж/кг. Перечисленные параметры влажного воздуха взаимосвязаны через соотношения, относящиеся к законам смесей идеальных газов, поскольку все компоненты в условиях применения воздуха на практике можно считать идеальными газами (в том числе и водяной пар, находящийся при соответствующем парциальном давлении).

Экспериментальное определение состояния влажного воздуха основано на измерении разности температур сухого и мокрого термометров. Температурой мокрого термометра считается ее значение для бесконечно тонкого слоя жидкости, находящегося в условиях теплового баланса с окружающим воздухом. Смысл теплового баланса заключается в равенстве тепловой энергии, отданной испаряющейся влаги и воспринятой за счет конвективного теплообмена.

Для удобства выполнения инженерных расчетов используется $i-d$ диаграмма, оси которой выбраны исходя из того, что исследуемые процессы испарения и подогрева являются основными процессами, протекающими в теплотехническом оборудовании (если не учитывать смешение), а указанные параметры в этих процессах остаются постоянными. В процессе нагревания влажного воздуха увеличивается перегрев содержащегося в нем водяного пара, поэтому степень ненасыщенности возрастает, что обеспечивает способность к поглощению влаги. Неизменность энтальпии влажного воздуха в процессе испарения обусловлена тем, что энергия, взятая из воздуха для испарения, возвращается к нему вместе с испаренной влагой. Для реального процесса испарения характерно уменьшение энтальпии, что обусловлено тепловыми потерями.

$I-d$ диаграмма влажного воздуха построена для барометрического давления 745 мм рт. ст. Отклонения полученных по диаграмме результатов при других значениях давлений несущественны.

4.3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Установка для исследования процессов во влажном воздухе представлена на рис. 4.1. Атмосферный воздух вентилятором 1 подается в калорифер 2. Процесс подогрева воздуха в калорифере производится электронагревателем 3 до температур 60 – 70 °С. Мощность нагревателя регулируется автотрансформатором 7. Подача воздуха в калорифер выполняется по кольцевому каналу для уменьшения тепловых потерь.

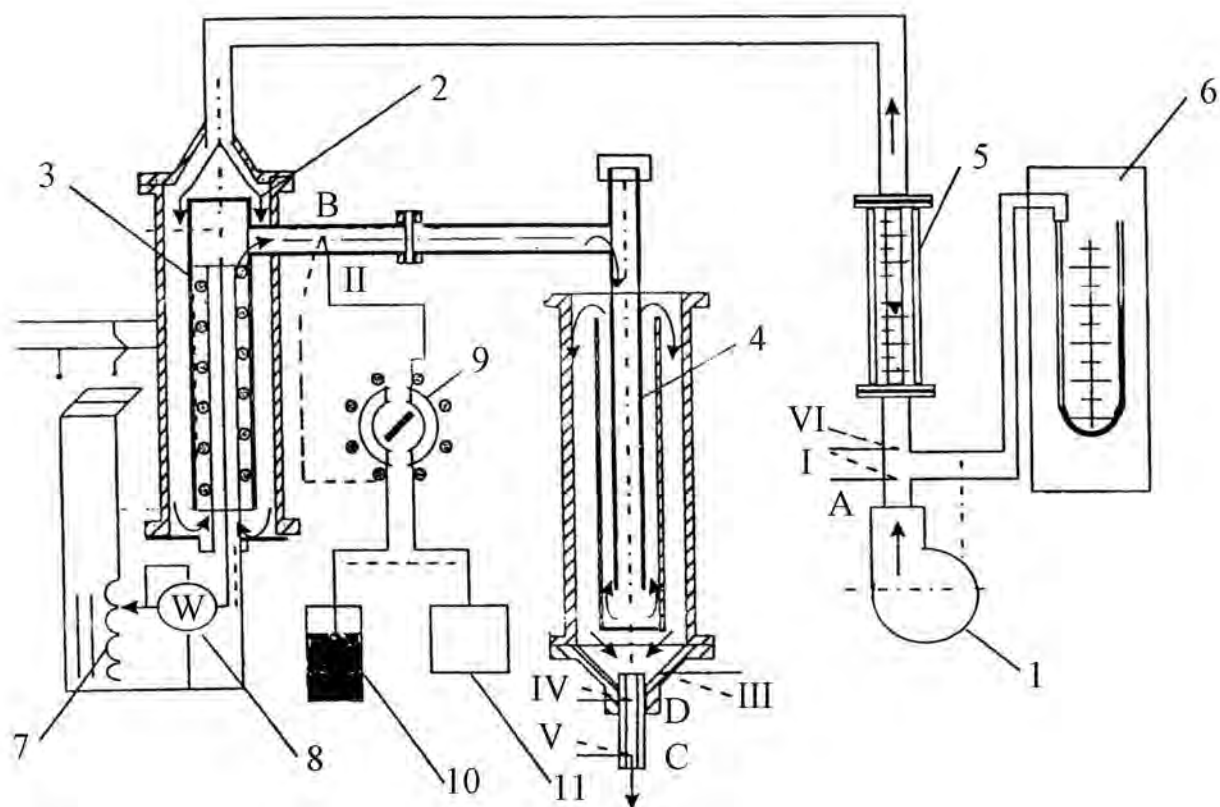


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки для исследования процессов во влажном воздухе:

1 – вентилятор; 2 – калорифер; 3 – электронагреватель;
4 – сушильная камера; 5 – ротаметр; 6 – манометр; 7 – автотрансформатор; 8 – ваттметр;
9 – переключатель термопар; 10 – холодный спай термопар; 11 – потенциометр

Из калорифера воздух поступает в сушильную камеру 4. Процесс испарения влаги в сушильной камере осуществляется с помещенных на четырех тарелках кусков ткани, которые нижним концом опущены в воду и работают по принципу фитиля. После сушильной камеры воздух выбрасывается в атмосферу.

Средства измерения в лабораторной установке включают: ваттметр 8 для измерения мощности электронагревателя; ротаметр 5 для измерения расхода воздуха; барометр и U – образный манометр 6 для измерения атмосферного и избыточного давления соответственно. Кроме того, по тракту движения воздуха для измерения его температуры установлены медь-константановые термопары в количестве шести штук, обозначенные на схеме римскими цифрами (I - VI). В комплекте с термопарами используется их переключатель 9, холодный спай 10 и потенциометр 11. Поскольку холодный спай находится при комнатной температуре, для определения ее значения используется ртутный термометр.

Термопары I,II,III,IV измеряют температуру сухого термометра для воздуха в соответствующих точках тракта, а термопары V,VI – температуру мокрого термометра. Принципиального отличия в их конструкции нет, но

последние две термопары покрыты тканью, которая в процессе проведения опыта смачивается водой.

Последовательность проведения опыта

1. Первый этап является подготовительным и выполняется лаборантом заранее (до проведения замеров). На этом этапе лабораторная установка должна быть выведена на стационарный тепловлажностный режим функционирования, то есть режим, при котором параметры влажного воздуха, движущегося по тракту установки, не меняются во времени. В течение первого этапа осуществляется заливка воды на тарелки сушильной камеры; подогрев установки и регулирование мощности электронагревателя, а также подачи воздуха вентилятором; настройка рабочего тока потенциометра. Продолжительность первого этапа 15 – 30 мин.

2. Снять показания всех приборов и занести их в журнал наблюдений.

3. При необходимости контроля стационарного режима повторить опыт 1 – 2 раза. При повторных опытах необходимо смачивать термопары, измеряющие температуры мокрого термометра.

Журнал наблюдений

Экспериментальные данные																		
№ опыта	W	N	V_e	t_0	$P_{\bar{\theta}}$	P_u	показания термопар											
	Вт		м³/с	°C	мм рт.ст.	мм вод.ст.	I		II		III		IV		V		VI	
							мВ	°C	мВ	°C	мВ	°C	мВ	°C	мВ	°C	мВ	°C
1																		
2																		
3																		

Техника безопасности. При проведении эксперимента следует соблюдать правила электробезопасности, так как калорифер и вентилятор подключены к сети 220 В.

4.4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Перевести значения термо-э.д.с. термопар в градусы Цельсия при помощи градуировочной таблицы (прил. 3). Определить объемный расход воздуха V_v , м³/с, пользуясь тарировочным графиком (прил. 2). Рассчитать средние за опыт величины.

2. Построить процессы в $i - d$ диаграмме (рис. 4.2), заполняя при этом журнал результатов, в который заносятся энтальпия i , влагосодержание d и

парциальное давление пара $P_{\text{п}}$ каждой точки, задающей начало и конец процесса, найденные по диаграмме.

