

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Институт энергетики и автоматизации

Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА C_p/C_v

2-е издание, дополненное и переработанное

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине «Техническая термодинамика»
для студентов институтов энергетики и автоматизации
и безотрывных форм обучения

Направление подготовки: 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
Профили подготовки: «Промышленная теплоэнергетика»
«Энергетика теплотехнологий»

Санкт-Петербург
2017

Определение отношения теплоемкостей воздуха C_p/C_v : методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Техническая термодинамика» для студентов институтов энергетики и автоматизации и безотрывных форм обучения. 2-е изд., доп. и перераб./ сост. В.Г. Злобин, С.В. Горбай, М.С. Липатов; ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2017. – 14 с.

В методических указаниях излагаются цель, задачи определения экспериментальным путем значения показателей адиабаты k для воздуха и содержание выполнения лабораторной работы.

Предназначены для студентов II курса направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профили подготовки: «Промышленная теплоэнергетика» и «Энергетика теплотехнологий».

Рецензент: заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики института энергетики и автоматизации, кандидат технических наук, доцент С.Н. Смородин.

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой теплосиловых установок и тепловых двигателей ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 7 от 02.02.2017 г.).

Утверждены к изданию методической комиссией института энергетики и автоматизации ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 5 от 29.03.2017 г.).

Цель работы

- определить экспериментальным путем значения показателя адиабаты $k = C_p / C_v$ для воздуха и сравнить с табличной величиной.

1. Теоретические основы работы

Теплоемкостью C_T тела называется физическая величина, численно равная количеству тепла, которое надо передать телу, чтобы повысить его температуру на один градус:

$$C_T = \frac{Q}{\Delta T} \quad (1.1)$$

или $C_T = \frac{dQ}{dT}.$ (1.2)

В системе СИ единицы теплоемкости $[C_T] = \text{Дж} / \text{град}.$

Удельной теплоемкостью вещества называется теплоемкость единицы массы этого вещества:

$$c = \frac{C_T}{m} = \frac{dQ}{mdT}. \quad (1.3)$$

В системе СИ единицы удельной теплоемкости $[c] = \text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{град}).$

Молярной теплоемкостью вещества называется теплоемкость одного моля этого вещества:

$$C_\mu = \frac{C_T}{\nu} = \frac{\mu \cdot C_T}{m} = \frac{\mu \cdot dQ}{m \cdot dT}, \quad (1.4)$$

где $\nu = \frac{m}{\mu}$ - число молей, содержащихся в m кг вещества;

μ - молярная масса вещества.

Используя первое начало термодинамики и определение молярной теплоемкости, можно выразить ее через изменение внутренней энергии и работу газа:

$$C_{\mu} = \frac{dU_{\mu}}{dT} + \frac{dL_{\mu}}{dT}. \quad (1.5)$$

Важной особенностью газов является то, что для различных процессов (изо процессов) теплоемкость газа своя:

$$\text{для изохорического процесса } C_{\mu V} = \frac{i}{2} \mu R,$$

$$\text{для изобарического процесса } C_{\mu P} = \frac{i+2}{2} \mu R,$$

где i - число степеней свободы молекул данного газа;

μR - универсальная газовая постоянная, $8314 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$.

Важной характеристикой свойств газов является величина

$$k = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \quad (1.6)$$

Эта величина, связывающая друг с другом параметры состояния идеального газа в адиабатическом процессе, входит в уравнение

$$p \cdot V^k = \text{const}. \quad (1.7)$$

Адиабатическим называется процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой, т.е. газ не отдает и не получает тепла извне. Уравнение (1.7) называется уравнением Пуассона, входящая в него константа k - коэффициентом Пуассона.

1.1. Постановка задачи

В настоящей работе для измерения величины k используется метод, предложенный в 1819 г. Клеманом и Дезормом. Суть метода заключается в следующем. Берется некоторая масса газа в состоянии 1 с параметрами состояния p_1 , T_1 и адиабатически расширяется, переходя в состояние 2 с параметрами p_2 , T_2 . Из уравнения (1.7) с учетом уравнения состояния идеального газа следует:

$$p_1^{\frac{1}{k}-1} \cdot T_1 = p_2^{\frac{1}{k}-1} \cdot T_2. \quad (1.8)$$

Затем газ изохорически нагревается до исходной температуры T_1 . При этом давление возрастает до величины p_3 (состояние 3). Параметры состояний 2 и 3 связаны соотношением:

$$\frac{p_3}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}. \quad (1.9)$$

Исключив из уравнений (1.8) и (1.9) отношение T_1/T_2 , получим:

$$k = \frac{\ln(p_1 / p_2)}{\ln(p_1 / p_3)}. \quad (1.10)$$

На практике метод Клемана-Дезорма реализуется следующим образом (рис. 1).

