

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания к лабораторным работам
для студентов специальности
1-43 01 07 «Техническая эксплуатация
энергооборудования организаций»

В двух частях
Часть I

Витебск
2018

УДК 621.036.7 (075.8)

Составители:

В. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. А. Котов и др.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 9 от 30.11.2018.

Техническая термодинамика : методические указания к лабораторным работам. В двух частях. Ч. I / сост. В. И. Ольшанский [и др.]. – Витебск : УО «ВГТУ», 2018. – 64 с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по курсу «Техническая термодинамика» студентами специальности 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.036.7 (075.8)

© УО «ВГТУ», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа 1. Измерение давления	5
Лабораторная работа 2. Измерение температуры	14
Лабораторная работа 3. Определение газовой постоянной воздуха	23
Лабораторная работа 4. Определение объемной изобарной теплоемкости воздуха	29
Лабораторная работа 5. Определение показателя адиабаты воздуха	37
Лабораторная работа 6. Определение параметров состояния влажного воздуха	43
Лабораторная работа 7. Исследование процесса истечения газа через суживающееся сопло	51
Литература	61
Приложения	62

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по курсу «Техническая термодинамика» студентами специальности 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной и заочной форм обучения.

Основное назначение лабораторных работ – дать студентам материал, который позволит выработать навыки применения теоретических сведений для решения конкретных задач технического характера и тем самым освоить практику и методику термодинамических расчетов:

- 1) выбор оптимальных режимов эксплуатации энергетических объектов (систем) для повышения технико-экономических показателей режимов их работы;
- 2) диагностирование и мониторинг состояния энергетического и энерготехнологического оборудования, включая экологические параметры;
- 3) выявление причин повреждений элементов энергетического и энерготехнологического оборудования, их учет, разработка предложения по их предупреждению;
- 4) снижение потерь топливно-энергетических ресурсов.

Методические указания включают в себя лабораторные работы по основным разделам технической термодинамики. Каждая лабораторная работа содержит краткие сведения из теории, касающиеся материала раздела.

Методически лабораторные работы составлены так, что студенты могут выполнить сравнительный анализ теоретических значений основных термодинамических параметров с практическими, реальными их значениями.

Выполнение лабораторных работ предполагает знание студентами основных теоретических положений курса технической термодинамики, соответствующей терминологии, уравнений и формул.

Для лучшего освоения студентами основ технической термодинамики, а также развития самостоятельного инженерного мышления рекомендуется после обработки экспериментальных данных и оформления отчета по лабораторной работе проанализировать полученные результаты и выяснить влияние на них различных факторов.

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы: изучение различных приборов для измерения давления и опытное определение величины давления воздуха.

Теоретическое введение

Одним из трех основных термодинамических параметров состояния вещества, наряду с температурой и удельным объемом, является давление. Давление p характеризует интенсивность воздействия сил на поверхность какого-либо тела и представляет собой отношение силы P , равномерно распределенной по перпендикулярной к ней поверхности, к площади этой поверхности F :

$$p = \frac{P}{F}. \quad (1.1)$$

В международной системе единиц (СИ) давление измеряется в паскалях (Па). $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

В технической системе единиц (МКС) давление измеряется в кг/м^2 . $1 \text{ кг/м}^2 = 9,81 \text{ Па}$.

В физической системе единиц (СГС) давление измеряется в дин/см^2 . $1 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ Па}$.

Величина давления может быть выражена высотой h создающего его столба жидкости согласно выражению

$$p = \rho \cdot g \cdot h, \quad (1.2)$$

откуда

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g}, \quad (1.3)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 , $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения. В качестве рабочей жидкости при этом чаще всего используют дистиллированную воду (с плотностью $\rho_{\text{в.}} = 1000 \text{ кг/м}^3$) или ртуть (с плотностью $\rho_{\text{рт.}} = 13595 \text{ кг/м}^3$) и давление выражают соответственно в миллиметрах водяного столба (*мм вод. ст.*) или ртутного столба (*мм рт. ст.*).

Существуют также и различные внесистемные единицы для измерения давления, из которых наиболее часто используются бар и атмосфера (техническая и физическая).

$$1 \text{ бар} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа}.$$

Техническая атмосфера (*ат*) – давление воздуха на высоте 200 м над уровнем моря, в среднем равное 1 кг/см^2 , то есть

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 10000 \text{ кг/м}^2 = 98100 \text{ Па}.$$

Физическая атмосфера (*атм*) – давление воздуха на уровне моря на географической широте 45°, соответствующее так называемым нормальным физическим условиям. $1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101325 \text{ Па}$.

В англоязычных странах (Великобритании, США и некоторых других) давление измеряется в *psi* (pound-force per square inch, lb/in^2 – фунт силы на квадратный дюйм) $1 \text{ psi} = 6894,76 \text{ Па}$.

Различают абсолютное $p_{\text{абс.}}$, избыточное $p_{\text{изб.}}$ и вакуумметрическое $p_{\text{вак.}}$ давление.

Абсолютным называется такое давление, которое отсчитывается от абсолютного нуля давлений (абсолютного вакуума). Именно значения абсолютного давления используются в термодинамических расчетах.

На практике величина давления обычно измеряется относительно атмосферного, или барометрического, давления $p_{\text{бар.}}$. Если при этом абсолютное давление будет больше барометрического ($p_{\text{абс.}} > p_{\text{бар.}}$), то разность между абсолютным и барометрическим давлением называется избыточным давлением

$$p_{\text{изб.}} = p_{\text{абс.}} - p_{\text{бар.}}; \quad (1.4)$$

если же абсолютное давление будет меньше барометрического ($p_{\text{абс.}} < p_{\text{бар.}}$), то разность между барометрическим и абсолютным давлением называется вакуумметрическим давлением (вакуумом):

$$p_{\text{вак.}} = p_{\text{бар.}} - p_{\text{абс.}} \quad (1.5)$$

Для измерения давления применяются различные приборы: манометры – для измерения избыточного давления, вакуумметры – для измерения вакуума, дифференциальные манометры – для измерения разности, или перепада, давлений. Все указанные приборы могут быть жидкостными, пружинными, поршневыми, электрическими и комбинированными. На практике наиболее широкое распространение получили жидкостные и пружинные приборы.

Простейшим прибором для измерения избыточного давления жидкостей является пьезометр (рис. 1.1), представляющий собой вертикально расположенную стеклянную трубку. Нижний конец этой трубки присоединяется к резервуару с жидкостью, давление которой необходимо измерить, верхний конец остается открытым и сообщается с атмосферой. Величина избыточного давления в резервуаре будет определяться по высоте h столба жидкости в пьезометре согласно формуле (1.2).

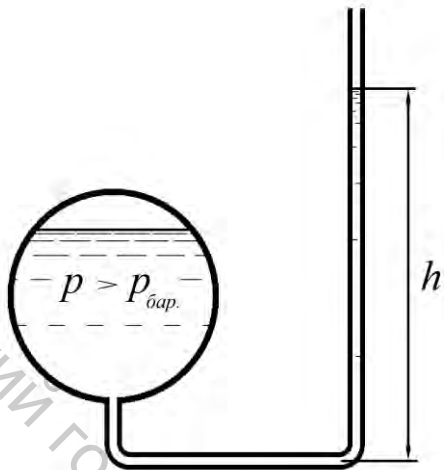


Рисунок 1.1 – Пьезометр

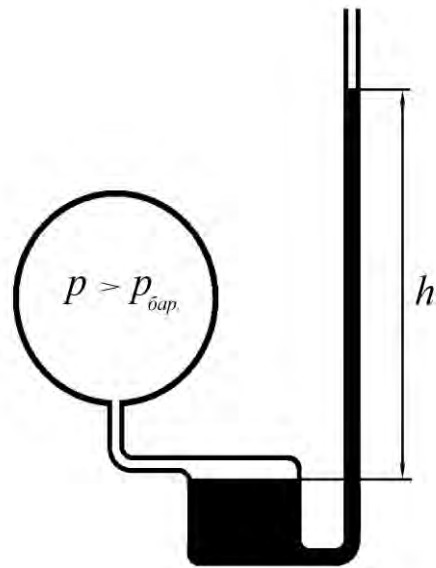


Рисунок 1.2 – Чашечный манометр

Для измерения давления газов к пьезометру необходимо присоединить емкость («чашку») с рабочей жидкостью, которая, в свою очередь, соединяется с резервуаром, давление газа в котором необходимо измерить. Поскольку площадь поперечного сечения емкости значительно больше, чем пьезометра, изменением уровня жидкости в ней можно пренебречь. Тогда величина избыточного давления в резервуаре будет определяться только по изменению высоты h столба жидкости в пьезометре. Такой прибор называется чашечным манометром (рис. 1.2).

В тех случаях, когда измерение давления необходимо производить с большой точностью, используются наклонные микроманометры (рис. 1.3), которые являются разновидностью чашечных манометров. Пьезометрическая трубка такого манометра расположена не вертикально, а наклонно, под некоторым углом α к горизонтальной плоскости. Вместо высоты h в этом случае измеряется гораздо большая длина столба жидкости в трубке l , что позволяет существенно уменьшить относительную ошибку, возможную при отсчетах малых величин. Тогда

$$l = \frac{h}{\sin \alpha}, \quad (1.6)$$

а величина измеряемого давления

$$p = \rho \cdot g \cdot l \cdot \sin \alpha. \quad (1.7)$$

Существуют микроманометры с постоянным и переменным углом наклона измерительной трубки. Уменьшение угла наклона при этом способствует увеличению чувствительности прибора.

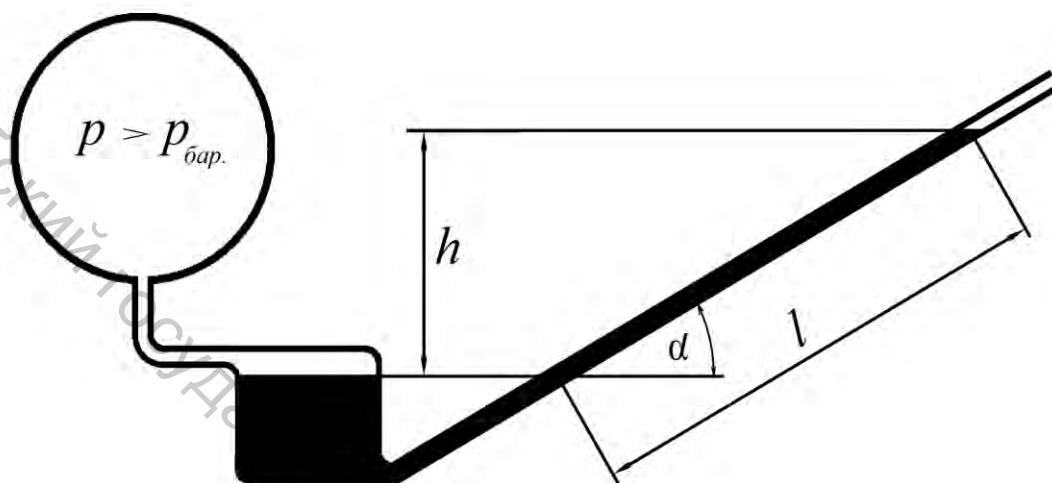


Рисунок 1.3 – Наклонный микроманометр

Простейший вакуумметр (рис. 1.4) фактически представляет собой перевернутый пьезометр. В этом случае верхний конец трубки пьезометра присоединяется к резервуару, давление в котором ниже атмосферного, нижний же ее конец опускается в сосуд с рабочей жидкостью. Величина разрежения (вакуума) в резервуаре будет определяться по высоте h подъема столба жидкости в трубке вакуумметра.

Наиболее универсальным жидкостным прибором для измерения давления является U-образный манометр (рис. 1.5). Он представляет собой изогнутую в виде буквы U стеклянную трубку с налитой в нее рабочей жидкостью. При подводе избыточного давления к одному из концов трубки рабочая жидкость будет вытесняться из этой половины трубки в другую, сообщающуюся с атмосферой, в результате чего возникнет разность уровней жидкости h , которая и будет определять величину измеряемого избыточного давления. Также U-образный манометр может использоваться в качестве вакуумметра и дифференциального манометра. В последнем случае оба конца трубки манометра присоединяются к двум резервуарам с различными давлениями p_1 и p_2 , и разность уровней рабочей жидкости будет показывать перепад этих давлений $\Delta p = p_1 - p_2$.

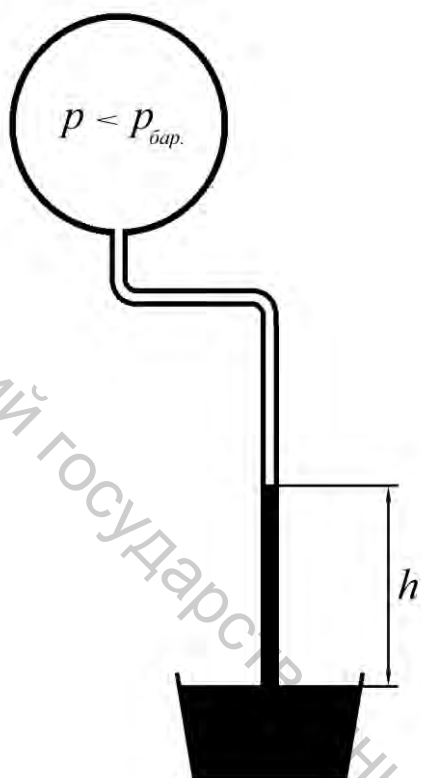


Рисунок 1.4 – Вакуумметр

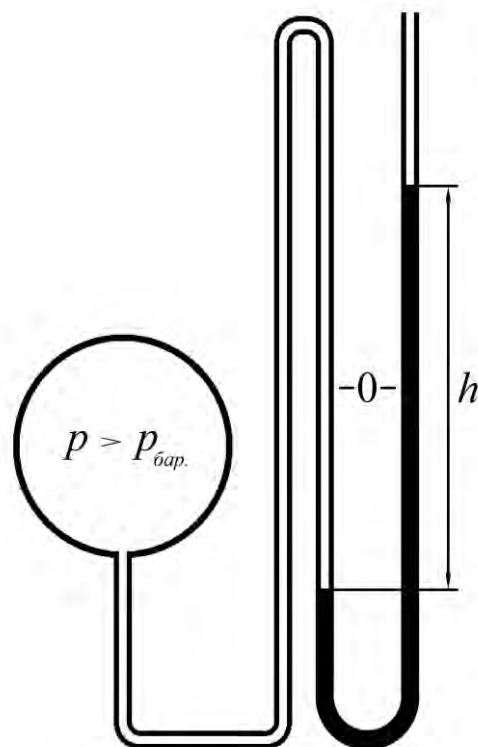


Рисунок 1.5 – U-образный манометр

Жидкостные манометры являются простыми, надежными и достаточно точными приборами, но предназначены они для работы только в спокойных условиях, поскольку чувствительны к ударам, вибрации и резким колебаниям давления. Кроме того, жидкостные манометры пригодны для измерения только сравнительно небольших давлений, что ограничивается длиной трубки прибора.

Наиболее широкое применение в практике измерения давления получили так называемые трубчатые или пружинные манометры (рис. 1.6). Основной рабочей частью такого манометра является изготовленная из стали или латуни изогнутая трубка 1, имеющая овальное сечение. Один, открытый, конец этой трубки закреплен в основании манометра 2, которое при помощи штуцера 3 может присоединяться к сосуду, давление в котором необходимо измерить. Второй конец трубки, закрытый, через зубчато-рычажный передаточный механизм 4 связан со стрелкой 5. При увеличении давления трубка разгибается и стрелка поворачивается вокруг своей оси. Угол поворота стрелки практически линейно зависит от величины давления.