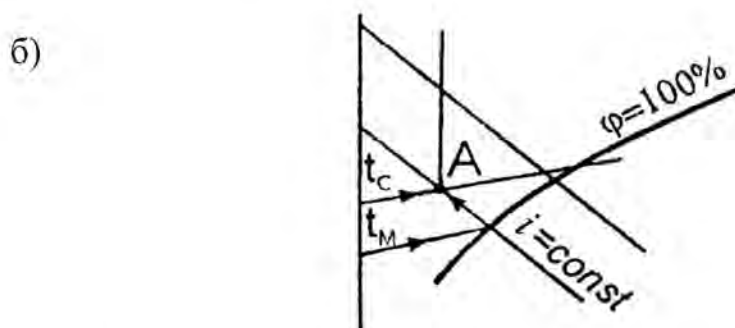
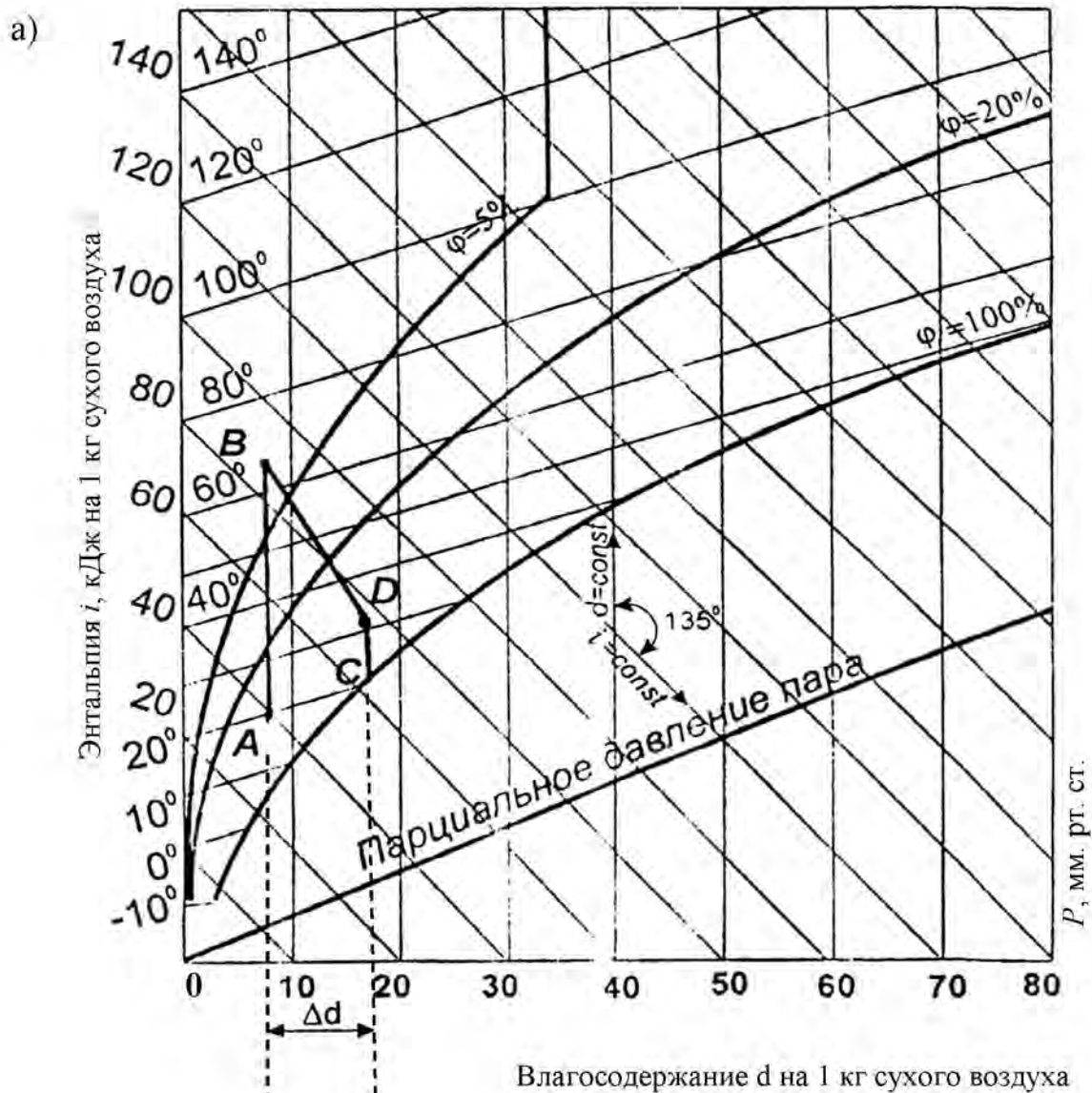


Рис. 4.2. Изображение процессов во влажном воздухе на $i - d$ диаграмме:
а) процессы, протекающие в установке; б) определение состояния воздуха по показаниям сухого и мокрого термометров

Исходная точка (А) определяется состоянием воздуха на входе в установку, и ее параметры измеряются с помощью сухой и мокрой термопар с номерами I и VI соответственно.

Точка (В) устанавливает состояние воздуха на выходе из калорифера, и, поскольку процесс подогрева осуществляется при постоянном влагосодержании $d = \text{const}$, положение точки определяется параметрами $d(B)=d(A)$ и температурой, измеренной термопарой II.

Далее следует определить точку (С), характеризующую состояние воздуха на выходе из установки и ее параметры измеряются с помощью сухой и мокрой термопар с номерами IV и V соответственно.

Точка (D), отвечающая состоянию воздуха за сушильной камерой, определяется построением процесса охлаждения воздуха в выходной трубе (от сечения, где измеряется температура за сушильной камерой, до выхода из установки). Поскольку охлаждение, как и нагрев, осуществляется при $d = \text{const}$, то положение точки (D) определяется параметрами $d(D)=d(C)$ и температурой, измеряемой термопарой III.

Соединив последовательно точки (А,В,D,С) на диаграмме, формируют процессы, протекающие в лабораторной установке.