В стеклянную емкость 1 накачивается воздух компрессором 2 при открытом клапане 3 до давления p_1 , превышающего атмосферное на 2000÷2500 Па (200÷250 мм. вод. столба), после чего кран 3 закрывают. После установления термодинамического равновесия воздуха в емкости с окружающей средой (состояние 1 на рис. 2) открывается клапан 4, соединяющий баллон с атмосферой. Излишек воздуха выходит из емкости, давление в емкости падает до атмосферного, температура падает несколько ниже комнатной (состояние 2 на рис. 2). Этот процесс протекает достаточно быстро (за время 0,1÷0,5 с), поэтому теплообменом емкости с атмосферой можно пренебречь, т.е. считать процесс расширения воздуха адиабатическим.

Затем клапан 4 закрывают и выжидают некоторое время, пока оставшийся в емкости воздух не нагреется до комнатной температуры (состояние 3 на рис. 2).

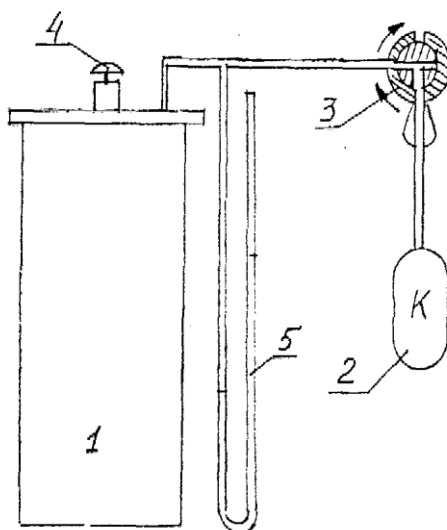


Рис.1. Схема лабораторной установки

Параметры состояния 1 и 2 связаны уравнением адиабаты в виде:

$$p_1 \cdot V_1^k = p_2 \cdot V_2^k, \quad (1.11)$$

где V_2 - объем воздуха при давлении p_2 , равный объему емкости в состоянии 2;

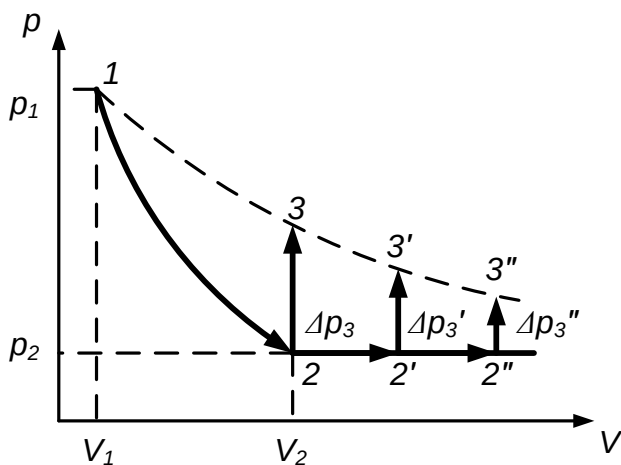


Рис.2. Диаграмма $p-V$

V_1 - объем воздуха при давлении p_1 , т.е. той части воздуха, которая осталась в емкости после адиабатического расширения воздуха.

Параметры состояния воздуха в точках 1 и 3 принадлежат одной изотерме.

Поэтому:

$$p_1 \cdot V_1 = p_3 \cdot V_2. \quad (1.12)$$

Из уравнений (1.11) и (1.12) следует выражение для k (1.10), которое можно упростить, используя небольшое отличие давлений p_1 и p_3 от атмосферного давления p_2 :

$$k = \frac{\ln(p_1 / p_2)}{\ln(p_1 / p_3)} = \frac{\ln\left(1 + \frac{p_1 - p_2}{p_2}\right)}{\ln\left(1 + \frac{p_1 - p_3}{p_3}\right)} = \frac{\ln(1 + \alpha)}{\ln(1 + \beta)}, \quad (1.13)$$

где $\alpha \ll 1$ и $\beta \ll 1$.