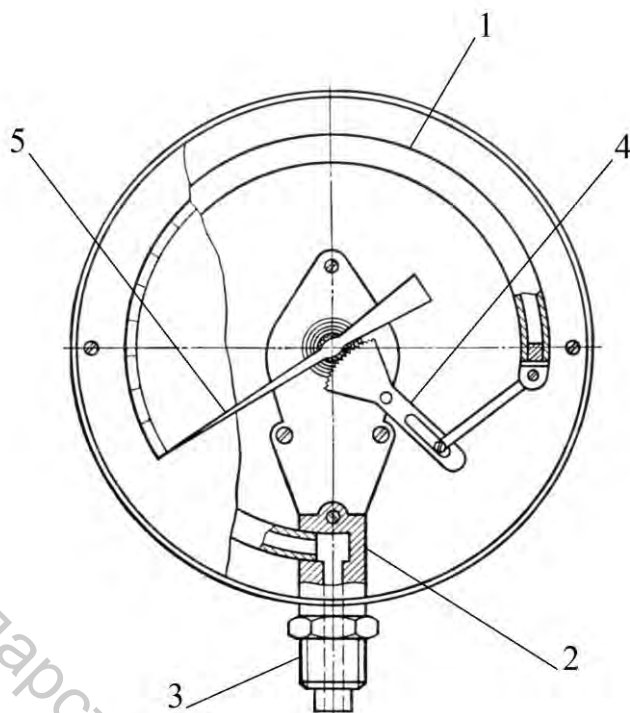


Рисунок 1.6 – Трубочатый манометр

Трубочатые манометры являются вторичными приборами и тарируются по первичным манометрам.

Точность трубчатого манометра ограничена наличием остаточных деформаций трубки, появляющихся во время работы прибора. Показания трубчатого манометра не очень стабильны, манометр следует не реже 1 раза в год тарировать с целью определения необходимых поправок.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 1.7) представляет собой модель жидкостного манометра. Она состоит из смонтированных на основании 1 сосуда с водой 2 и пьезометра 3, соединяющихся между собой просверленным в основании каналом. Также на основании рядом с пьезометром установлена шкала 4.

Через трубку 5, закрепленную в воздушном канале основания, сосуд с водой при помощи шланга 6 присоединяется к баллону 7. На баллоне смонтирован воздушный насос 8, оснащенный обратным клапаном 9 и предохранительным клапаном 10, предотвращающим перелив воды из пьезометра.

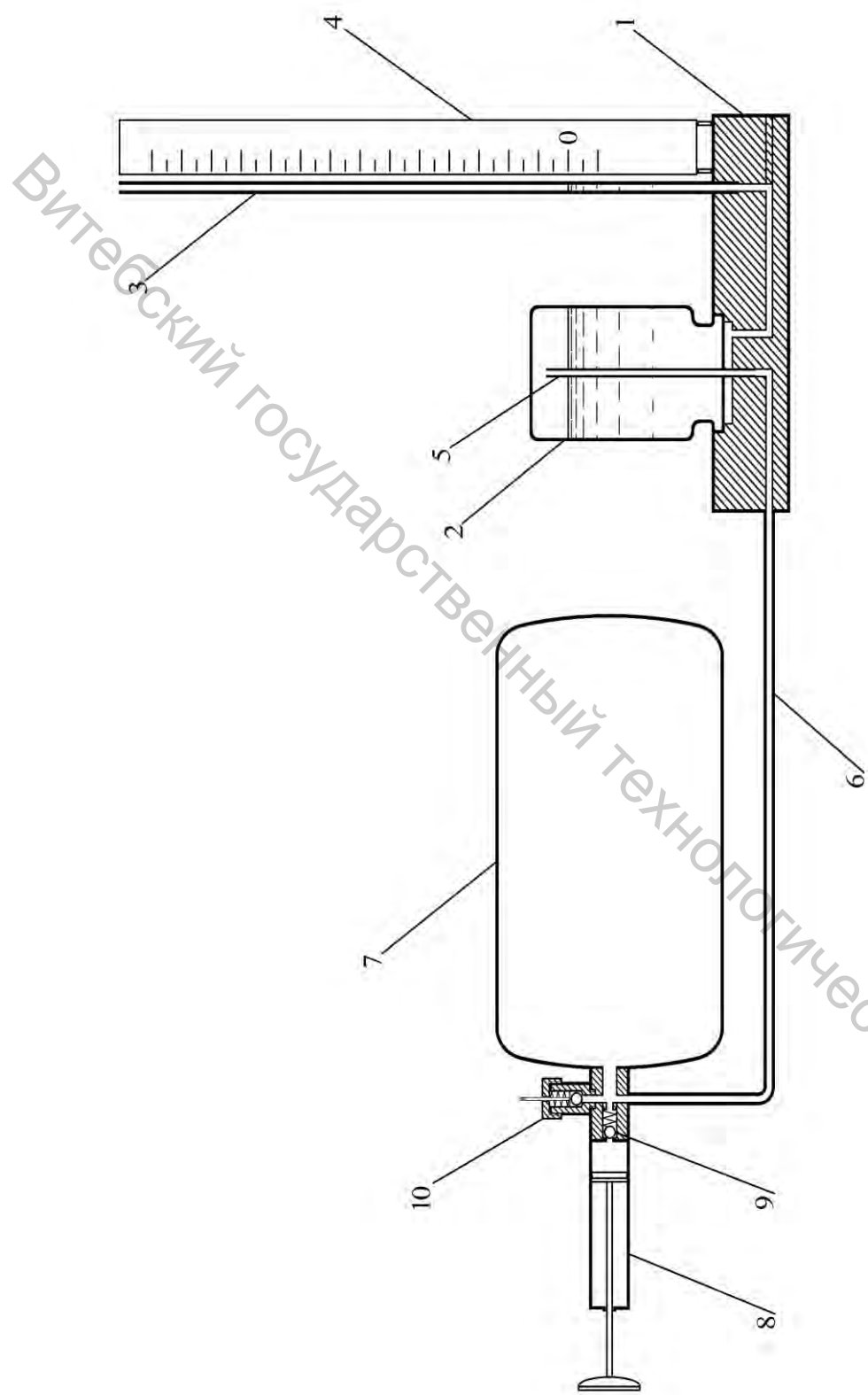


Рисунок 1.7 – Схема экспериментальной установки:

- | | |
|--------------------|-------------------------------|
| 1 – основание; | 6 – шланг; |
| 2 – сосуд с водой; | 7 – баллон; |
| 3 – пьезометр; | 8 – воздушный насос; |
| 4 – шкала; | 9 – обратный клапан; |
| 5 – трубка; | 10 – предохранительный клапан |

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

Перед началом проведения измерений необходимо выровнять давление воздуха в баллоне с атмосферным давлением, для чего следует потянуть за шток предохранительного клапана. После этого устанавливается нулевая отметка шкалы по уровню воды в трубке пьезометра. Затем постепенно, несколькими движениями поршня воздушного насоса, повышается давление в баллоне, при этом каждый раз записывая значения высоты столба воды h в пьезометре. Измерения проводятся 10–15 раз, до достижения максимального давления, на которое отрегулирован предохранительный клапан.

По измеренным данным согласно формуле (1.2) определяется величина избыточного давления воздуха в баллоне $p_{изб.}$.

$$p_{изб.} = \rho_{в.(t)} \cdot g \cdot h. \quad (1.8)$$

Значение плотности воды $\rho_{в.(t)}$ при этом определяется по таблице параметров воды (приложение Б) в зависимости от ее температуры, принимаемой равной температуре воздуха в помещении. При помощи барометра определяется величина барометрического давления на момент проведения опыта $p_{бар.}$, полученное значение переводится в Па.

В соответствии с формулой (1.4) определяется величина абсолютного давления в баллоне

$$p_{абс.} = p_{бар.} + p_{изб.} \quad (1.9)$$

Затем полученные значения переводятся из системы СИ в единицы других систем ($кГ/м^2$, $дин/см^2$, psi) и внесистемные единицы ($бар$, $ат$, $атм$) согласно соотношениям, приведенным в теоретическом введении настоящей работы. При определении давления в миллиметрах водяного столба и миллиметрах ртутного столба следует исходить из уравнения (1.3). Тогда

$$p(\text{мм вод. ст.}) = \frac{p(\text{Па})}{\rho_{в.} \cdot g} \cdot 1000, \quad (1.10)$$

$$p(\text{мм рт. ст.}) = \frac{p(\text{Па})}{\rho_{рт.} \cdot g} \cdot 1000. \quad (1.11)$$

Все результаты измерений и расчетов заносятся в таблицу, составленную по форме таблицы 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты измерений и расчетов

№ опыта	1	2	3	4	5
Показания пьезометра, <i>м</i>					
Абсолютное давление в баллоне <i>P_{абс.}</i>	<i>Па</i>				
	<i>кГ/м²</i>				
	<i>дин/см²</i>				
	<i>бар</i>				
	<i>ат</i>				
	<i>атм</i>				
	<i>мм вод. ст.</i>				
	<i>мм рт. ст.</i>				
	<i>psi</i>				

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Исходные данные для расчетов и расчетные формулы.
4. Таблицу результатов измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Что называется давлением?
2. Что называется избыточным и вакуумметрическим давлением?
3. В каких единицах измеряется давление в системе СИ?
4. В каких единицах измеряется давление в технической системе (МКГСС)?
5. В каких единицах измеряется давление в физической системе (СГС)?
6. Что такое бар?
7. Что такое техническая атмосфера?
8. Что такое физическая атмосфера?
9. Что представляют собой и как работают пьезометр и вакуумметр?
10. В чем состоит преимущество наклонного микроманометра?
11. Как работает трубчатый манометр?

Лабораторная работа 2

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучение различных методов измерения температуры и практическое проведение градуировки термометра.

Теоретическое введение

Одним из трех основных термодинамических параметров состояния вещества, наряду с давлением и удельным объемом, является температура. Температура характеризует степень нагретости вещества и является функцией средней кинетической энергии его частиц.

В отечественной практике в настоящее время используется две температурные шкалы: международная стогоградусная практическая температурная шкала, или шкала Цельсия, и абсолютная термодинамическая температурная шкала, или шкала Кельвина.

Температура по шкале Цельсия обозначается t и измеряется в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). За нулевую отметку этой шкалы принимается температура плавления льда, а температуре кипения воды при нормальном атмосферном давлении соответствует значение 100°C . Таким образом, один градус Цельсия равен одной сотой части интервала температур плавления льда и кипения воды

$$1^{\circ}\text{C} = \frac{1}{100}(t_{\text{кип.}} - t_{\text{пл.}}). \quad (2.1)$$

Температура по шкале Кельвина, или абсолютная температура, обозначается T , измеряется она в градусах Кельвина или кельвинах ($^{\circ}\text{K}$, K). При этом величина одного градуса по шкале Цельсия и по шкале Кельвина совпадает ($1^{\circ}\text{C} = 1^{\circ}\text{K}$), соответственно, и разности температур также будут одинаковы ($\Delta t = \Delta T$), а нулевая отметка шкалы Кельвина лежит на 273° (строго $-273,15$) ниже нулевой отметки шкалы Цельсия. Это значение, так называемый «абсолютный нуль» – самая низкая теоретически возможная температура, при которой полностью прекращается тепловое движение частиц вещества.

Значения температуры по Кельвину T и по Цельсию t , таким образом, связаны соотношением

$$T(^{\circ}\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273. \quad (2.2)$$

В англоязычных странах (Великобритания, США) для измерения температуры применяются шкалы Ренкина (T , $^{\circ}\text{R}$) и Фаренгейта (t , $^{\circ}\text{F}$), при этом нулевая отметка шкалы Ренкина совпадает с нулевой отметкой шкалы

Кельвина. Для пересчета температур, выраженных в этих шкалах, используются следующие соотношения:

$$T(^{\circ}R) = t(^{\circ}F) + 459,67; \quad (2.3)$$

$$T(^{\circ}K) = \frac{5}{9} \cdot T(^{\circ}R); \quad (2.4)$$

$$t(^{\circ}C) = \frac{5}{9} \cdot (t(^{\circ}F) - 32). \quad (2.5)$$

Численная величина температуры, согласно определению, однозначно связана с величиной средней кинетической энергии молекул вещества. Однако практически непосредственно измерить кинетическую энергию нельзя, и прибор, конструкция которого логически вытекала бы из определения температуры, в действительности создать невозможно. Поэтому для измерения температуры используют различные косвенные методы. Во всех этих методах используют измерение каких-либо свойств вещества, изменяющихся с температурой, и по величине изменения этих свойств судят об изменении температуры. Наиболее часто для определения температуры используют такие свойства рабочих веществ, как изменение давления в замкнутом объеме (газовый термометр), объемное расширение (жидкостный термометр), изменение электрического сопротивления (термометр сопротивления), возникновение термоэлектродвижущей силы (термопары), интенсивность излучения (пирометры излучения).

Эталонным прибором измерения температуры является газовый термометр постоянного объема. Теоретической предпосылкой его создания является наличие функциональной зависимости между давлением идеального газа, находящегося в сосуде с постоянным объемом, и его абсолютной температурой. Согласно закону Гей-Люссака, при $v = const$

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_1}{T_1}. \quad (2.6)$$

Газовый термометр (рис. 2.1) имеет сосуд, заполненный газом, чаще всего водородом или гелием, при небольшом давлении. К этому сосуду присоединен жидкостный ртутный манометр. Сосуд помещается в среду, температуру которой необходимо измерить. О температуре судят по давлению, измеряемому манометром (то есть высоте столба ртути h), согласно уравнению (2.6). Для сохранения постоянного объема газа при этом через трубку в манометр подается ртуть, чтобы при каждом измерении уровень ее в левой половине манометра находился на одной и той же отметке.

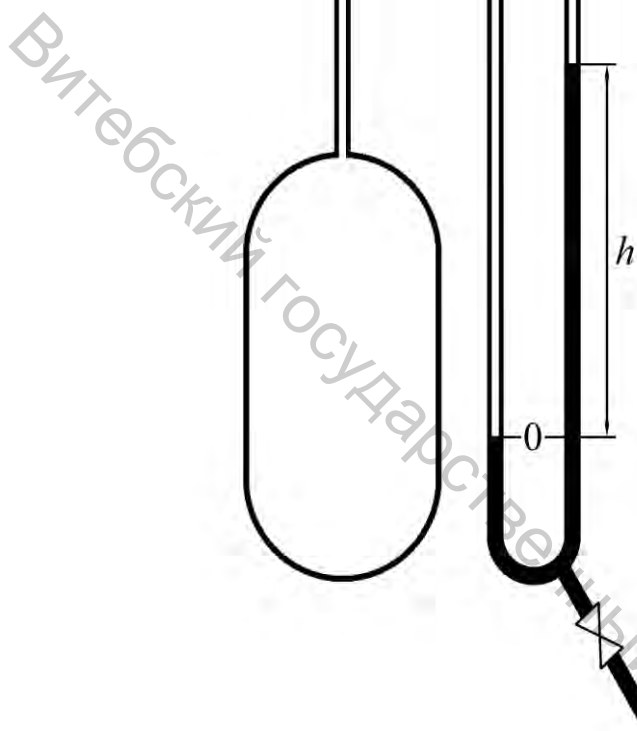


Рисунок 2.1 – Газовый термометр

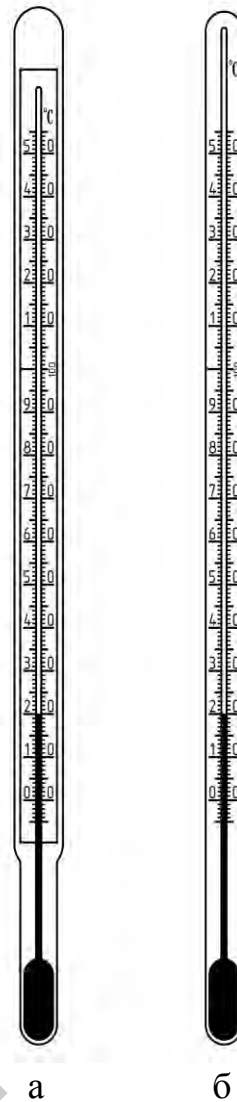


Рисунок 2.2 – Жидкостные термометры

Несмотря на принципиальную простоту, изготовление и использование газового термометра является чрезвычайно сложным. Поэтому он не используется для промышленных и даже для лабораторных измерений, а служит только первичным прибором для создания и уточнения Международной температурной шкалы.

Широко используется для измерения температуры физическое свойство тел изменять свой объем в зависимости от нагрева. На этом принципе основано устройство жидкостных стеклянных и механических термометров.

Наибольшее распространение благодаря своей простоте, дешевизне, достаточно высокой точности и удобству использования получили жидкостные стеклянные термометры (рис. 2.2), которые являются местными показывающими приборами и состоят из резервуара с рабочей жидкостью, капиллярной трубки и шкалы. Определение температуры с помощью жидкостных термометров осуществляется путем измерения высоты столба

рабочей жидкости в капилляре, изменяющейся вследствие ее теплового расширения в стеклянном резервуаре.