Журнал результатов

№ опыта	Расчетные данные																	
	Параметры точек												$P_{св}$	$M_в$	ΔM	Q_k	ΔQ_k	ΔQ_c
	т.(A)			т.(B)			т.(D)			т.(C)								
	i	d	P_n	i	d	P_n	i	d	P_n	i	d	P_n						
	Дж/кг	г/кг	Па	Дж/кг	г/кг	Па	Дж/кг	г/кг	Па	Дж/кг	г/кг	Па						
1																		
2																		
3																		

3. Определить парциальное давление сухого воздуха $P_{св}$ по формуле

$$P_{св} = P_б - P_u - P_n. \quad (4.1)$$

Парциальное давление водяного пара P_n принимается по диаграмме для точек (А),(В). Установка работает под разрежением, поэтому в формуле (4.1) необходимо вычесть P_u из барометрического давления $P_б$.

4. Вычислить массовый расход сухого воздуха через установку по уравнению

$$M_в = \frac{P_{св} V_в}{R_a T_0}, \quad (4.2)$$

где R_g - газовая постоянная сухого воздуха $R_g = 287$ Дж/(кг·К); T_0 – абсолютная температура окружающей среды, К.

5. Найти количество испаренной влаги в единицу времени ΔM по формуле

$$\Delta M = 0,001(d_D - d_B)G_g. \quad (4.3)$$

6. Определить количество тепла, воспринятое воздухом в калорифере

$$Q_k = (i_B - i_A)M_g. \quad (4.4)$$

7. Вычислить тепловые потери в калорифере по формуле

$$\Delta Q_k = W - Q_k. \quad (4.5)$$

8. Вычислить тепловые потери в сушильной камере

$$\Delta Q_c = (i_B - i_D)M_g. \quad (4.6)$$

9. Выполнить статистическую обработку данных по формулам (1)-(2) (данный расчет выполняется по требованию преподавателя).

10. Оформить отчет по работе.

4.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему теоретический процесс сушки протекает при $i = \text{const}$?
2. Объяснить с помощью $i-d$ диаграммы процесс нагрева воздуха в калорифере.
3. В чем отличие реального процесса сушки от теоретического (объяснить при помощи $i-d$ диаграммы)?
4. Уметь определять параметры влажного воздуха при помощи $i-d$ диаграммы.
5. Уметь выполнять расчеты процессов во влажном воздухе при помощи $i-d$ диаграммы.
6. В чем заключается физический смысл температуры мокрого термометра?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

*Определение энтальпии водяного пара
при помощи адиабатного дросселирования*

5.1. ЗАДАНИЕ

- а) экспериментально определить энтальпию влажного насыщенного и перегретого водяного пара при давлениях до 0,3 МПа и температурах до 180 °С;
- б) для влажного насыщенного пара определить степень сухости;
- в) оформить отчет по работе.

5.2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Данные о теплофизических свойствах воды и водяного пара необходимы для расчета процессов, совершаемых ими в теплотехнических установках различного назначения. Важными параметрами влажного насыщенного водяного пара являются энтальпия и степень сухости, а наиболее удобный способ их экспериментального определения основан на процессе адиабатного дросселирования.

Дросселированием (мятием) называется процесс падения давления потока жидкости или газа при его протекании через местное гидравлическое сопротивление, которое представляет собой резкое уменьшение проходного сечения канала (вентиль, задвижка, шайба и т.д.). Дросселирование сопровождается большими необратимыми потерями на трение, а следовательно, и потерей работоспособности потока, поэтому оно считается отрицательным явлением для теплосиловых установок и при транспортировке сред по трубопроводам. Для ряда веществ, при определенных параметрах, падение давления сопровождается так называемым дроссель-эффектом (эффектом Джоуля – Томсона), который заключается в понижении температуры потока на выходе из дросселирующего устройства. На основе этого эффекта работает оборудование в области холодильной и криогенной техники [5].

Принципиальной особенностью процесса адиабатного дросселирования является неизменность энтальпии. Очевидно, что в местном гидравлическом сопротивлении (при сужении) скорость потока резко возрастает. Для процесса дросселирования (система считается открытой) справедлив первый закон термодинамики, который можно для потока записать в следующем виде

$$dq = di + \frac{1}{2}dw^2 + gdz + dl_{mex}. \quad (5.1)$$

Ускорение потока, приводящее к увеличению кинетической энергии ($dw^2 > 0$), осуществляется за счет уменьшения энтальпии ($di < 0$), так как остальные составляющие: подведенная теплота (dq), техническая работа (dl_{mex}), изменение потенциальной энергии (gdz) – равны нулю (процесс считается адиабатным). Часть кинетической энергии потока при дросселировании преобразуется за счет трения в теплоту, которая передается потоку и увеличивает энтальпию до начального значения.

5.3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Методика экспериментального определения значения энтальпии водяного пара любого состояния (как насыщенного, так и перегретого) основана на ее неизменности в результате адиабатного дросселирования. Постоянство энтальпии позволяет за счет процесса дросселирования пара с повышенными параметрами (температурой и давлением) понизить его давление до атмо-

сферного, а затем величину энтальпии определить методом калориметрирования [4].