Используя первый член разложения величины $\ln(1 + x)$ в ряд Маклорена, получим:

$$k = \frac{(p_1 - p_2)p_3}{(p_1 - p_3)p_2} \approx \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_3} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_3}, \quad (1.14)$$

где $p_1 = p_2 + \Delta p_1$;

$$p_3 = p_2 + \Delta p_3.$$

Анализируя полученное соотношение (1.14), приходим к выводу, что для определения γ удобно использовать U - образный жидкостной манометр, у которого разность уровней жидкости в сообщающихся трубках пропорциональна разности между измеряемыми давлениями и атмосферным.

При этом (1.14), где $\Delta p_1 = \rho g \Delta H_1$ и $\Delta p_3 = \rho g \Delta H_3$, запишем в виде:

$$k = \frac{\Delta H_1}{\Delta H_1 - \Delta H_3}. \quad (1.15)$$

1.2. Методика проведения эксперимента и расчетные соотношения

Применяемая методика определения величины k требует выполнения следующих условий:

1. В процессе 1-2 выпускной клапан емкости баллона должен быть перекрыт в момент, когда давление в емкости станет равным атмосферному p_2 .

2. Время τ , в течение которого давление в емкости уменьшается от p_1 до p_2 , должно быть достаточно мало, чтобы пренебречь теплообменом воздуха, находящегося в емкости, с окружающей средой.

Практически эти условия выполнить трудно, поскольку для получения величины k с относительной погрешностью 2 % необходимо вручную открыть клапан на 0,1 с, что является для экспериментатора весьма сложной задачей. Поэтому для получения значений k с приемлемой погрешностью применяют различные методы учета факторов, указанных в п. п. 1 и 2. Рассмотрим один из них.

Предположим, что после достижения давления p_2 клапан сброса остается открытым еще некоторое время τ . За это время происходит изобарический нагрев (процесс 2-2' на рис. 2) воздуха за счет теплообмена со стенками емкости, а также продолжающее истечение газа через открытый клапан за счет его расширения.

После закрытия клапана (состояние 2') происходит изохорический нагрев (процесс 2'-3'). Давление в емкости достигает $p_2 + \Delta p_3'$. Конечное состояние (точка 3') находится на изотерме 1-3-3'-3". При этом $\Delta p_3 > \Delta p_3' > \Delta p_3''$.

Будем считать, что при адиабатическом расширении воздуха теплообмена со стенками емкости не происходит. Рассмотрим процесс 2-2'. За время $d\tau$ воздух получит от стенки емкости некоторое количество тепла:

$$m \cdot c_p dT = -\alpha(T - T_1)d\tau, \quad (1.16)$$

где α - коэффициент теплоотдачи;

T - температура воздуха в момент времени τ ;

T_1 - температура стенки емкости, равная температуре воздуха в состоянии 1;

m - масса воздуха в емкости (переменная величина).

Решая уравнение (1.16) для процесса 2-2', получим:

$$\ln \frac{T - T_1}{T} = - \frac{\alpha \cdot R \cdot T_1}{p_2 \cdot V_1 \cdot c_p \cdot \mu} \tau + \ln A. \quad (1.17)$$

Константу A найдем из граничных условий: при $\tau = 0$, $A = (T_2 - T_1)/T_2$.

При этом следует иметь в виду, что масса воздуха в процессе 2-2' величина переменная:

$$m = \frac{p_2 \cdot V_1 \cdot \mu}{R \cdot T}.$$

Уравнение (1.17) можно записать в виде:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta T_2}{T_2} \exp \left(- \frac{\alpha}{m_1 \cdot c_p} \tau \right), \quad (1.18)$$

где T_2 - температура воздуха после адиабатического расширения в состоянии 2;

ΔT_2 - изменение температуры воздуха в адиабатическом процессе.

Рассмотрим процесс изохорического нагрева 2-3. Процесс нагревания газа от исходного состояния 2 можно выразить соотношением:

$$\Delta p = p_2 \frac{\Delta T}{T_1 - \Delta T}, \quad (1.19)$$

где p_2 и $(T_1 - \Delta T)$ - параметры в точке 2.

Для адиабатического процесса 1-2 при малых изменениях Δp_1 и ΔT_2 запишем:

$$\frac{\Delta T_2}{T_1} = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{\Delta p_1}{p_1}. \quad (1.20)$$

Решая систему уравнений (1.18), (1.19), (1.20) и пренебрегая малыми величинами второго порядка, получим:

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p} = \frac{k}{k-1} \exp\left(-\frac{\alpha}{m_0 \cdot c_p} \tau\right). \quad (1.21)$$

Соотношение (1.21) позволяет определить величину k по измеренной разности $\Delta h = \Delta p / \rho g$ столбов жидкости в U - образном манометре при различном времени τ открытия клапана емкости.