В качестве рабочих веществ в жидкостных стеклянных термометрах применяют ртуть, этиловый спирт и, реже, некоторые другие органические жидкости. Ртутные термометры могут применяться при измерении температур от $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при повышенном давлении в капилляре до $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$), спиртовые – от $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Жидкостные стеклянные термометры изготавливаются двух видов: со вложенной шкалой и палочные. Термометр со вложенной шкалой (рис. 2.2 а) имеет заполненный рабочей жидкостью резервуар, тонкостенную капиллярную трубку, пластинку из молочного стекла с нанесенной на ней шкалой и наружную цилиндрическую оболочку, в которой закреплены капилляр и шкальная пластинка. Наружная оболочка с одного конца закрыта, а с другого припаяна к резервуару. Палочный термометр (рис. 2.2 б) состоит из резервуара с рабочей жидкостью, соединенного с толстостенным капилляром, имеющим наружный диаметр 6–8 мм. Шкала термометра нанесена в виде насечки по стеклу непосредственно на наружной поверхности капилляра. Палочные термометры являются более точными, но термометры со вложенной шкалой удобнее в использовании.

Недостатками жидкостных стеклянных термометров являются их хрупкость, невозможность дистанционной передачи и автоматической записи показаний, большая инерционность.

Известно, что электрическое сопротивление металлов увеличивается при нагреве. Следовательно, зная зависимость сопротивления проводника от температуры и определяя величину этого сопротивления при помощи электроизмерительного прибора, можно судить о температуре проводника. Свойство металлических проводников изменять электрическое сопротивление в зависимости от температуры положено в основу конструкции электрических термометров сопротивления, получивших широкое применение для измерения температуры.

Термометр сопротивления (рис. 2.3) изготавливается из тонкой металлической проволоки, намотанной на каркас из электроизоляционного материала и помещенной в металлический защитный чехол. Чехол снабжен резьбовым штуцером, предназначенным для установки термометра в месте измерения температуры, и головкой, внутри которой находятся зажимы для присоединения внешних соединительных проводов.

Наиболее пригодными из металлов для изготовления термометров сопротивления являются платина и медь.

Платина считается наилучшим материалом для термометров сопротивления, она обладает большой химической инертностью и может быть легко получена в чистом виде. Верхний температурный предел применения платиновых термометров сопротивления из соображения механической прочности обмотки, изготовляемой из тонкой проволоки, ограничивается значением $650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

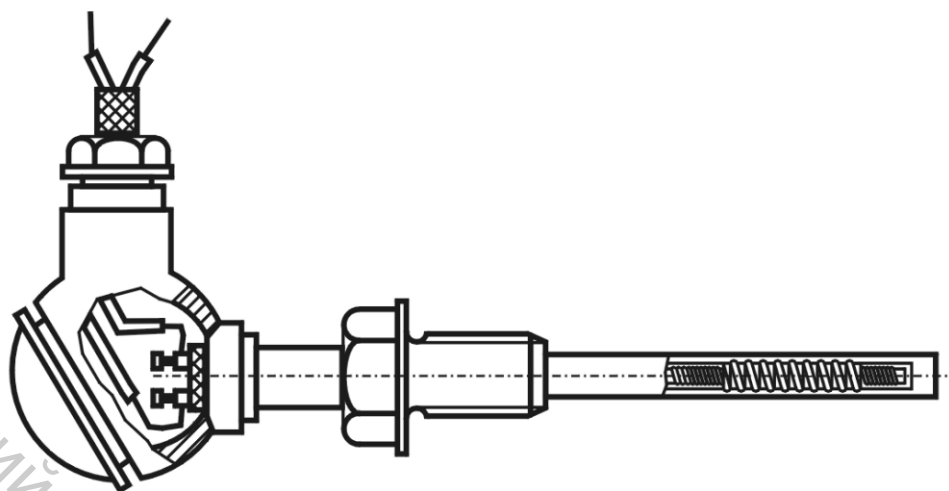


Рисунок 2.3 – Термометр сопротивления

Медь также часто используется в качестве материала для изготовления технических термометров сопротивления. К достоинствам меди относятся ее дешевизна и легкость получения в чистом виде, недостатком является легкая окисляемость при высоких температурах, вследствие чего верхний предел применения медных термометров сопротивления ограничивается температурой 180 °С.

Термометр сопротивления является первичным прибором, питаемым от постороннего источника тока и подключаемым к вторичному электроизмерительному прибору. Достоинствами термометров сопротивления являются высокая точность измерения, легкость осуществления дистанционной передачи и автоматической записи показаний и возможность присоединения к одному вторичному прибору при помощи переключателя нескольких однотипных термометров. Недостатком этого метода измерения температуры является потребность в постороннем источнике тока.

В основу термоэлектрического метода измерения температуры положен эффект Зеебека. Суть его заключается в том, что в разомкнутой цепи, составленной из двух различных проводников, спаи которых помещены в среды с различными температурами, возникает термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС), пропорциональная разности температур спаев.

Термоэлектрическую цепь, состоящую из двух разнородных проводников (проволоки из различного материала), называют термопарой. При изготовлении термопар могут использоваться различные металлы и сплавы: платина, платинородий (сплав 90 % платины и 10 % родия), хромель (сплав 90 % никеля и 10 % хрома), копель (сплав 56 % меди и 44 % никеля), алюмель (сплав 95 % никеля и 5 % алюминия) и некоторые другие.

Платинородий – платиновые термопары (ПП) обладают наибольшей точностью и являются эталонными измерителями для измерения температуры в

интервале 300–1600 °С, но имеют высокую стоимость.

Хромель-копелевые термопары (ХК) имеют наибольшую величину термо-ЭДС и могут использоваться до 600 °С.

Хромель-алюмелевые термопары (ХА) применяются до 1000–1200 °С и являются наиболее распространенными.

Один спай термопары, погружаемый в измеряемую среду, называют горячим (рабочим) спаем, а другой – холодным (свободным). Измерение температуры при помощи термопары возможно лишь при постоянной и точно известной температуре ее холодного спае $t_{х.с.}$. Экспериментально полученная зависимость термо-ЭДС термопары от температуры рабочего (горячего) спае $t_{г.с.}$ при постоянной температуре холодного спае, обычно равной 0 °С, называется градуировкой термопары. На основании этой зависимости составляются градуировочные таблицы и графики для практического пользования. Градуировочные таблицы хромель-алюмелевой и хромель-копелевой термопар приведены в приложениях (приложение В – градуировка ХА, приложение Г – градуировка ХК).

Если холодный спай термопары находится при температуре, отличной от 0 °С, то возникающая термо-ЭДС будет соответствовать разности температур горячего и холодного спаев. В этом случае при определении температуры необходимо вводить поправку на температуру холодного спае, для чего следует к измеренной величине термо-ЭДС прибавить термо-ЭДС, соответствующую температуре холодного спае, и по полученной величине при помощи градуировочных таблиц определить значение температуры.

Термопара также является первичным прибором, подключаемым к вторичному измерительному прибору. Вторичным прибором, измеряющим развиваемую термопарой ЭДС, служит чувствительный электроизмерительный прибор – милливольтметр или потенциометр.

Термопары получили исключительно широкое распространение как в лабораторной практике, так и в промышленности. Достоинствами термопар являются высокая чувствительность, большой предел измерения, незначительная инерционность, отсутствие постороннего источника тока и легкость осуществления дистанционной передачи показаний благодаря электрическому принципу действия.

С повышением температуры нагретого тела быстро возрастает интенсивность его излучения. Приборы, действие которых основано на измерении излучаемой телом энергии, зависящей от температуры и физико-химических свойств этого тела, называют пирометрами излучения. Пирометры излучения используются для измерения температуры нагретых тел в пределах 100–6000 °С и находят все более широкое применение. В отличие от других приборов, чувствительный элемент пирометра излучения при измерении не подвергается вредному влиянию высокой температуры и не искажает температурного поля, так как находится вне измеряемой среды.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 2.4) представляет собой нагревательную камеру 1, внутри которой находится электронагреватель 2, покрытую снаружи для предотвращения потерь тепла в окружающую среду теплоизоляцией 3. Также в нагревательной камере помещена емкость 4 с минеральным маслом, в которую погружены колба контактного термометра 5 и горячий спай исследуемой термопары 6. При помощи контактного термометра через блок управления 7 производится регулировка мощности электронагревателя и тем самым температуры в нагревательной камере. Исследуемая термопара присоединяется к потенциометру 8, которым осуществляется измерение развиваемой ей термо-ЭДС.

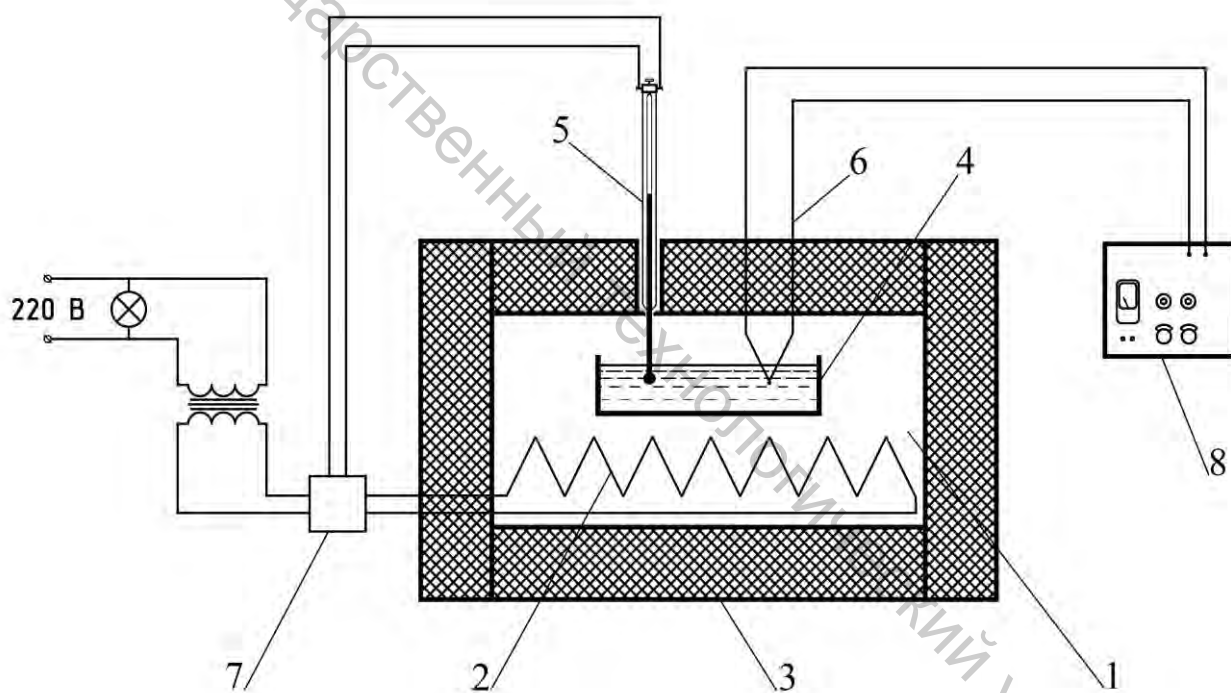


Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной установки:

- | | |
|----------------------------|---------------------------|
| 1 – нагревательная камера; | 5 – контактный термометр; |
| 2 – электронагреватель; | 6 – термопара; |
| 3 – теплоизоляция; | 7 – блок управления; |
| 4 – емкость с маслом; | 8 – потенциометр |

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

После включения установки при помощи контактного термометра устанавливается требуемое значение температуры в нагревательной камере, соответствующей температуре горячего спая термопары $t_{г.с.}$. Достижение этой температуры предварительно определяется по показаниям контактного термометра, после чего включается потенциометр и производится измерение ЭДС исследуемой термопары ($ЭДС_{он.}$). Окончательная стабилизация температуры определяется по неизменности значений ЭДС.

Далее измерения повторяются в интервале температур порядка 30–40° с шагом 1–2°.

Все полученные результаты измерений заносятся в таблицу, составленную по форме таблицы 2.1.

По градуировочным таблицам определяются соответствующие измеренным значениям $t_{г.с.}$ величины термо-ЭДС хромель-алюмелевой ($ЭДС_{ХА}$, приложение В) и хромель-копелевой ($ЭДС_{ХК}$, приложение Г) термопар. Найденные значения соответствуют температуре холодного спая термопар $t_{х.с.} = 0$ °С. Поскольку исследуемая термопара имеет температуру холодного спая равную температуре окружающей среды t_o , то эти значения необходимо также привести к температуре холодного спая $t_{х.с.} = t_o$, для чего следует от каждого из них отнять значение ЭДС, соответствующее температуре окружающей среды, найденное по тем же градуировочным таблицам. Температура окружающей среды определяется с помощью находящегося в помещении лаборатории термометра.

Все полученные значения также заносятся в таблицу, после чего по результатам строятся градуировочные кривые – графики зависимости ЭДС исследуемой и стандартных (хромель-алюмелевой и хромель-копелевой) термопар от температуры горячего спая $t_{г.с.}$ при $t_{х.с.} = t_o$, по которым делается вывод о типе исследуемой термопары.

Таблица 2.1 – Результаты измерений и расчетов

$t_{г.с.}, °C$	$ЭДС_{он.}, мВ$	$ЭДС_{ХА}, мВ$		$ЭДС_{ХК}, мВ$	
		при $t_{х.с.} = 0$ °С	при $t_{х.с.} = t_o$	при $t_{х.с.} = 0$ °С	при $t_{х.с.} = t_o$

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Исходные данные для расчетов и расчетные формулы.
4. Таблицу результатов измерений и расчетов.
5. Изображение градуировочных кривых стандартных и исследуемой термопар.

Контрольные вопросы

1. Что называется температурой?
2. Что такое градус Цельсия?
3. Какова связь между температурными шкалами Цельсия и Кельвина?
4. Что такое абсолютный нуль?
5. Каков принцип работы газового термометра?
6. Каков принцип работы жидкостного термометра?
7. Каков принцип работы термометра сопротивления?
8. Каков принцип работы термопары?
9. Каков принцип работы пирометра излучения?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ ВОЗДУХА

Цель работы: опытное определение величины газовой постоянной воздуха.

Теоретическое введение

Идеальными называют такие газы, в которых отсутствуют силы межмолекулярного взаимодействия, а сами молекулы представляют собой равномерно распределенные в объеме газа хаотически движущиеся материальные точки (когда объем самих молекул несоизмеримо меньше общего объема газа).

Состояние идеального газа может быть охарактеризовано тремя основными термодинамическими параметрами: давлением, температурой и удельным объемом. Связь между этими параметрами выражается параметрическим уравнением состояния идеального газа

$$p \cdot \nu = R \cdot T, \quad (3.1)$$

где p – абсолютное давление газа, Па; ν – удельный объем газа, м³/кг; T – абсолютная температура, °K; R – газовая постоянная, Дж/кг·град.

Известно, что для изобарного ($p = \text{const}$) термодинамического процесса выражение для определения работы расширения идеального газа может быть записано в следующем виде:

$$l = R \cdot (T_2 - T_1), \quad \text{Дж/кг}, \quad (3.2)$$

где T_1 и T_2 – соответственно начальная и конечная температуры процесса.

Принимая изменение температуры $\Delta T = (T_2 - T_1) = 1^\circ$, получаем, что $R = l$. Таким образом, газовая постоянная представляет собой величину, численно равную работе, совершаемой единицей массы идеального газа при нагревании его на 1 градус при постоянном давлении. Величина газовой постоянной идеального газа зависит от вида газа и не зависит от его состояния.

Иногда в термодинамических расчетах используется понятие универсальной газовой постоянной μR . Величина универсальной газовой постоянной соответствует работе, совершаемой единицей количества вещества (1 моль) идеального газа при нагревании его на 1 градус при постоянном давлении.

Численное значение универсальной газовой постоянной можно получить из параметрического уравнения состояния идеального газа, записанного для 1 моля газа при нормальных условиях

$$p_n \cdot V_\mu = \mu R \cdot T_n, \quad (3.3)$$

где $p_n = 101325 \text{ Па}$ – нормальное давление, $V_\mu = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$ – молярный объем газа при нормальных условиях, $T_n = 273 \text{ °К}$ – нормальная абсолютная температура. Отсюда

$$\mu R = \frac{p_n \cdot V_\mu}{T_n} = \frac{101325 \cdot 22,4 \cdot 10^{-3}}{273} = 8,314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}. \quad (3.4)$$

Соответственно, значение газовой постоянной для любого газа может быть вычислена по формуле

$$R = \frac{\mu R}{\mu} = \frac{8,314}{\mu}, \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}, \quad (3.5)$$

где μ – молекулярная масса газа, кг/моль .