Схема установки для исследования процессов с водяным паром показана на рис. 5.1. В парогенераторе 1 за счет электроэнергии нагревателя образуется влажный насыщенный пар с абсолютным давлением порядка 0,3 МПа. При открытии вентиля 2 пар по трубопроводу поступает в первую камеру 3. На этом трубопроводе расположен электрический нагреватель 4, при помощи которого имеется возможность получать перегретый водяной пар с температурой порядка 433 – 453 К. Регулирование мощности электронагревателя выполняется с помощью автотрансформатора 5. Парогенератор оборудован предохранительным клапаном 6.

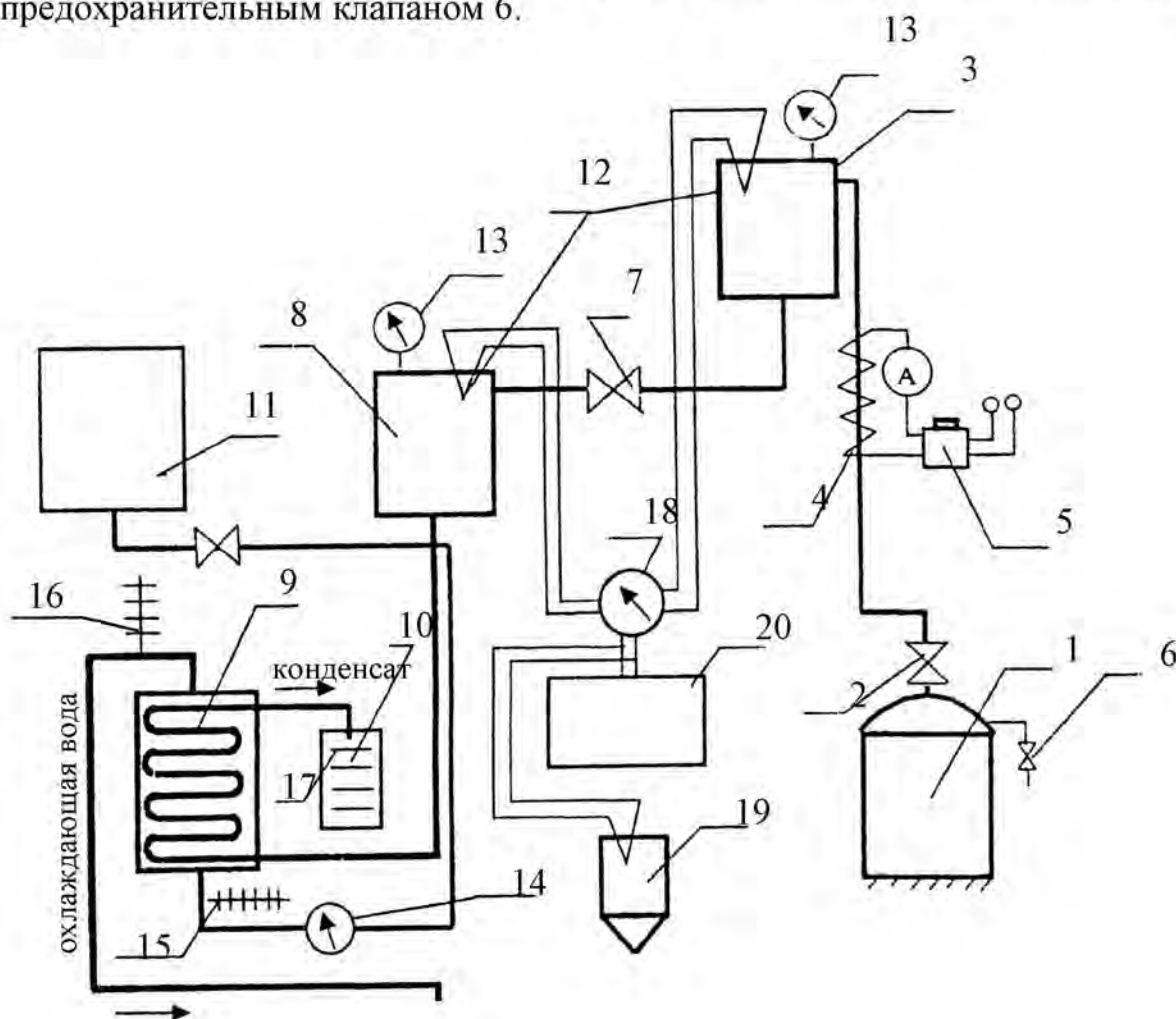


Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки для определения энтальпии водяного пара методом адиабатного дросселирования:

- 1 – парогенератор; 2 – вентиль для подачи пара;
 3 – первая измерительная камера; 4 – электрический нагреватель; 5 – автотрансформатор;
 6 – предохранительный клапан; 7 – дроссельный вентиль; 8 – вторая измерительная камера;
 9 – калориметр; 10 – мерный стакан для сбора конденсата; 11 – бак с охлаждающей водой;
 12 – термопары; 13 – манометр; 14 – расходомер для определения количества охлаждающей воды;
 15, 16, 17 – ртутные термометры; 18 – переключатель термопар;
 19 – холодный спай; 20 – потенциометр

Из первой камеры пар направляется в дроссельный вентиль 7, который предназначен для совершения процесса адиабатного дросселирования. В нем давление понижается до значения, близкого к атмосферному. Некоторое превышение давления пара после дроссельного вентиля над атмосферным необходимо для его движения по тракту лабораторной установки.