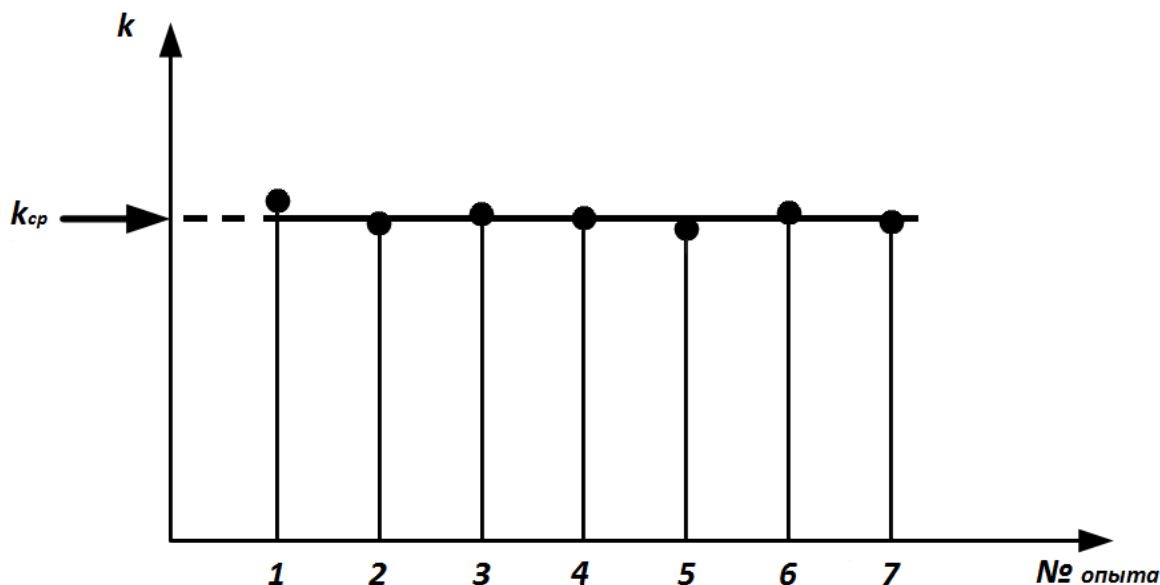


Рис.3. График зависимости $k = f(\text{№ опыта})$

График зависимости $k = f(\text{№ опыта})$ является линейной функцией (рис.3), экстраполируя которую, можно отсечь на оси координат отрезок, равный $k_{\text{ср}}$.

Строго говоря, в приведенном методе измеряется величина k для каждого конкретного опыта, а по отклонению экспериментальных точек от средней прямой определяется погрешность определения величины k .

2. Описание экспериментальной установки.

В стеклянный баллон 1 (см. рис.1), соединенный с компрессором 2, через напускной клапан 3 накачивается воздух. Клапан сброса воздуха 4, находящийся на верхней крышке установки, позволяет резко уменьшить давление в баллоне практически без теплообмена с окружающей средой. На рис. 4 представлена передняя панель установки 6, на которой размещаются тумблер «СЕТЬ» 7, тумблер «КОМПРЕССОР» 8, водяной U - образный манометр 5, кран 3 перепуска воздуха со следующими положениями:

«ОТКРЫТ» - положение ручки крана на данной отметке открывает линию к компрессору 2 (см. рис.1);

«ЗАКРЫТ» - положение ручки крана на данной отметке перекрывает стеклянный баллон 1 (см. рис.1);

«РЕГУЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ» - положение ручки крана на данной отметке позволяет отрегулировать уровень воды в коленях U - образного манометра после заполнения баллона воздухом.

Измеряемые величины: ΔH и Δh - разница высот столбов жидкости в манометре в начале и в конце опыта.