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для определения газовой постоянной воздуха (рис. 3.1) состоит из металлического (из алюминиевого сплава Д16Т) цилиндрического сосуда 1, который при помощи шланга с зажимом 2 подсоединен к ручному поршневому воздушному насосу 3. Сосуд имеет наружный диаметр $d_{нар.} = 120 \text{ мм} = 0,12 \text{ м}$, наружную длину $l_{нар.} = 150 \text{ мм} = 0,15 \text{ м}$ и толщину стенок $\delta = 2 \text{ мм} = 0,002 \text{ м}$. Давление воздуха в сосуде измеряется с помощью соединенного с насосом ртутного дифференциального манометра 4.

Атмосферное (барометрическое) давление и температура окружающего воздуха измеряются соответственно с помощью находящихся в помещении лаборатории барометра и термометра. Для определения массы сосуда с воздухом используются лабораторные весы.

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

Сначала измеряются давление $p_{бар.}$ и температура t окружающего воздуха. Для выравнивания давления в сосуде с давлением окружающей среды открывают зажим на соединительном шланге, после чего взвешивают сосуд вместе со шлангом и зажимом. Полученное при этом первом взвешивании значение m_1 соответствует массе сосуда с воздухом при атмосферном давлении $p_{бар.}$.

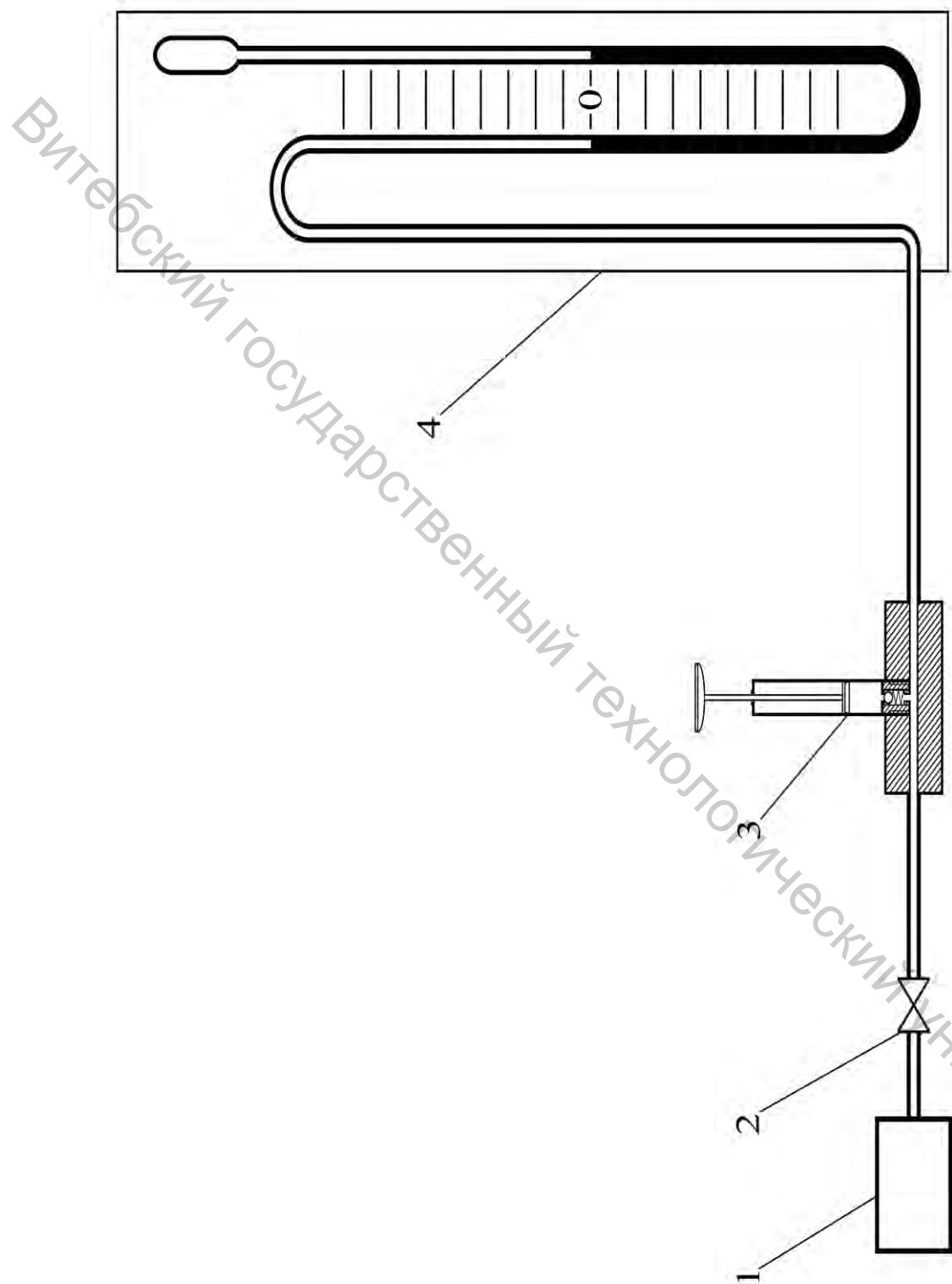


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – цилиндрический сосуд;
- 2 – зажим;
- 3 – воздушный насос;
- 4 – дифференциальный манометр

Затем сосуд подсоединяется к насосу и манометру. С помощью насоса в сосуд закачивается некоторое количество воздуха, в результате чего давление в сосуде повышается. Выждав несколько минут, до того момента, когда показания манометра не перестанут изменяться, что свидетельствует о выравнивании температуры воздуха в сосуде с температурой окружающей среды, фиксируют значение избыточного давления в сосуде $p_{изб.}$.

После этого зажимом перекрывается подача воздуха, сосуд отсоединяется от насоса и взвешивается для определения полной его массы m_n .

Измерения повторяются 5–7 раз при различных величинах избыточного давления. Все результаты измерений заносятся в таблицу, составленную по форме таблицы 3.1.

Объем воздуха в сосуде V , практически равный внутреннему объему этого сосуда, может быть рассчитан по формуле

$$V = \frac{\pi \cdot d_{вн.}^2}{4} \cdot l_{вн.}, \quad (3.6)$$

где $d_{вн.}$ – внутренний диаметр сосуда, м; $l_{вн.}$ – внутренняя длина сосуда, м.

Значение плотности воздуха ρ можно определить по таблице параметров воздуха (приложение А) в зависимости от температуры в помещении t . Тогда масса воздуха в сосуде при первом взвешивании будет

$$m_{в.1} = V \cdot \rho, \quad (3.7)$$

а масса самого сосуда (без воздуха)

$$m_0 = m_1 - m_{в.1}. \quad (3.8)$$

Масса воздуха в сосуде при последующих взвешиваниях тогда может быть найдена как

$$m = m_n - m_0. \quad (3.9)$$

Удельный объем воздуха

$$v = \frac{V}{m}, \quad (3.10)$$

абсолютное давление в сосуде, согласно формуле (1.9)

$$p_{абс.} = p_{бар.} + p_{изб.}$$

Величину газовой постоянной воздуха можно определить из параметрического уравнения состояния идеального газа (3.1)

$$R = \frac{P_{абс.} \cdot V}{T}, \quad (3.11)$$

а теоретическое ее значение $R_{теор.}$ – согласно формуле (3.5), принимая молекулярную массу воздуха $\mu = 28,9 \text{ кг/кмоль} = 28,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Сравнивая полученные значения, можно определить относительную погрешность опыта

$$\varepsilon = \frac{|R_{теор.} - R_{оп.}|}{R_{теор.}} \cdot 100\%. \quad (3.12)$$

Все результаты расчетов также заносятся в таблицу.

Таблица 3.1 – Результаты измерений и расчетов

$T, \text{ }^\circ\text{K}$						
$P_{бар.}$	<i>мм рт. ст.</i>					
	<i>Па</i>					
$V, \text{ м}^3$						
$m_0, \text{ кг}$						
№ опыта		1	2	3	4	5
$P_{изб.}$	<i>мм рт. ст.</i>					
	<i>Па</i>					
$p_{абс.}, \text{ Па}$						
$m_n, \text{ кг}$						
$m, \text{ кг}$						
$v, \text{ м}^3/\text{кг}$						
$R, \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$						
$\varepsilon, \%$						

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Исходные данные для расчетов и расчетные формулы.
4. Таблицу результатов измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Какой газ называется идеальным?
2. Какими основными термодинамическими параметрами характеризуется состояние идеального газа, их размерность?
3. Какой вид имеет уравнение состояния идеального газа?
4. Каков физический смысл газовой постоянной, ее размерность?
5. От чего зависит величина газовой постоянной?
6. Каков физический смысл универсальной газовой постоянной?
7. Чему равна величина универсальной газовой постоянной??
8. Как связаны газовая постоянная и универсальная газовая постоянная?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы: опытное определение величины средней объемной теплоемкости воздуха при постоянном давлении.

Теоретическое введение

Теплоемкость является одним из важнейших теплофизических параметров вещества, широко используемым при расчетах, связанных с определением количества теплоты. Как правило, при вычислениях используется величина удельной теплоемкости (отнесенной к единице рабочего тела), понятие полной теплоемкости практического применения не находит.

Удельной теплоемкостью в общем случае называется такое количество тепла, которое необходимо сообщить какой-либо единице вещества для повышения его температуры на один градус. В зависимости от того, что именно принимается за единицу вещества, различают три вида удельной теплоемкости: массовую, объемную и мольную.

Массовая теплоемкость c – количество тепла, которое необходимо сообщить единице массы вещества (одному килограмму) для повышения его температуры на один градус. Измеряется массовая теплоемкость в *Дж/кг·град*.

Объемная теплоемкость c' – количество тепла, которое необходимо сообщить единице объема вещества (одному кубическому метру) для повышения его температуры на один градус. Измеряется массовая теплоемкость в *Дж/м³·град*. Для газов, как правило, величина объемной теплоемкости относится к кубическому метру газа при нормальных физических условиях (давлении $p_n = 760$ мм рт. ст. и температуре $T_n = 273$ °К) и измеряется в *Дж/м_n³·град*.

Мольная теплоемкость μc – количество тепла, которое необходимо сообщить единице количества вещества (одному молю) для повышения его температуры на один градус. Измеряется массовая теплоемкость в *Дж/моль·град*.

Значения массовой и объемной теплоемкости связаны соотношением

$$c = c' \cdot v_o, \quad (4.1)$$

где v_o – удельный объем газа при нормальных условиях, *м³/кг*.

В общем случае величина теплоемкости зависит от физических свойств вещества, от характера протекания термодинамического процесса, от температуры, а для газов – также и от давления.

В зависимости от характера термодинамического процесса различают два вида теплоемкости: изобарную теплоемкость c_p , c'_p , μc_p – теплоемкость в

изобарном процессе, то есть протекающем при постоянном давлении ($p = const$) и изохорную теплоемкость $c_v, c_v', \mu c_v$ – теплоемкость в изохорном процессе, то есть протекающем при постоянном объеме ($V = const$).

Также различают понятия истинной и средней теплоемкости.

Истинной теплоемкостью называется такое элементарное (бесконечно малое) количество теплоты dq , которое при подведении к единице рабочего тела вызывает повышение его температуры на бесконечно малую величину dT

$$c = \frac{dq}{dT}. \quad (4.2)$$

На практике наиболее часто используется понятие средней теплоемкости, соответствующее подводу теплоты к рабочему телу в определенном конечном интервале температур. Средней теплоемкостью в некотором интервале температур называют количество теплоты, подводимое к единице рабочего тела для изменения его температуры в среднем на один градус из этого интервала. Определяется средняя теплоемкость в интервале температур от t_1 до t_2 как отношение всего подведенного на этом интервале удельного количества теплоты q_{1-2} ко всей разности температур $t_2 - t_1$

$$c|_{t_1}^{t_2} = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1}. \quad (4.3)$$

С учетом понятия средней теплоемкости количество теплоты может быть рассчитано как

$$Q = m \cdot c|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1), \text{ Вт}, \quad (4.4)$$

где m – массовый расход рабочего тела, кг/сек ; $c|_{t_1}^{t_2}$ – средняя массовая теплоемкость в интервале температур от t_1 до t_2 , $\text{Дж/кг}\cdot\text{град}$; или

$$Q = v \cdot c'|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1), \text{ Вт}, \quad (4.5)$$

где v – объемный расход рабочего тела, $\text{м}^3/\text{сек}$; $c'|_{t_1}^{t_2}$ – средняя объемная теплоемкость в интервале температур от t_1 до t_2 , $\text{Дж/кг}\cdot\text{град}$.

Формулы (4.4) и (4.5) могут быть преобразованы следующим образом:

$$Q = m \cdot (c|_0^{t_2} \cdot t_2 - c|_0^{t_1} \cdot t_1) \quad (4.6)$$

и

$$Q = v \cdot (c'_{|0}^{t_2} \cdot t_2 - c'_{|0}^{t_1} \cdot t_1), \quad (4.7)$$

где $c'_{|0}^{t_1}$, $c'_{|0}^{t_2}$, $c'_{|0}^{t_1}$, $c'_{|0}^{t_2}$ – соответственно значения средней массовой и объемной теплоемкости в интервале температур от 0 до t_1 и от 0 до t_2 .

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для определения объемной изобарной теплоемкости воздуха (рис. 4.1) представляет собой трубу 1 внутренним диаметром $d = 0,08$ м, покрытую снаружи для предотвращения потерь тепла в окружающую среду слоем теплоизоляции 2. Внутри трубы находится электронагреватель 3, мощность которого может регулироваться автотрансформатором 4 и измеряется при помощи ваттметра 5.

Вентилятором 6 по трубе прогоняется воздух, который нагревается, соприкасаясь с электронагревателем. Температура воздуха перед электронагревателем принимается равной температуре окружающей среды, измеряемой с помощью находящегося в помещении лаборатории термометра. Для измерения температуры воздуха после электронагревателя служит установленный в трубе термометр 7. Также внутри трубы по ее оси установлена пневмометрическая трубка (трубка Прандтля) 8, при помощи двух шлангов соединенная с микроманометром 9 типа ТНЖ-Н.

Известно, что полное давление движущегося потока жидкости или газа $p_{полн.}$ складывается из статического давления $p_{ст.}$, то есть давления, которое жидкость или газ развивает в состоянии покоя, и динамического давления, или динамического напора $p_{дин.}$, сообщаемого потоку каким-либо внешним воздействием (в данном случае – вентилятором)

$$p_{полн.} = p_{ст.} + p_{дин.} \quad (4.8)$$

При этом статическое давление действует одинаково во всех направлениях, а динамическое – только в направлении движения потока.

Пневмометрическая трубка (рис. 4.2) состоит фактически из двух трубок: внутренней и наружной. Внутренняя трубка имеет открытый конец, направленный навстречу потоку, и в нее отбирается полное давление потока $p_{полн.}$. Наружная трубка с торца закрыта, в ней сделаны радиальные отверстия, через которые отбирается статическое давление $p_{ст.}$. Полное давление из внутренней трубки подается к нижней части микроманометра, статическое давление из наружной трубки – к верхней его части. Таким образом, микроманометр будет показывать разность полного и статического давлений.