После дроссельного вентиля пар направляется во вторую камеру 8, назначение которой заключается в обеспечении процесса торможения потока для восстановления значения его энтальпии после дросселирования.

Из второй камеры пар практически при атмосферном давлении поступает в калориметр 9, где происходит его конденсация и охлаждение образующегося конденсата. Выходящий из калориметра конденсат собирается в мерный стакан 10. Конденсация пара обеспечивается за счет охлаждающей воды, поступающей из бака 11. Условие теплового баланса (равенства) между энергией, отданной паром в процессе конденсации и воспринятой охлаждающей водой, является основой метода калориметрирования.

Все элементы установки, по которым движется пар, для уменьшения тепловых потерь размещены в непосредственной близости друг от друга и защищены тепловой изоляцией, что позволяет понизить погрешность получаемых опытных данных. Адиабатности процесса способствуют также и весьма высокие скорости движения пара в установке.

Средства измерения в лабораторной установке включают хромель-капелевые термодатчики 12 в гильзах для измерения температур пара в камерах; пружинные манометры для измерения давления в камерах и в полости парогенератора 13; расходомер для определения расхода охлаждающей воды 14; ртутные термометры для измерения температуры охлаждающей воды на входе и выходе калориметра и температуры конденсата 15,16,17; амперметр для измерения силы тока электронагревателя, обеспечивающего перегрев пара.

В комплекте с термодатчиками используется их переключатель 18, холодный спай 19 и потенциометр 20. Поскольку холодный спай находится при комнатной температуре, для определения значения его температуры, используется ртутный термометр. Атмосферное давление определяется по барометру.

Последовательность проведения опыта

1. Первый этап является подготовительным и выполняется лаборантом заранее (до проведения замеров). На этом этапе лабораторная установка должна быть выведена на стационарный тепловой режим функционирования, то есть режим, при котором параметры водяного пара, движущегося по тракту установки, не меняются во времени. В течение первого этапа осуществляются регулировка мощности нагревателя, для того чтобы температура пара находилась в пределах 180 - 200 °С; регулировка расхода охлаждающей воды так, чтобы температура выходящей из калориметра воды была примерно 25 –

36 °С; настройка рабочего тока потенциометра. Продолжительность первого этапа 15 – 30 мин.

2. Первый опыт проводится с перегретым водяным паром, и электрический нагреватель должен быть включен. Если расход охлаждающей воды определяется с помощью расходомера, опыт начинается со снятия его показания в момент начала сбора конденсата в мерный стакан. Окончанием опыта является момент наполнения мерного стакана (500 мл конденсата) и повторное снятие показания расходомера. При недостаточном напоре охлаждающей воды для определения ее расхода вместо расходомера используется мерная емкость с секундомером. В этом случае расход определяется заранее до начала опыта, при этом фиксируется время начала и окончания замера. В течение опыта с интервалом в минуту измеряются и заносятся в журнал наблюдений следующие величины: температура t_I, t_{II} и давление пара в камерах P_I, P_{II} ; температура конденсата t_k ; температура охлаждающей воды на входе t_{ex} и выходе $t_{вых}$ из калориметра. Кроме того, в журнал наблюдений заносятся барометрическое давление $P_б$ и комнатная температура $t_в$.

3. Второй опыт проводится с насыщенным водяным паром. Все действия остаются прежними, но при этом необходимо отключить электрический нагреватель.

Журнал наблюдений

№ опыта	Экспериментальные данные														i кДж/кг	
	τ с	W Вт	P_I МПа	P_{II} МПа	P_{δ} мм рт.ст.	t_I мВ °С		t_{II} мВ °С		t_k °С	$t_{\text{охл. воды}}$		t_6 °С	масса		
											$t_{\text{вх}}$ °С	$t_{\text{вых}}$ °С		m_k кг		$m_{\text{в.}}$ кг
перегретый пар																
1																
2																
3																
насыщенный пар																
1																
2																
3																

Техника безопасности. При проведении эксперимента следует соблюдать правила электробезопасности, так как парогенератор и электрический нагреватель подключены к сети 220 В. При работе с парогенератором необходимо соблюдать «Правила безопасности сосудов работающих под давлением».

5.4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Перевести значения термо-э.д.с. термопар в градусы при помощи градуировочной таблицы (см. таблицу на лабораторном стенде). Рассчитать средние за опыт величины.

2. Окончательная формула, по которой выполняется расчет значения энтальпии пара как в перегретом, так и насыщенном состоянии, устанавливается из первого закона термодинамики (5.1). Поскольку процесс дросселирования считается адиабатным ($dq=0$), техническая работа не совершается ($dl_{tex}=0$), изменение потенциальной энергии отсутствует ($gdz=0$), то $di=0$. Следовательно, справедливо выражение

$$i_I = i_{II}. \quad (5.2)$$

В последнем выражении индексы «I» и «II» означают первую и вторую камеры установки (значение энтальпии находится для параметров пара, находящегося в первой камере). В силу равнозначности величин энтальпий в первой и второй камерах обозначим их значение через i_n .

Поскольку процесс конденсации пара в калориметре является изобарным, то количество подведенной (отведенной) теплоты q равно разности энтальпий конечного и начального состояний. Тогда энтальпию конденсата i_k можно определить по формуле

$$i_k = i_n + q. \quad (5.3)$$

Считая, что тепловые потери в калориметре отсутствуют и вся энергия передается охлаждающей воде, представим ее через уравнение теплового баланса в виде

$$qm_k = m_w c_p^w (t_{вых} - t_{вх}), \quad (5.4)$$

где c_p^w - изобарная теплоемкость охлаждающей воды, которую можно принять равной 4,19 кДж/(кг·К).

Энтальпию конденсата можно определить, задавшись точкой отсчета, в качестве которой обычно принимается температура 0°C. В этом случае энтальпия конденсата равна произведению его изобарной теплоемкости и температуры. Окончательная формула для расчета энтальпии пара i_n примет вид

$$i_n = c_p^k t_k + \frac{m_w c_p^w (t_{вых} - t_{вх})}{m_k}, \quad (5.5)$$

В последнем выражении величину изобарной теплоемкости конденсата c_p^k можно принять равной теплоемкости воды c_p^w . Для более точных расчетов значения теплоемкостей c_p^k и c_p^w следует принимать по справочным табличным данным в зависимости от теплоемкости.

5.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определить величину потери работоспособности пара в результате процесса дросселирования?
2. В чем заключается процесс дросселирования и как меняются в нем термические и калориметрические параметры?
3. Каковы особенности процесса дросселирования влажного пара?
4. Как определить теплоту парообразования до дросселирования, используя параметры пара, полученные по диаграмме?
5. Как пользоваться $i - S$ диаграммой водяного пара при определении параметров пара и расчете процессов?
6. Как изображать цикл Ренкина в $i - S$ диаграмме?
7. Как влияет процесс дросселирования на начальные параметры цикла Ренкина?

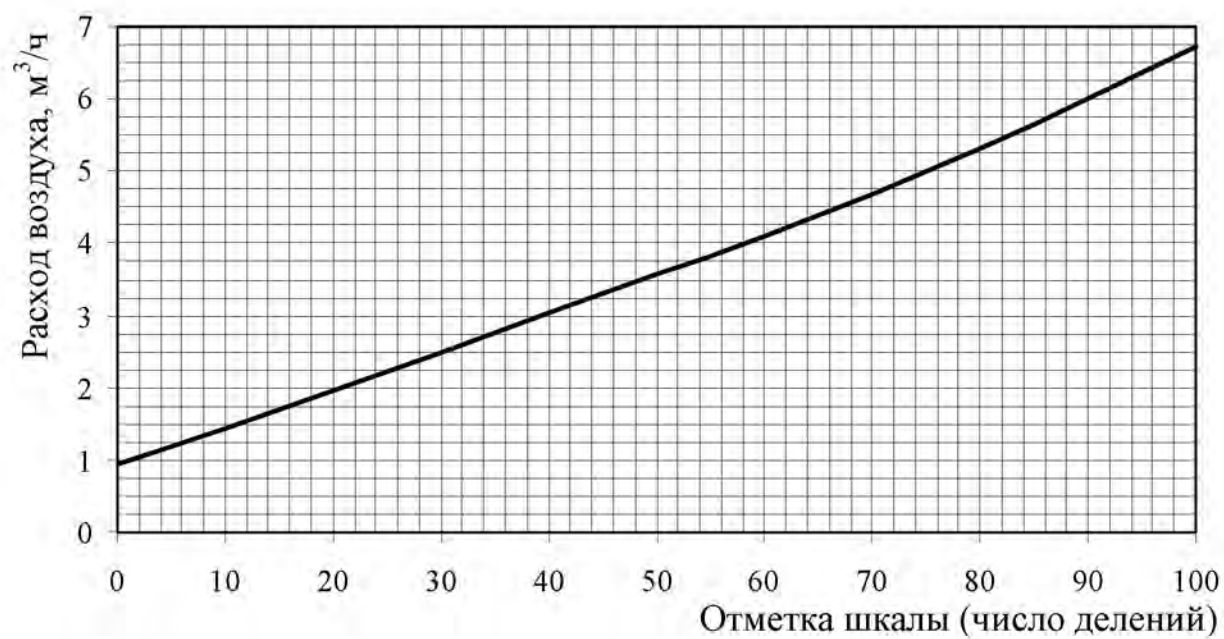
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика: учеб. / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – М.: Энергия, 1974. – 412 с.
2. Курносов, А.Т. Техническая термодинамика: учеб. пособие / А.Т. Курносов, Д.Н. Китаев.; Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. - Воронеж, 2007. – 110 с.
3. Зубарев, В.Н. Практикум по технической термодинамике: учеб. / В.Н. Зубарев, А.Л. Александров. – М.: Энергия, 1971. – 296 с.
4. Зеленцов, Д.В. Техническая термодинамика: Учебное пособие / Зеленцов Д.В.: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2012. - 140 с.
5. Мирам, А.О. Техническая термодинамика. Тепломассообмен / А.О. Мирам. - М. : АСВ, 2011 (М. : ППП "Тип. "Наука"). - 351 с.