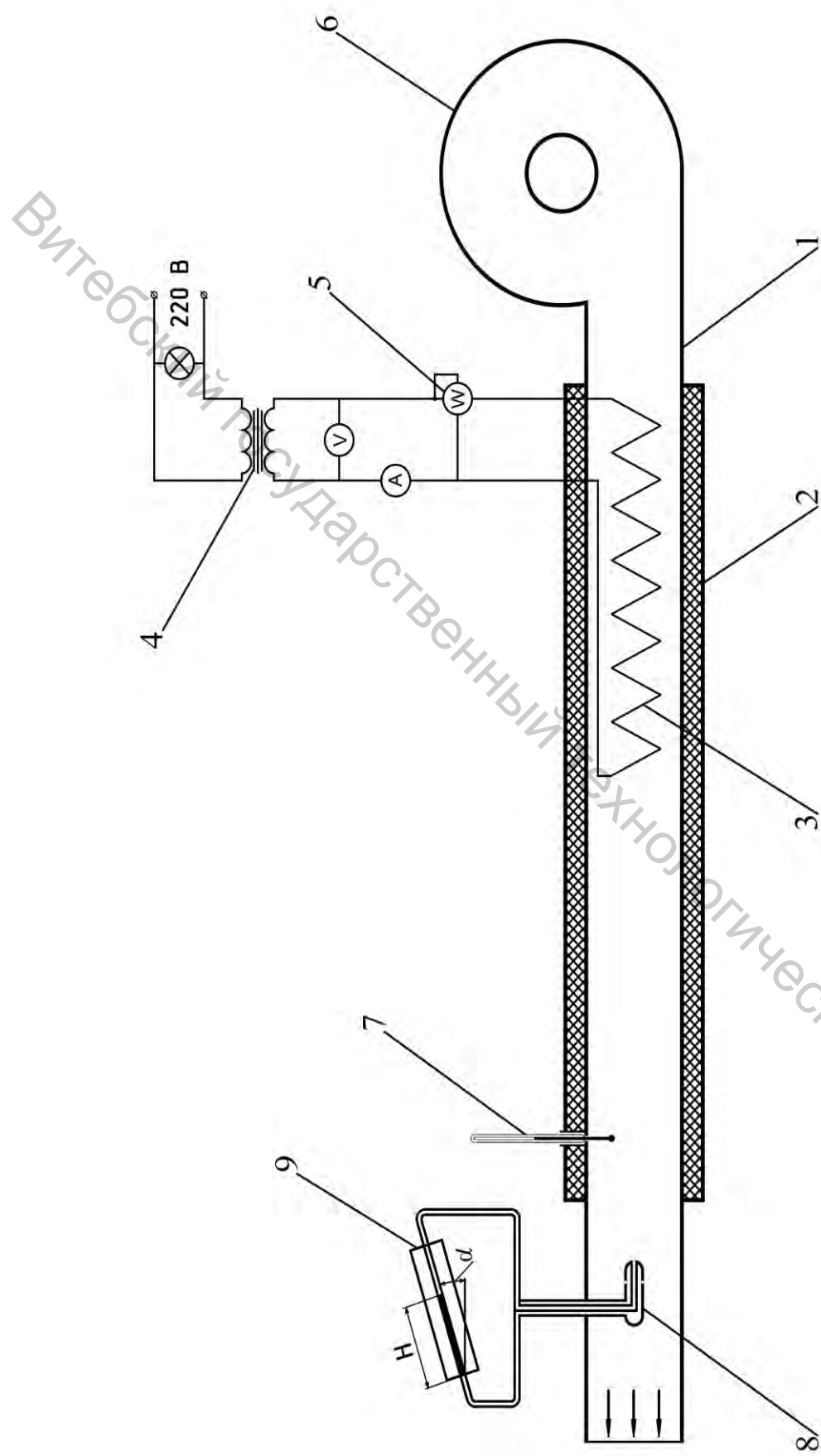


Рисунок 4.1 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – труба;
- 2 – теплоизоляция;
- 3 – электронагреватель;
- 4 – автотрансформатор;
- 5 – ваттметр;
- 6 – вентилятор;
- 7 – термометр;
- 8 – пневмометрическая трубка;
- 9 – микроанометр

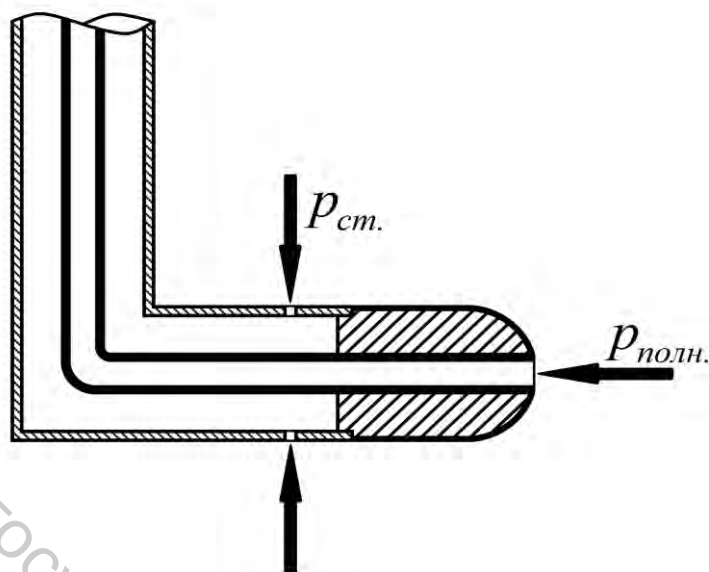


Рисунок 4.2 – Пневмометрическая трубка

Согласно выражению (4.8), эта разность будет равна динамическому напору $p_{дин.}$

$$P_{полн.} - P_{ст.} = P_{дин.} \quad (4.9)$$

Следовательно, в соответствии с формулой (4.9), при помощи пневмометрической трубки измеряется величина динамического напора потока воздуха как разность его полного и статического давлений.

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

Установка включается нажатием кнопки «Пуск» пакетного выключателя.

После включения установки автотрансформатором устанавливается величина мощности электронагревателя. При этом можно полагать, что мощность теплового потока Q , отдаваемого электронагревателем воздуху, численно равна электрической мощности электронагревателя, измеряемой ваттметром.

После выхода установки на стационарный режим (через 15–20 минут после включения), что определяется по неизменности показаний установленного на ней термометра, производится измерение температуры воздуха на входе в установку (в помещении лаборатории) t_1 и после электронагревателя t_2 , а также снимаются показания микроманометра H . При помощи барометра определяется величина барометрического давления на момент проведения опыта $p_{бар.}$

Измерения проводят несколько (3–5) раз, изменяя мощность

электронагревателя и, прикрывая заслонкой входное отверстие вентилятора, расход воздуха.

По показаниям микроманометра определяется динамический напор потока воздуха в трубе

$$p_{дин.} = H \cdot \sin \alpha, \text{ Па}, \quad (4.10)$$

где H – показания микроманометра, Па (поскольку шкала микроманометра проградуирован в мм вод. ст., измеренное значение необходимо перевести в Па), $\alpha = 15^\circ$ – угол наклона трубки микроманометра.

Согласно уравнению Бернулли

$$p_{дин.} = \frac{\rho \cdot w_o^2}{2}, \quad (4.11)$$

откуда осевая скорость потока воздуха в трубе

$$w_o = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{дин.}}{\rho}}, \quad (4.12)$$

где ρ – плотность воздуха. Значение плотности воздуха ρ определяется по таблице параметров воздуха (приложение А) в зависимости от его средней температуры.

Так как скорость воздуха в поперечном сечении трубы будет из-за трения изменяться от максимального значения на оси трубы до минимального у ее стенки, необходимо найти среднее значение скорости воздуха по всему сечению. Величину средней скорости воздуха $w_{cp.}$ можно рассчитать по осевой скорости w_o из соотношения

$$w_{cp.} = w_o \cdot k, \quad (4.13)$$

где k – скоростной коэффициент; для условий проведения опыта $k \approx 0,8$.

Зная среднюю скорость, можно определить объемный расход воздуха в установке

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot w_{cp.}, \quad (4.14)$$

где d – внутренний диаметр трубы установки, м.

Поскольку значения объемной теплоемкости газов, как правило, указываются при нормальных условиях, полученное значение объемного расхода воздуха необходимо также привести к нормальным условиям.

Приведенный к нормальным условиям объемный расход воздуха определяется по уравнению

$$v_n = v \cdot \frac{p_{бар.}}{p_n} \cdot \frac{T_n}{T_{cp.}}, \quad (4.15)$$

где $T_{cp.}$ – средняя абсолютная температура воздуха в установке

$$T_{cp.} = \frac{t_1 + t_2}{2} + 273. \quad (4.16)$$

Величину средней объемной изобарной теплоемкости воздуха можно найти по формуле

$$c_p' = \frac{Q}{v_n \cdot (t_2 - t_1)}. \quad (4.17)$$

Полученные результаты сравниваются с литературными данными. В справочных таблицах обычно приводятся значения массовой изобарной теплоемкости c_p . Найдя по таблице параметров воздуха (приложение А) значение, соответствующее средней температуре воздуха в установке, его следует перевести согласно соотношению (4.1), получив теоретическое значение объемной изобарной теплоемкости $c_{p' теор.}$. Учитывая, что удельный объем v_o – это величина, обратная плотности ρ , получаем

$$c_{p' теор.} = c_p \cdot \rho. \quad (4.18)$$

Сравнивая полученные значения, можно определить относительную погрешность опыта

$$\varepsilon = \frac{|c_{p' теор.} - c_p'|}{c_{p' теор.}} \cdot 100, \%$$

Все полученные результаты измерений и расчетов заносятся в таблицу, составленную по форме таблицы 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений и расчетов

№ опыта	1	2	3	4	5
$Q, Вт$					
$t_1, °C$					
$t_2, °C$					
$H, мм вод. ст.$					
$p_{дин.}, Па$					
$w_o, м/с$					
$w_{ср.}, м/с$					
$v, м^3/с$					
$v_n, м_n^3/с$					
$c_p', Дж/м_n^3 \cdot град$					
$\varepsilon, \%$					

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Исходные данные для расчетов и расчетные формулы.
4. Таблицу результатов измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Что называется удельной теплоемкостью?
2. Что называется массовой теплоемкостью, ее размерность?
3. Что называется объемной теплоемкостью, ее размерность?
4. Что называется мольной теплоемкостью, ее размерность?
5. Как связаны массовая и объемная теплоемкости?
6. От чего зависит величина теплоемкости?
7. Что называется истинной теплоемкостью?
8. Что называется средней теплоемкостью?
9. В чем состоит принцип действия трубки Прандтля?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА

Цель работы: опытное определение значения показателя адиабаты воздуха методом Клемана-Дезорма.

Теоретическое введение

Существует четыре вида основных термодинамических процессов: изобарный (при постоянном давлении, $p = const$), изохорный (при постоянном объеме, $V = const$), изотермический (при постоянной температуре, $t = const$) и адиабатный.

Количество тепла, которое необходимо затратить на нагревание какого-либо тела, определяется значением его теплоемкости. Величина теплоемкости зависит, в том числе, и от характера протекания термодинамического процесса. В зависимости от характера процесса различают два вида теплоемкости: изобарную c_p и изохорную c_v – соответственно теплоемкость в изобарном и изохорном процессах.

Если нагревание газа происходит при постоянном давлении, то газ будет расширяться. Часть подводимого тепла при этом, согласно первому закону термодинамики, пойдет на изменение внутренней энергии (нагревание газа), а часть – на совершение работы (расширение газа). В случае нагревания газа при постоянном объеме расширения не происходит, все сообщенное ему тепло идет только на изменение внутренней энергии газа. Поэтому для нагревания газа на одну и ту же температуру в изобарном процессе необходимо затратить большее количество тепла, чем в изохорном, то есть изобарная теплоемкость всегда будет больше изохорной

$$c_p > c_v. \quad (5.1)$$

Адиабатным называется процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, когда ни на одном элементарном участке процесса не происходит ни подвода, ни отвода тепла ($dQ = 0$). Работа в таком процессе может совершаться только за счет изменения внутренней энергии вещества, то есть работа и изменение внутренней энергии в адиабатном процессе будут одинаковы по величине и противоположны по знаку. На практике адиабатным может считаться процесс, протекающий в системе, окруженной теплоизоляционной оболочкой, препятствующей осуществлению теплообмена с окружающей средой, а так же очень быстро протекающий процесс, при котором система теплообмен с окружающей средой не успевает осуществить.

Уравнение адиабатного процесса имеет вид

$$p \cdot v^k = const, \quad (5.2)$$

где k – показатель адиабаты, определяемый по формуле

$$k = \frac{c_p}{c_v}. \quad (5.3)$$

Согласно молекулярно-кинетической теории, значение показателя адиабаты определяется числом степеней свободы молекулы газа и составляет для одноатомных газов $k = 1,67$, для двухатомных газов $k = 1,4$, для трехатомных газов $k = 1,33$.

Для практического определения показателя адиабаты может быть использован метод Клемана-Дезорма, основанный на осуществлении адиабатного и изохорного процессов. В начальном состоянии 1 (рис. 5.1), характеризуемом параметрами p_1, v_1, t_1 , в баллоне находится газ при повышенном давлении и температуре, равной температуре окружающей среды. Затем газ адиабатно расширяется до атмосферного давления, переходя в состояние 2, характеризуемое параметрами p_2, v_2, t_2 . Через некоторое время газ, находясь в закрытом баллоне, нагревается до температуры окружающей среды, переходя в состояние 3, характеризуемое параметрами p_3, v_3, t_3 .

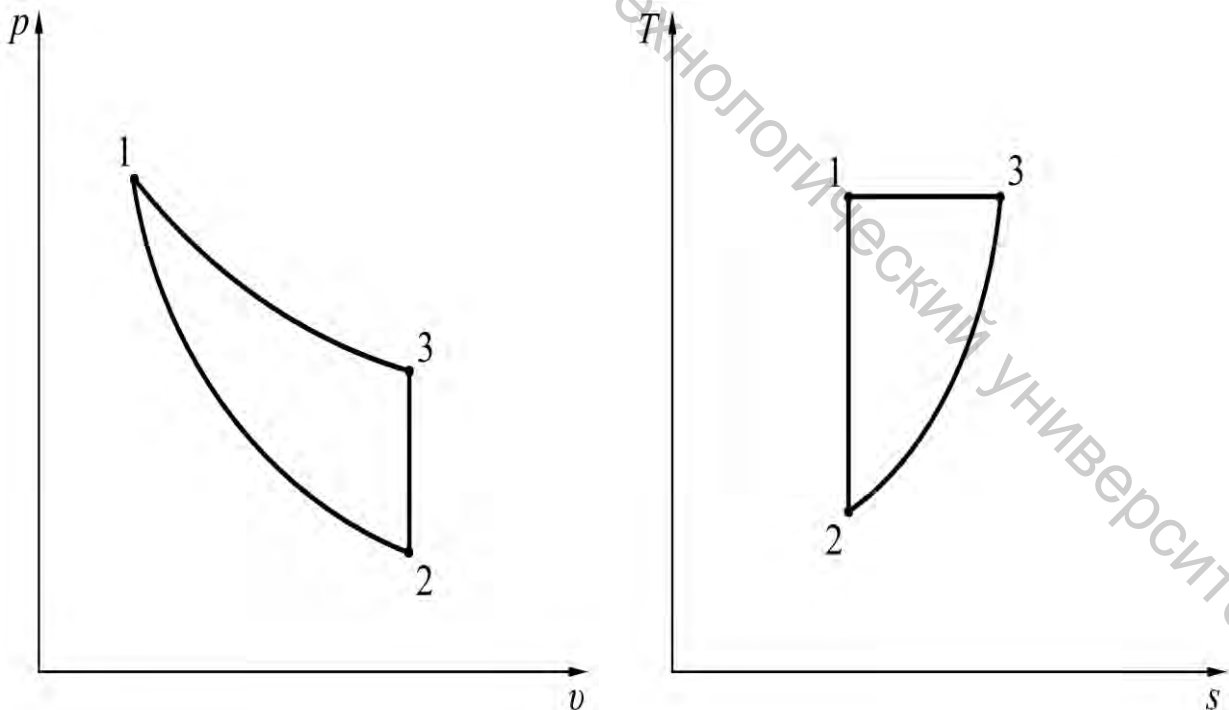


Рисунок 5.1 – Изображение цикла Клемана-Дезорма

Таким образом, цикл Клемана-Дезорма состоит из трех процессов.