Переводные множители для ряда единиц измерения физических величин

Наименование величины	Единица измерения	Перевод и единицы системы СИ
Сила Давление	1 кгс (килограмм-сила) 1 ат (техническая) 1 ат (физическая) 1 мм вод. столба 1 мм рт. столба 1 кгс/см ² 1 бар 1 Па (Паскаль) 1 МН (Меганьютон)	9,80665 Н 98066,5 Па 101325 Па 9,80665 Па 133,322 Па 98066,5 Па 10 ⁵ Па 1 Н/м ² 10 ⁶ Па
Объемный расход	1 м ³ /ч	277,8 · 10 ⁻⁶ м ³ /с
Энергия Работа	1 кгс·м 1 ккал	9,80665 Дж 4186,8 Дж
Мощность	1 кгс·м/с 1 ккал/ч	9,80665 Вт 1,163 Вт

График для определения расхода воздуха по ротаметру



Термо-э.д.с. термоэлектрических термометров типа медь-константан
при температуре холодного спая 0 °С

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,0	0,27	0,074	0,110	0,147	0,184	0,221	0,257	0,294	0,331
10	0,368	0,405	0,442	0,478	0,516	0,553	0,590	0,627	0,664	0,701
20	0,737	0,775	0,813	0,851	0,889	0,927	0,965	1,003	1,041	1,079
30	1,117	1,156	1,194	1,233	1,271	1,310	1,349	1,387	1,426	1,464
40	1,503	1,543	1,582	1,622	1,672	1,701	1,741	1,781	1,821	1,860
50	1,900	1,941	1,981	2,021	2,062	2,102	2,143	2,183	2,224	2,264
60	2,305	2,345	2,38	2,427	2,468	2,503	2,549	2,590	2,631	2,671
70	2,712	2,753	2,796	2,837	2,879	2,921	2,963	3,005	3,046	3,088
80	3,130	3,173	3,215	3,258	3,300	3,343	3,385	3,423	3,471	3,513
90	3,556	3,599	3,642	3,685	3,728	3,772	3,815	3,858	3,901	3,944
100	3,987	4,031	4,075	4,110	4,163	4,207	4,252	4,296	4,340	4,384
110	4,423	4,468	4,511	4,533	4,600	4,643	4,688	4,731	4,774	4,818
120	4,863	4,906	4,950	4,995	5,038	5,071	5,124	5,169	5,212	5,258
130	5,003	5,342	5,387	5,431	5,472	5,520	5,561	5,604	5,649	5,691
140	5,736	5,778	5,822	5,864	5,91	5,952	5,998	6,040	6,075	6,126
150	6,171	6,214	6,259	6,300	6,346	6,390	6,432	6,479	6,521	6,561
160	6,610	6,651	6,696	6,740	6,782	6,830	6,871	6,919	6,96	7,002
170	7,060	7,091	7,135	7,180	7,221	7,268	7,311	7,352	7,339	7,441
180	7,482	7,529	7,571	7,613	7,659	7,701	7,742	7,778	7,832	7,874
190	7,918	7,964	8,006	8,050	8,092	8,134	8,180	8,223	8,826	8,310
200	8,352	8,399	8,441	8,487	8,530	8,572	8,618	8,661	8,702	8,749

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа №1.	
Определение газовой постоянной воздуха.....	5
Лабораторная работа №2.	
Определение средней объемной изобарной теплоемкости воздуха.....	9
Лабораторная работа №3.	
Определение показателя адиабаты воздуха.....	14
Лабораторная работа №4.	
Исследование процессов во влажном воздухе.....	19
Лабораторная работа №5.	
Определение энтальпии водяного пара при помощи адиабатного дросселирования.....	25
Библиографический список.....	32
Приложение П.1. Переводные множители для ряда единиц измерения физических величин.....	33
Приложение П.2. График для определения расхода воздуха по ротаметру.....	34
Приложение П.3. Термо-э.д.с. термоэлектрических термометров типа медь-константан при температуре холодного спая 0°C.	35

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВ

*Методические указания
к выполнению лабораторных работ
дисциплины «Техническая термодинамика» для студентов
направления подготовки 08.03.01 «Строительство»,
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,
21.03.01 «Нефтегазовое дело»
всех форм обучения*

Составители: Китаев Дмитрий Николаевич,
Мартыненко Галина Николаевна

Редактор Наталья Николаевна Аграновская

Подписано в печать _____ 2021.

Формат 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 2,0. Тираж ____ экз.

Заказ № _____

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский просп., 14