Процесс 1–2 – адиабатный, уравнение этого процесса $p \cdot v^k = const$, следовательно

$$p_1 \cdot v_1^k = p_2 \cdot v_2^k. \quad (5.4)$$

Процесс 2–3 – изохорный, уравнение этого процесса $v = const$, следовательно

$$v_2 = v_3. \quad (5.5)$$

Процесс 3–1 – изотермический, уравнение этого процесса $p \cdot v = const$, следовательно

$$p_3 \cdot v_3 = p_1 \cdot v_1. \quad (5.6)$$

Из уравнений (5.4) и (5.5) следует, что

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k = \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^k, \quad (5.7)$$

а из уравнения (5.6) – что

$$\frac{v_3}{v_1} = \frac{p_1}{p_3}. \quad (5.8)$$

Тогда, подставляя соотношение (5.8) в формулу (5.7), получаем, что

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{p_1}{p_3} \right)^k. \quad (5.9)$$

Прологарифмировав выражение (5.9), получим

$$\lg p_1 - \lg p_2 = k \cdot (\lg p_1 - \lg p_3), \quad (5.10)$$

откуда можно найти значение показателя адиабаты

$$k = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg p_1 - \lg p_3}. \quad (5.11)$$

Описание экспериментальной установки

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде НТЦ-22.05.1.Б с использованием модуля НТЦ-22.05.1/9.

Экспериментальная установка для определения показателя адиабаты воздуха (рис. 5.2) представляет собой стеклянный баллон 1, который при помощи пневмораспределителя 2 с ручным управлением может подсоединяться к воздушному компрессору 3. Давление в баллоне измеряется манометром (датчиком давления) 4. Для выпуска воздуха из баллона служит выпускной клапан 5.

Измерение давления воздуха осуществляется датчиком давления, подключаемым к ПЭВМ, с использованием программы DiSco, представляющей собой виртуальный осциллограф.

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

После установки и закрепления на рабочей панели лабораторного стенда, модуль включается в электрическую сеть и подключается с помощью USB-кабеля к ПЭВМ. Затем запускается программа DiSco. Для отсчета давлений используется канал А, при этом значение 1 В соответствует давлению 1 кПа.

При нажатой кнопке выпускного клапана определяется значение показаний осциллографа, соответствующие атмосферному давлению на момент проведения опыта p_2 . Сама величина атмосферного давления измеряется барометром, находящимся в помещении лаборатории.

Соединив с помощью пневмораспределителя компрессор с баллоном, накачивают в него воздух. Разность давлений должна при этом составлять около 2 кПа. Спустя 2–3 минуты, когда температура воздуха в баллоне сравняется с температурой окружающей среды, о чем можно судить по неизменности показаний осциллографа, определяют значение давления в баллоне p_1 .

Резко нажав и сразу же отпустив кнопку выпускного клапана, выпускают воздух из баллона. Снова выждав 2–3 минуты, чтобы температура воздуха в баллоне опять сравнялась с температурой окружающей среды, определяют значение давления в баллоне p_3 .

Измерения повторяются не менее 10 раз. Все полученные результаты измерений заносятся в таблицу, составленную по форме таблицы 5.1.

Затем по формуле (5.11) рассчитываются опытные значения показателя адиабаты k . Теоретическое значение показателя адиабаты $k_{теор}$ принимают, считая воздух двухатомным газом. Сравнивая полученные значения, определяют относительную погрешность опыта.

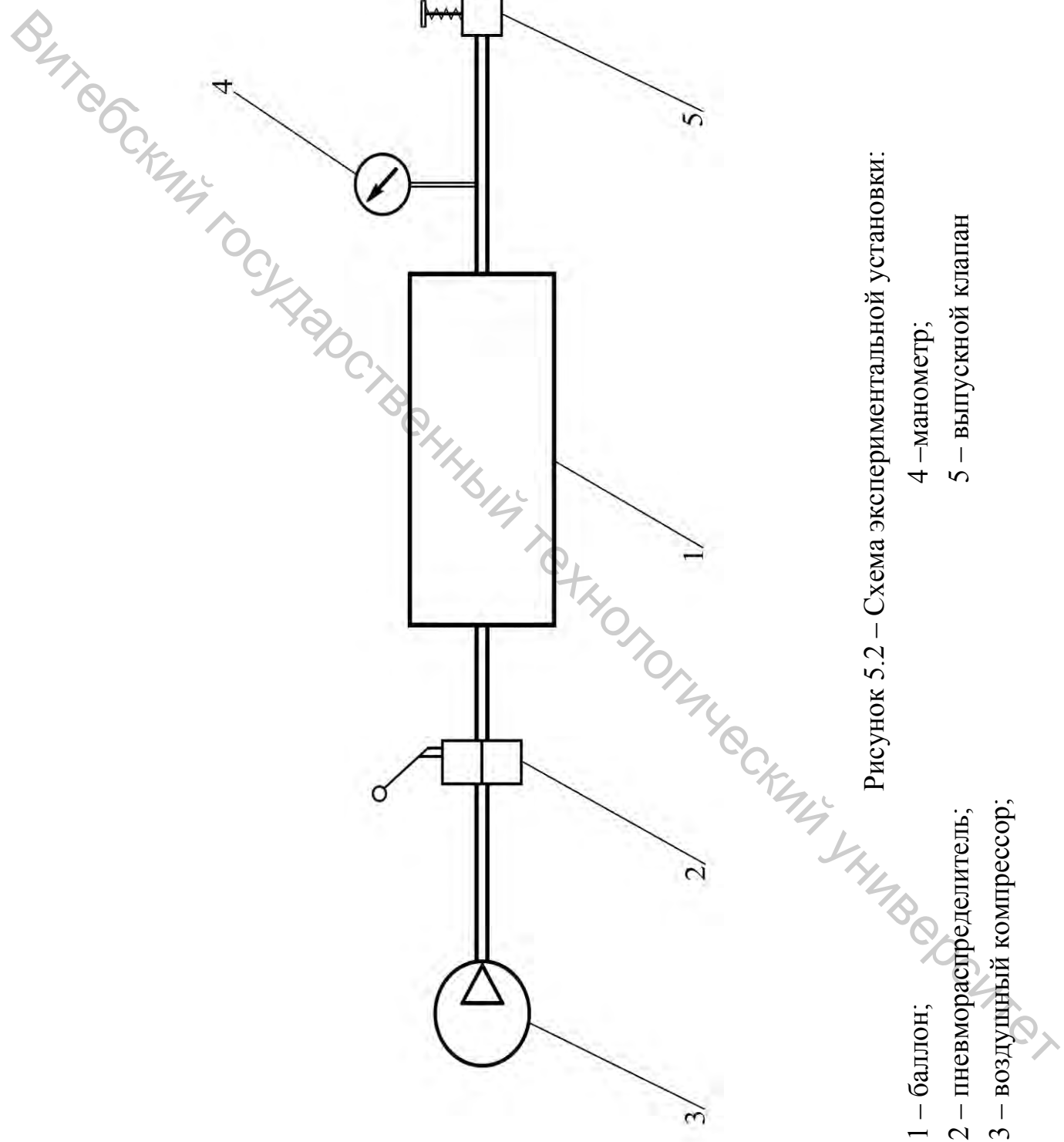


Рисунок 5.2 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – баллон;
- 2 – пневмораспределитель;
- 3 – воздушный компрессор;
- 4 – манометр;
- 5 – выпускной клапан

$$\varepsilon = \frac{|k_{теор.} - k|}{k_{теор.}} \cdot 100, \%$$

Все полученные результаты расчетов также заносятся в таблицу.

Таблица 2.1 – Результаты измерений и расчетов

№ опыта	$p_1, \text{кПа}$	$p_2, \text{кПа}$	$p_3, \text{кПа}$	k	$\varepsilon, \%$
1					
2					
3					
...					
10					

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Исходные данные для расчетов и расчетные формулы.
4. Таблицу результатов измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Что называется изобарной и изохорной теплоемкостью?
2. Почему изобарная теплоемкость больше изохорной?
3. Какой процесс называется адиабатным?
4. Какой вид имеет уравнение адиабатного процесса?
5. Как определяется показатель адиабаты?
6. Как выглядит цикл Клемана-Дезорма в p - v - и T - s -диаграммах?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Цель работы: опытное определение параметров состояния влажного воздуха в процессах его нагрева и увлажнения с помощью различных приборов с использованием $i-d$ -диаграммы.

Теоретическое введение

Влажным воздухом называется механическая смесь сухого воздуха и водяного пара. По своим физическим свойствам влажный воздух близок к идеальному газу, так как в большинстве случаев пар в нем находится в перегретом состоянии и имеет незначительное парциальное давление.

Согласно закону Дальтона, давление газовой смеси будет равняться сумме парциальных давлений газов, составляющих эту смесь. Таким образом, давление влажного воздуха $p_{вл.в.}$ равно сумме парциального давления сухого воздуха $p_{сух.в.}$ и парциального давления водяного пара p_n

$$p_{вл.в.} = p_{сух.в.} + p_n \quad (6.1)$$

Максимальным значением парциального давления водяного пара p_n является давление насыщенного водяного пара p_n , соответствующее температуре влажного воздуха.

Состояние водяного пара во влажном воздухе определяется температурой воздуха t_e и парциальным давлением водяного пара p_n .

В зависимости от состояния содержащегося в нем водяного пара различают два основных состояния влажного воздуха – насыщенный и ненасыщенный.

Насыщенным влажным воздухом называется смесь сухого воздуха и насыщенного водяного пара. В насыщенном влажном воздухе содержится максимально возможное при данных условиях количество влаги.

Ненасыщенным влажным воздухом называется смесь сухого воздуха и перегретого водяного пара.

Если ненасыщенный влажный воздух будет охлаждаться, то содержащийся в нем перегретый пар при достижении определенной температуры станет насыщенным, при этом влажный воздух также превратится в насыщенный. Температура, до которой необходимо охладить ненасыщенный влажный воздух, чтобы он стал насыщенным, называется температурой точки росы t_p . При охлаждении воздуха ниже точки росы происходит конденсация содержащегося в нем пара – выпадает роса.

Содержание водяного пара в воздухе можно охарактеризовать рядом параметров, важнейшие из которых – абсолютная и относительная влажность, а

также влагосодержание.

Абсолютной влажностью воздуха a называется массовое содержание водяного пара в единице объема влажного воздуха. Эта величина определяется как отношение массы водяного пара m_n , содержащегося во влажном воздухе, к объему влажного воздуха $V_{вл.в.}$.

$$a = \frac{m_n}{V_{вл.в.}}, \quad (6.2)$$

она измеряется в $кг/м^3$ и численно равна плотности пара ρ_n при парциальном давлении p_n .

Относительная влажность воздуха φ определяется как отношение парциального давления содержащегося в воздухе водяного пара к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n}, \quad (6.3)$$

выражается, как правило, в $\%$.

Влагосодержанием влажного воздуха d называется отношение массы водяного пара m_n , содержащегося во влажном воздухе, к массе содержащегося в нем сухого воздуха $m_{сух.в.}$.

$$d = \frac{m_n}{m_{сух.в.}}. \quad (6.4)$$

Так как масса содержащегося в воздухе пара обычно незначительна, измеряется влагосодержание чаще всего в $г/кг$ (полностью – $г/кг$ сухого воздуха).

Для определения величины относительной влажности воздуха могут применяться различные методы и измерительные приборы. Наиболее распространенным и точным является психрометрический метод. Приборы, созданные на этом принципе, называются психрометрами.

Психрометр состоит из двух жидкостных термометров, «сухого» и «мокрого», смонтированных в одном корпусе. «Сухой» термометр показывает действительную температуру воздуха. Колба «мокрого» термометра покрыта смоченной в воде тканью, и он показывает температуру испаряющейся воды. Поскольку на испарение воды затрачивается некоторое количество тепла, обычно температура «мокрого» термометра ниже температуры «сухого», причем разность этих температур будет зависеть от величины относительной влажности воздуха. При относительной влажности $\varphi = 100 \%$ испарение влаги происходить не будет, соответственно, в этом случае «сухой» и «мокрый»

термометры будут показывать одинаковую температуру. Чем меньше будет величина относительной влажности, тем более интенсивно будет испаряться влага, и тем больше на это будет затрачиваться тепла, тем больше будет и падение температуры «мокрого» термометра относительно температуры «сухого».

Значение относительной влажности воздуха по показаниям психрометра можно определить с помощью $i-d$ -диаграммы влажного воздуха.

Диаграмма $i-d$ влажного воздуха (рис. 6.1) построена в косоугольной системе координат с углом между осями 135° . По оси ординат отложены значения энтальпии i , отнесенные к 1 кг сухого воздуха, по оси абсцисс – значения влагосодержания d . Для удобства работы с диаграммой значения влагосодержания спроектированы на горизонталь. Также на диаграмме нанесены кривые относительной влажности ($\varphi = \text{const}$), линии постоянной температуры ($t = \text{const}$), идущие с небольшим наклоном, и проведена кривая парциального давления водяного пара.

Как и любая диаграмма, $i-d$ -диаграмма позволяет по двум каким-либо известным параметрам влажного воздуха определить все остальные его параметры.

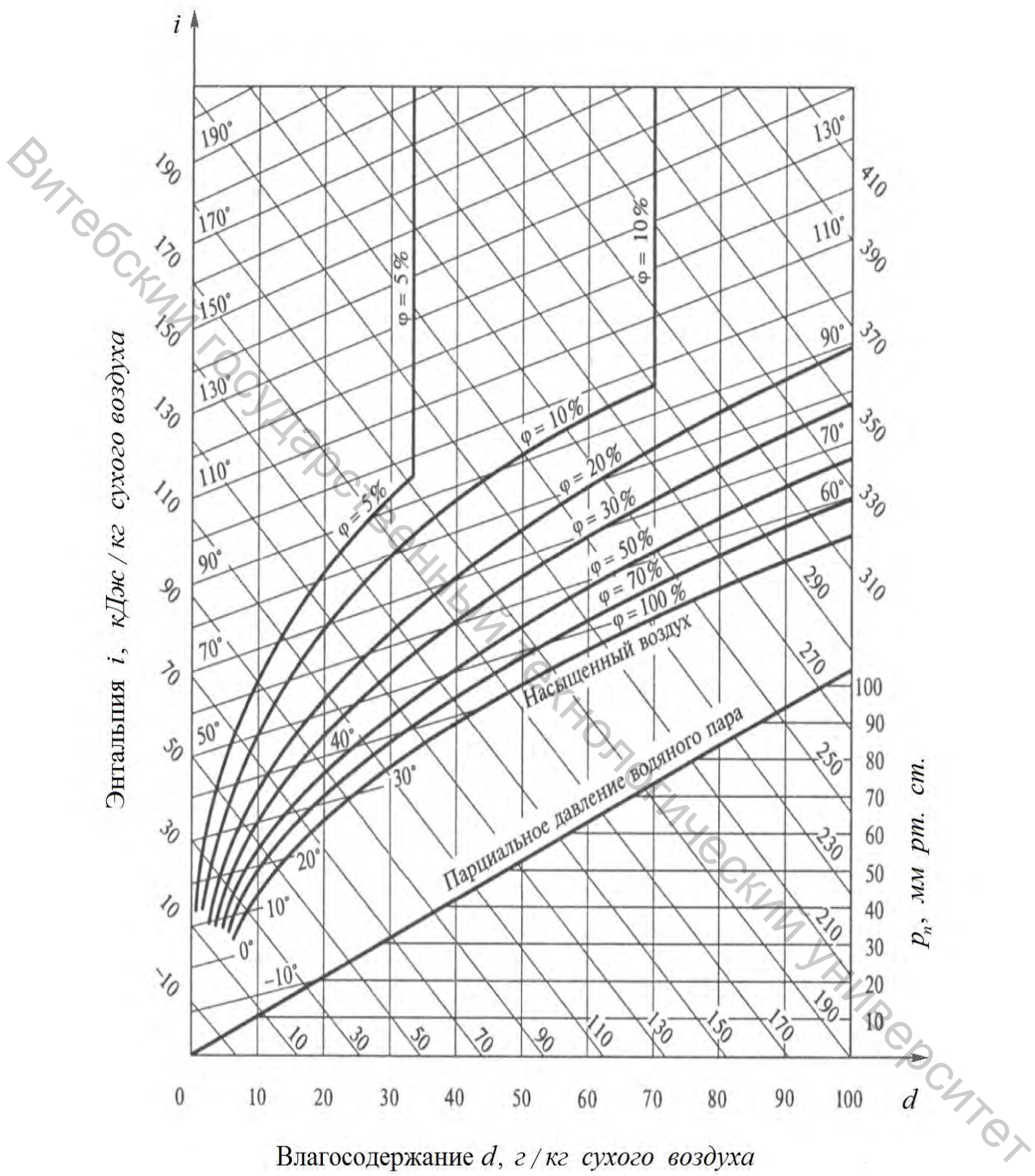
Также для определения относительной влажности воздуха по показаниям психрометра могут использоваться психрометрические таблицы, которые обычно прилагаются к психрометру. В этих таблицах указываются значения одной из температур «сухого» или «мокрого» термометра, и разности показаний «сухого» и «мокрого» термометров. На пересечении соответствующих строки и столбца такой таблицы можно найти величину относительной влажности воздуха φ .

Довольно часто определение величины относительной влажности воздуха осуществляется с помощью гигрометров. Принцип работы гигрометра основан на свойстве какого-либо чувствительного элемента, в качестве которого может использоваться пучок обезжиренных волос или специальным образом обработанная гигроскопическая органическая пленка, изменять свои размеры с изменением относительной влажности воздуха. Деформация этого чувствительного элемента через систему рычагов передается на стрелку и отсчет значений относительной влажности воздуха φ производится непосредственно по шкале прибора.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для определения параметров влажного воздуха (рис. 6.2) состоит из вентилятора 1, при помощи которого воздух подается сначала в трубу калорифера 2, а из нее – в испарительную камеру 3.

В калорифере воздух нагревается с помощью электронагревателя 4, мощность которого может регулироваться автотрансформатором 5.



Влажностное содержание d , г / кг сухого воздуха

Рисунок 6.1 – Диаграмма $i-d$ влажного воздуха

Внутри испарительной камеры помещена смоченная в воде ткань 6, соприкасаясь с которой нагретый воздух насыщается влагой. Снаружи испарительная камера для предотвращения потерь тепла в окружающую среду покрыта слоем теплоизоляции 7.

Для измерения температуры воздуха установлены термометры 8 на входе из калорифера в испарительную камеру и 9 – на выходе из испарительной камеры. Параметры воздуха на входе в установку измеряются с помощью психрометра, установленного в помещении лаборатории.

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

Установка включается нажатием кнопки «Пуск» пакетного выключателя.

После включения установки автотрансформатором устанавливается требуемая величина мощности электронагревателя.

После выхода установки на стационарный режим (через 25–30 минут после включения), что определяется по неизменности показаний установленных на ней термометров, производится измерение температуры воздуха (температуры «сухого» термометра) на входе в испарительную камеру t_{c2} и на выходе из испарительной камеры t_{c3} . По психрометру определяются температуры «сухого» t_{c1} и «мокрого» t_{m1} термометров на входе в установку.

Значения параметров влажного воздуха во всех трех состояниях (на входе в калорифер, на входе в испарительную камеру и на выходе из испарительной камеры) определяются графически с помощью i - d -диаграммы.

Исходными величинами служат температуры «сухого» и «мокрого» термометров на входе в установку. Вначале проводят линию температуры, соответствующую значению t_{m1} , до пересечения с линией относительной влажности $\varphi = 100 \%$, тем самым находя точку состояния полного насыщения воздуха. Через эту точку затем проводят линию постоянной энтальпии $i = const$ до пересечения с линией температуры, соответствующей значению t_{c1} . Полученная точка 1 будет соответствовать состоянию воздуха на входе в установку (в калорифер). Далее для этой точки по соответствующим линиям определяются значения энтальпии i_1 , влагосодержания d_1 , относительной влажности φ_1 .

Чтобы найти температуру точки росы, нужно из точки, соответствующей данному состоянию влажного воздуха, опустить линию постоянного влагосодержания $d = const$ до пересечения с кривой относительной влажности $\varphi = 100 \%$. Для полученной точки по линии температуры определяется значение температуры точки росы t_{p1} .

Величину парциального давления водяного пара p_{n1} находят, опуская линию постоянного влагосодержания $d = const$ до пересечения с кривой парциального давления и из этой точки проводя горизонталь направо, до нанесенных значений парциального давления.

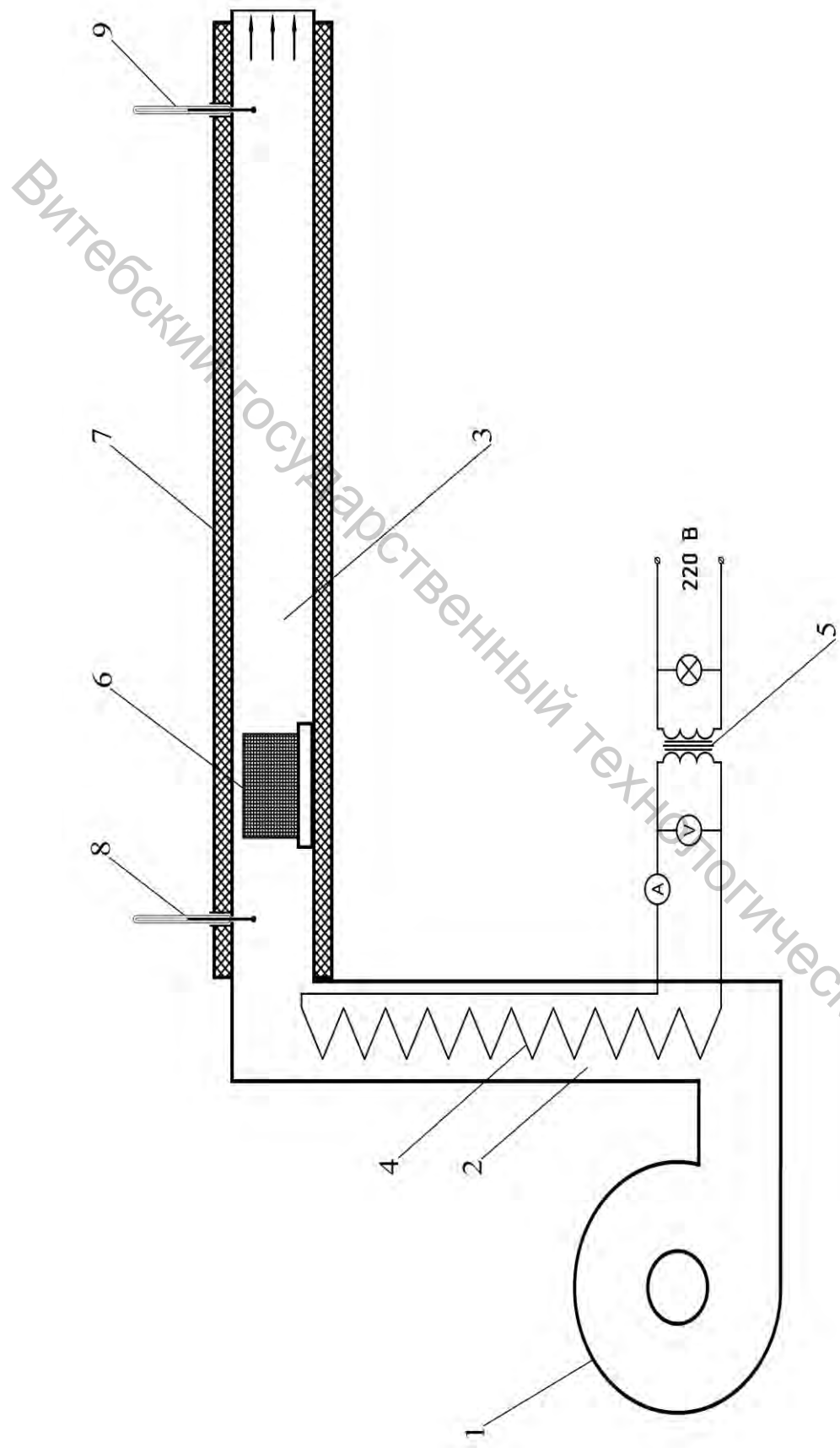


Рисунок 6.2 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – вентилятор;
- 2 – калорифер;
- 3 – испарительная камера;
- 4 – электронагреватель;
- 5 – автотрансформатор;
- 6 – увлажненная ткань;
- 7 – теплоизоляция;
- 8, 9 – термометры

Нагрев воздуха в калорифере происходит при неизменном его составе, следовательно, при постоянном влагосодержании. Для того, чтобы найти точку 2, соответствующую состоянию воздуха после калорифера, на входе в испарительную камеру, следует через точку 1 провести линию постоянного влагосодержания $d = const$ вертикально вверх до пересечения с линией температуры t_{c2} .

В процессе нагрева абсолютная влажность, температура точки росы и парциальное давление водяного пара остаются постоянными, а энтальпия возрастает. Возрастает также и температура «мокрого» термометра, для определения которой необходимо из точки, соответствующей состоянию воздуха, провести линию постоянной энтальпии $i = const$ до пересечения с кривой относительной влажности $\varphi = 100 \%$. Для полученной точки по линии температуры определяется значение температуры «мокрого» термометра t_{m2} .

Относительная влажность при нагревании уменьшается, так как с повышением температуры давление насыщенного водяного пара p_n увеличивается.

В испарительной камере происходит увлажнение воздуха за счет испарения воды с поверхности увлажненной ткани. При этом влагосодержание воздуха увеличивается, а температура понижается. Энтальпия влажного воздуха в этом процессе остается неизменной, поскольку камера покрыта теплоизоляцией, а теплота, затраченная на испарение, возвращается с водяным паром в воздух. Неизменной остается также и температура «мокрого» термометра.

Чтобы найти точку 3, соответствующую состоянию воздуха на выходе из испарительной камеры, следует через точку 2 провести линию постоянной энтальпии $i = const$ до пересечения с линией температуры t_{c3} . Для этой точки определяются значения всех остальных параметров: влагосодержания d_3 , температуры точки росы t_{p3} , парциального давления водяного пара p_{n3} , относительной влажности φ_3 .

В процессе нагрева воздуха в калорифере 1–2 по разности энтальпий можно определить удельное количество подведенного тепла

$$q = i_2 - i_1, \quad (6.5)$$

а в процессе увлажнения воздуха в испарительной камере 2–3 по разности влагосодержаний – массу поступившего водяного пара (на 1 кг сухого воздуха)

$$m_n = d_3 - d_2. \quad (6.6)$$

Все показания измерительных приборов и результаты расчетов заносятся в таблицу, составленную по форме таблицы 6.1.

В $i-d$ -диаграмме строится схематичное изображение происходящих в установке процессов с влажным воздухом и наносятся значения основных его параметров (i, d, φ, t_c) во всех трех состояниях.

Таблица 6.1 – Результаты измерений и расчетов

Параметры	На входе в калорифер	На входе в испарительную камеру	На выходе из испарительной камеры
$t_c, ^\circ\text{C}$			
$t_{м2}, ^\circ\text{C}$			
$\varphi, \%$			
$i, \text{кДж/кг}$			
$d, \text{г/кг}$			
$p_n, \text{Па}$			
$t_p, ^\circ\text{C}$			

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Таблицу результатов измерений и расчетов.
4. Изображение процессов с влажным воздухом в i - d -диаграмме.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой влажный воздух?
2. Как формулируется закон Дальтона применительно к влажному воздуху?
3. Что называется абсолютной влажностью воздуха, в чем она измеряется?
4. Что называется относительной влажностью воздуха, в чем она измеряется?
5. Что называется влагосодержанием, в чем оно измеряется?
6. Что называется температурой точки росы, как она определяется с помощью i - d -диаграммы?
7. В чем состоит принцип работы психрометра?
8. В чем состоит принцип работы гигрометра?

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА ЧЕРЕЗ СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО

Цель работы: опытное определение коэффициентов скорости и расхода при адиабатном истечении газа (воздуха) через суживающееся сопло.

Теоретическое введение

При работе многих технических устройств и агрегатов (паровых и газовых турбин, реактивных двигателей, различных горелок, форсунок и так далее) происходит истечение газов и паров с большой скоростью, что определяет важность изучения закономерностей протекания этого процесса.

Истечением называется процесс ускоренного движения газа или пара через относительно короткие каналы особой формы, в которых происходит изменение давления. Если при движении газа в канале давление уменьшается, а скорость истечения возрастает, то такой канал называется соплом, если же при движении газа в канале давление увеличивается, а скорость истечения уменьшается, то такой канал называется диффузором.

Различают сопла суживающиеся – конфузоры, и комбинированные (состоящие из суживающейся и расширяющейся части) – сопла Лаваля.

Поскольку в сопловых каналах, как правило, скорость истечения газа велика, а длина канала незначительна, то теплообмен с окружающей средой в таких устройствах практически отсутствует и процесс истечения можно считать адиабатным.

Считается, что при истечении соблюдается условие неразрывности потока, то есть через любое поперечное сечение канала в единицу времени протекает одинаковая масса рабочего тела

$$m = \frac{F \cdot w}{v} = const, \quad (7.1)$$

где F – площадь поперечного сечения канала, w – скорость рабочего тела, v – удельный объем. В каждом сечении канала скорость w , давление p , температура T и другие параметры рабочего тела постоянны по сечению канала.

Уравнение первого закона термодинамики, которое в общем случае может быть записано в виде

$$dq = du + d(pv) - vdp, \quad (7.2)$$

для потока газа принимает вид

$$dq = du + d(pv) + \frac{dw^2}{2}. \quad (7.3)$$

Величина $dw^2/2$, равная бесконечно малому приращению внешней кинетической энергии рабочего тела, называется элементарной располагаемой работой

$$dl_{расч.} = \frac{dw^2}{2}. \quad (7.4)$$

Из уравнений (7.2) и (7.3) следует, что

$$\frac{dw^2}{2} = -vdp. \quad (7.5)$$

Тогда вся располагаемая работа в некотором процессе 1–2 будет равна

$$l_{расч.} = \int_{p_1}^{p_2} -vdp = \int_{p_2}^{p_1} vdp. \quad (7.6)$$

При адиабатном расширении идеального газа

$$l_{расч.} = \int_{p_2}^{p_1} v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = \frac{k}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2). \quad (7.7)$$

Из уравнения (7.4) следует, что

$$l_{расч.} = \int_1^2 \frac{dw^2}{2} = \frac{(w_2^2 - w_1^2)}{2}, \quad (7.8)$$

откуда

$$w_2 = \sqrt{2l_{расч.} + w_1^2}, \quad (7.9)$$

где w_1 – начальная скорость газа при входе в канал, w_2 – конечная скорость газа при выходе из канала.

В большинстве случаев начальная скорость газа представляет весьма малую величину по сравнению с конечной и в практических расчетах ею

обычно пренебрегают, полагая $w_1 = 0$.

Тогда, с учетом уравнения (7.7), скорость адиабатного истечения идеального газа может быть определена как

$$w = \sqrt{2l_{расч.}} = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)} = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}. \quad (7.10)$$

Таким образом, скорость истечения газа зависит от состояния газа при входе в сопло и от давления p_2 на выходе.

Массовый расход газа при истечении определяется из уравнения

$$m = \frac{F \cdot w}{v_2}, \quad (7.11)$$

где F – площадь выходного сечения канала, w – скорость истечения, v_2 – удельный объем газа в выходном сечении канала. При адиабатном истечении идеального газа

$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}}.$$

Тогда массовый расход идеального газа

$$m = F \cdot \frac{\sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}}{v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}}},$$

или

$$m = F \cdot \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)}. \quad (7.12)$$

Массовый расход идеального газа зависит от площади выходного сечения канала, начального состояния газа и степени его расширения.

Степень расширения газа в сопле, то есть отношение конечного давления к начальному

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} \quad (7.13)$$

является одной из основных характеристик процесса истечения. Значение β , при котором расход газа достигает максимума, называется критическим $\beta_{кр.}$, и находится по формуле

$$\beta_{кр.} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (7.14)$$

Как и показатель адиабаты, величина $\beta_{кр.}$ является физической константой газа, то есть одной из характеристик его физических свойств.

В зависимости от степени расширения можно выделить три характерных режима истечения газа: при $\beta > \beta_{кр.}$ – докритический, при $\beta = \beta_{кр.}$ – критический и при $\beta < \beta_{кр.}$ – сверхкритический режимы.

При докритическом режиме истечения ($\beta > \beta_{кр.}$) в сопле происходит полное расширение газа с понижением давления до давления p_0 среды, в которую происходит истечение, на срезе сопла $p_2 = p_0$, скорость на выходе меньше скорости звука, располагаемая работа полностью расходуется на увеличение кинетической энергии газа. При критическом режиме ($\beta = \beta_{кр.}$) также происходит полное расширение газа в пределах сопла, на срезе сопла $p_2 = p_{кр.} = p_1 \cdot \beta_{кр.} = p_0$, скорость на выходе равна критической скорости – скорости звука, располагаемая работа полностью расходуется на увеличение кинетической энергии газа. При сверхкритическом режиме ($\beta < \beta_{кр.}$) в пределах сопла происходит неполное расширение газа, давление понижается только до критического, на срезе сопла $p_2 = p_{кр.} = p_1 \cdot \beta_{кр.} > p_0$, скорость на выходе равна критической скорости – местной скорости звука. Дальнейшее расширение газа и понижение его давления до p_0 осуществляется за пределами сопла. На увеличение кинетической энергии расходуется только часть располагаемой работы, другая ее часть в суживающемся сопле остается нереализуемой.

При сверхкритическом режиме истечения в формулы (7.10) и (7.12) вместо p_2 следует подставлять $p_{кр.} = p_1 \cdot \beta_{кр.}$.

В отличие от теоретического адиабатного изэнтропного действительный процесс истечения реального газа происходит при трении частиц газа между собой и о стенки канала. При этом работа, затрачиваемая на преодоление сил трения, преобразуется в теплоту, в результате чего температура и энтальпия газа в выходном сечении канала возрастают. Истечение газа становится необратимым процессом и сопровождается увеличением энтропии.

Вследствие этого фактические значения и скорости w , и расхода газа m всегда несколько ниже, чем теоретические: $w_{\text{факт.}} < w_{\text{теор.}}$, $m_{\text{факт.}} < m_{\text{теор.}}$. При расчетах это учитывают введением соответствующих коэффициентов: коэффициента скорости

$$\varphi = \frac{w_{\text{факт.}}}{w_{\text{теор.}}}, \quad (7.15)$$

коэффициента расхода

$$\alpha = \frac{m_{\text{факт.}}}{m_{\text{теор.}}}. \quad (7.16)$$

Потеря кинетической энергии характеризуется коэффициентом потери энергии

$$\psi = 1 - \varphi^2. \quad (7.17)$$

Описание экспериментальной установки

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде НТЦ-22.05.1.Б с использованием модуля НТЦ-22.05.1/5.

Экспериментальная установка для определения показателя адиабаты воздуха (рис. 7.1) представляет собой металлическую трубу 1, в которой вмонтированы измерительная диафрагма 2 для определения расхода воздуха и исследуемое суживающееся сопло 3. Диаметр отверстия диафрагмы $d_o = 1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м}$; входной диаметр сопла $d_s = 15 \text{ мм} = 0,015 \text{ м}$, выходной $d_c = 1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м}$. Труба через регулируемый дроссель 4 присоединена к вакуумному насосу 5. При работе вакуумного насоса воздух с параметрами p_0 и t_0 засасывается из атмосферы через измерительную диафрагму, перепад давления на диафрагме Δp_1 измеряется дифференциальным манометром (датчиком давления) 8. После диафрагмы воздух с параметрами p_1 и t_1 поступает в камеру высокого давления 6, откуда через сопло истекает в камеру низкого давления 7. Давление на срезе сопла p_2 и в камере низкого давления p_3 определяются с использованием показаний Δp_2 и Δp_3 дифференциальных манометров (датчиков давления) 9 и 10.

Измерение перепадов давления воздуха осуществляется посредством ПЭВМ, к которой подключаются датчики давления.

Витебский государственный технологический университет

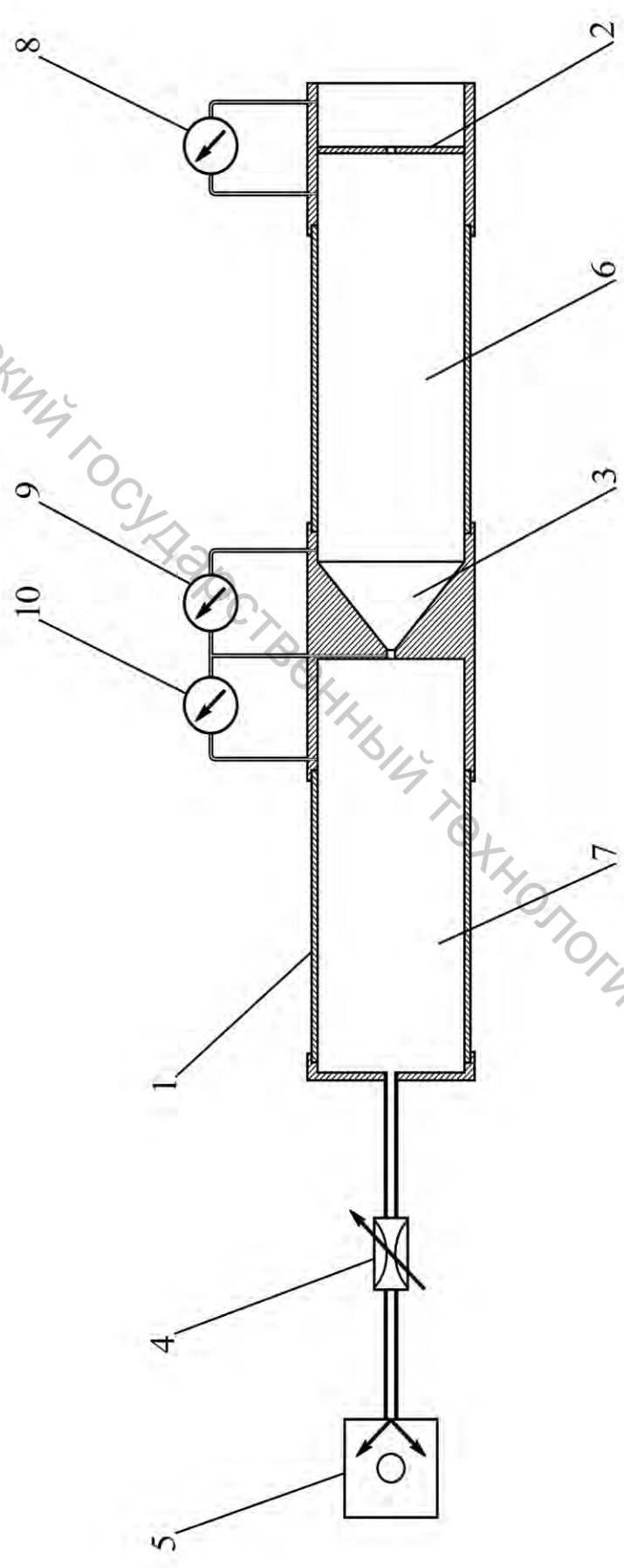


Рисунок 7.1 – Схема экспериментальной установки.

- 1 – труба;
- 2 – измерительная диафрагма;
- 3 – сопло;
- 4 – регулируемый дроссель;
- 5 – вакуумный насос;
- 6 – камера высокого давления;
- 7 – камера низкого давления;
- 8 – дифференциальный манометр;
- 9 – дифференциальный манометр;
- 10 – дифференциальный манометр

Методика проведения опыта и обработки опытных данных

После установки и закрепления съемного модуля на рабочей панели лабораторного стенда, кабель модуля подключается к разъему X1 на панели СИ-04 стенда. При помощи шлангов выходной штуцер модуля соединяется с патрубком вакуумного насоса на рабочей панели, а штуцеры воздушных каналов – с датчиками давления на панели СИ-04 стенда.

Перед включением установки необходимо убедиться, что переключатели на панели БП-06 установлены в положения: SA – «выкл.», SA1 (Насос-1) – «выкл.», SA2 (Насос-2) – «выкл.», SA3 – «нижнее», SA5 – «выкл.», SA6 – «выкл.», SA14 – «min.».

Стенд с помощью USB-кабеля подключается к ПЭВМ. Для измерения параметров используется программа PDInd-22.05.1.Б.

Включение установки производится при помощи автоматического выключателя QF1 и кнопки «Пуск» S1, расположенных на панели БВ-03.

После включения установки нажатием на клавишный выключатель SA4 на панели БУ-02 стенда включается вакуумный насос. Величина разрежения регулируется вращением ручки регулируемого дросселя, расположенной на рабочей панели стенда.

На экране ПЭВМ отображаются значения перепадов давлений Δp_1 , Δp_2 и Δp_3 , а также значения параметров воздуха в помещении лаборатории p_0 и t_0 . Дождавшись, когда процесс можно будет считать установившимся (при этом изменение давления будет колебаться около некоторого среднего значения), значения показаний приборов фиксируют и записывают в таблицу, составленную по форме таблицы 7.1.

Измерения повторяют 5–7 раз, изменяя при помощи дросселя величину разрежения.

По измеренным перепадам давления рассчитываются значения давления воздуха в установке

$$p_1 = p_0 - \Delta p_1,$$

$$p_2 = p_1 - \Delta p_2,$$

$$p_3 = p_2 - \Delta p_3.$$

По формуле (7.13) рассчитывается значение степени расширения воздуха в сопле

$$\beta = \frac{p_2}{p_1},$$

а по формуле (7.14) – критическое значение этой величины

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

считая при этом воздух двухатомным газом и принимая значение показателя адиабаты $k = 1,4$.

Сопоставляя полученные значения β и $\beta_{кр.}$, можно сделать вывод о режиме истечения. Как правило, при проведении лабораторной работы истечение воздуха через сопло носит докритический характер.

Тогда, в соответствии с уравнением (7.10), теоретическая скорость истечения воздуха

$$w_{теор.} = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}, \quad (7.18)$$

где $R = 287,7$ Дж/кг·град – газовая постоянная воздуха, T_1 – абсолютная температура воздуха на входе в сопло, которую можно принять равной температуре окружающего воздуха ($T_1 = T_0$).

Теоретический массовый расход воздуха согласно формуле (7.11)

$$m_{теор.} = \frac{F_c \cdot w_{теор.}}{v_2}, \quad (7.19)$$

где F_c – площадь выходного сечения сопла,

$$F_c = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4}; \quad (7.20)$$

v_2 – удельный объем воздуха в выходном сечении сопла. Для адиабатного процесса истечения

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (7.21)$$

Значение удельного объема воздуха на входе в сопло v_1 можно найти из параметрического уравнения состояния газа

$$\nu_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1}. \quad (7.22)$$

С учетом полученных соотношений, из уравнения (7.19) получим формулу для расчета теоретического массового расхода воздуха

$$m_{теор.} = F_c \cdot w_{теор.} \cdot \frac{p_1}{R \cdot T_1} \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (7.23)$$

Исходя из условия неразрывности потока, массовый расход воздуха будет одинаковым для всех сечений трубы установки. Фактический расход воздуха через измерительную диафрагму определяется как

$$m_{факт.} = F_o \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_0 \cdot \Delta p_1}, \quad (7.24)$$

где F_o – площадь отверстия диафрагмы,

$$F_o = \frac{\pi \cdot d_o^2}{4}; \quad (7.25)$$

ρ_0 – плотность воздуха на входе в установку, определяемая из параметрического уравнения состояния газа как

$$\rho_0 = \frac{1}{\nu_0} = \frac{p_0}{R \cdot T_0}. \quad (7.26)$$

Фактическая скорость истечения воздуха может быть рассчитана как

$$w_{факт.} = \frac{m_{факт.}}{F_c \cdot \rho_2}, \quad (7.27)$$

где ρ_2 – плотность воздуха в выходном сечении сопла,

$$\rho_2 = \frac{1}{\nu_2}. \quad (7.28)$$

Наконец, по формулам (7.15) и (7.16) определяются значения коэффициента скорости φ и коэффициента расхода α .

Все результаты расчетов также заносятся в таблицу.

Таблица 7.1 – Результаты измерений и расчетов

№ опыта	1	2	3	4	5
$p_0, \text{Па}$					
$t_0, \text{°C}$					
$\Delta p_1, \text{Па}$					
$\Delta p_2, \text{Па}$					
$\Delta p_3, \text{Па}$					
$p_1, \text{Па}$					
$p_2, \text{Па}$					
$p_3, \text{Па}$					
β					
режим истечения					
$w_{\text{теор.}}, \text{м/с}$					
$m_{\text{теор.}}, \text{кг/с}$					
$w_{\text{факт.}}, \text{м/с}$					
$m_{\text{факт.}}, \text{кг/с}$					
φ					
α					

Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Исходные данные для расчетов и расчетные формулы.
4. Таблицу результатов измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Что называется процессом истечения?
2. Что называется соплом, какие они бывают?
3. Почему процесс истечения из сопла можно считать адиабатным?
4. От чего зависит скорость истечения газа через сопло?
5. От чего зависит массовый расход газа при истечении через сопло?
6. Что такое степень расширения газа в сопле?
7. Какие существуют режимы истечения?

Литература

1. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1975. – 496 с.
2. Дрыжаков, Е. В. Техническая термодинамика / Е. В. Дрыжаков [и др.] ; под общей редакцией В. И. Крутова. – М. : Высшая школа, 1971. – 472 с.
3. Кудинов, В. А. Техническая термодинамика : учебное пособие для втузов / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – 2-е изд., испр. – М. : Высшая школа, 2001. – 261 с.
4. Хрусталева, Б. М. Техническая термодинамика : учебник для студентов строительных и энергетических специальностей учреждений, обеспечивающих получение высшего образования. В 2 ч. Ч. 1 / Б. М. Хрусталева, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск, УП Технопринт, 2004. – 486 с.

Приложение А

Физические свойства сухого воздуха при давлении 101 325 Па

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/кг}\cdot\text{град}$	$\lambda\cdot 10^2, \text{Вт/м}\cdot\text{град}$	$\nu\cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,293	1005	2,442	13,28	0,707
10	1,247	1005	2,512	14,16	0,705
20	1,205	1006	2,593	15,06	0,703
30	1,165	1006	2,675	16,00	0,701
40	1,128	1007	2,756	16,96	0,699
50	1,093	1008	2,826	17,95	0,698
60	1,060	1008	2,896	18,97	0,696
70	1,029	1009	2,966	20,02	0,694
80	1,000	1009	3,047	21,09	0,692
90	0,972	1010	3,128	22,10	0,690
100	0,946	1011	3,210	23,13	0,688

Приложение Б

Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/кг}\cdot\text{град}$	$\lambda\cdot 10^2, \text{Вт/м}\cdot\text{град}$	$\nu\cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	999,9	4,212	55,1	1,789	13,67
10	999,7	4,191	57,4	1,306	9,52
20	998,2	4,183	59,9	1,006	7,02
30	995,7	4,174	61,8	0,805	5,42
40	992,2	4,174	63,5	0,659	4,31
50	988,1	4,174	64,8	0,556	3,54
60	983,1	4,179	65,9	0,478	2,98
70	977,8	4,187	66,8	0,415	2,55
80	971,8	4,195	67,4	0,365	2,21
90	965,3	4,208	68,0	0,326	1,95
100	958,4	4,220	68,3	0,295	1,75

Приложение В

Градуировочная таблица хромель-алюмелевой термопары (градуировка ХА)

$t_{2.c.}, ^\circ C$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36
10	0,40	0,44	0,48	0,52	0,56	0,60	0,64	0,68	0,72	0,76
20	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16
30	1,20	1,24	1,28	1,32	1,36	1,41	1,45	1,49	1,53	1,57
40	1,61	1,65	1,69	1,73	1,77	1,82	1,86	1,90	1,94	1,98
50	2,02	2,06	2,10	2,14	2,18	2,23	2,27	2,31	2,35	2,39
60	2,43	2,47	2,51	2,56	2,60	2,64	2,68	2,72	2,77	2,81
70	2,85	2,89	2,93	2,97	3,01	3,06	3,10	3,14	3,18	3,22
80	3,26	3,30	3,34	3,39	3,43	3,47	3,51	3,55	3,60	3,64
90	3,68	3,72	3,76	3,81	3,85	3,89	3,93	3,97	4,02	4,06
100	4,10	4,14	4,18	4,22	4,26	4,31	4,35	4,39	4,43	4,47

Приложение Г

Градуировочная таблица хромель-копелевой термопары (градуировка ХК)

$t_{2.c.}, ^\circ C$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62

Учебное издание

Техническая термодинамика

Методические указания к лабораторным работам
В двух частях
Часть I

Составители:

Ольшанский Валерий Иосифович
Жерносек Сергей Васильевич
Котов Алексей Анатольевич
Ольшанский Анатолий Иосифович
Гусаров Алексей Михайлович

Редактор *Т.А. Осипова*
Корректор *А.В. Пухальская*
Компьютерная верстка *А.А. Котов*

Подписано к печати 17.12.2018. Формат 60x90^{1/16}. Усл. печ. листов 4,0.
Уч.-изд. листов 4,2. Тираж 50 экз. Заказ № 372.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Витебский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.