Установка работает следующим образом:

В баллон с воздухом 2 (см. рис. 1) накачивается воздух до определенного избыточного давления (разность уровней в коленях U - образного манометра должна составлять: $\Delta H = (20 \div 24)$ см. В каждой серии опытов эта разность должна быть одинаковой (регулируется краном 3). После выравнивания температуры воздуха в баллоне и температуры окружающей среды осуществляется сброс давления через выпускное отверстие с клапаном. При этом клапан удерживается в открытом состоянии определенное время ($5 \div 25$ с) После того, как клапан сброса закрылся, осуществляется изохорный процесс теплообмена с окружающей средой. Температура воздуха в баллоне приближается к температуре окружающей среды, а разность уровней в U - образном манометре увеличивается до величины Δh .

3. Порядок выполнения работы

Ознакомьтесь с табл. 1.

Таблица 1. Спецификация измерительных приборов

Наименование прибора и его тип	Пределы измерения	Цена деления	Инструментальная погрешность
Линейка	$0 \div 400$ мм	1 мм	1 мм
Секундомер	$0 \div 3600$ с	0,2 с	0,2 с

1. Включить установку тумблером «СЕТЬ», повернуть ручку крана 3 в положение «ОТКРЫТ» (положение 9 см. рис. 4). Включить тумблером 8 «КОМПРЕССОР». Установить разность уровней воды в манометре $200 \div 240$

мм. После этого повернуть ручку крана 3 в положение «ЗАКРЫТ» (положение 10).

2. Подождать 1-2 мин. до тех пор, пока температура воздуха в баллоне не станет равна температуре окружающей среды.

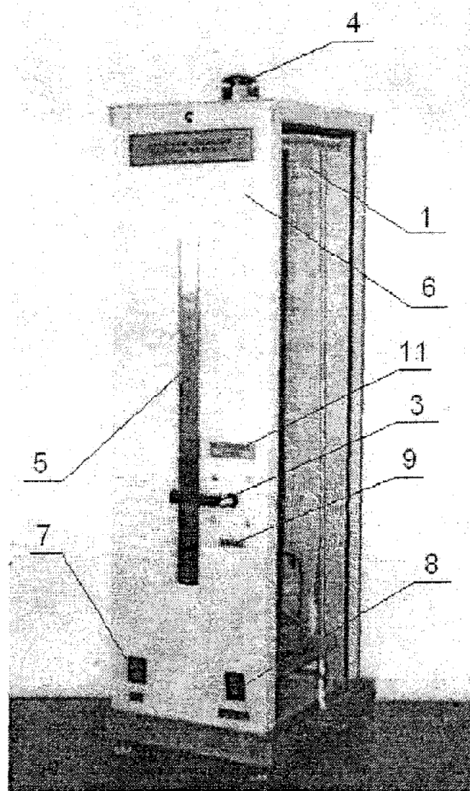
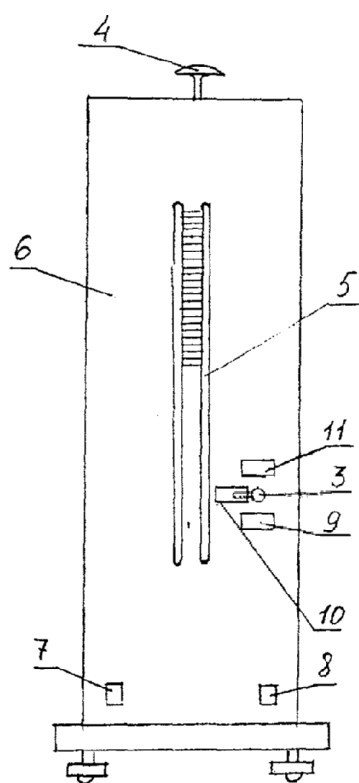


Рис.4. Лабораторная установка по определению отношения теплоемкостей воздуха C_p / C_v

3. Произвести дополнительную регулировку разности уровней в манометре, стремясь к тому, чтобы в каждом опыте эта разность была постоянной. При этом ручка крана 3 плавно переводится в положение «РЕГУЛИРОВКА УРОВНЯ» (положение 11 на рис. 4) и обратно.

4. По нижнему уровню мениска определить уровни H_1 и H_2 в коленах манометра. Записать эти значения, а также их разность в табл. 2.

5. Резко (но не сильно) нажать выпускной клапан 4 и через 0,5 с закрыть его (отпустить).

6. Через $2 \div 3$ мин., после того как уровни воды в манометре стабилизируются, определить значения уровней h_1 и h_2 и занести результаты в табл. 2.

7. Повторить опыт (пункты 1÷6) до полного заполнения табл. 2.

Таблица 2. Результаты эксперимента

Опыт №	H_1 , см	H_2 , см	ΔH , см	h_1 , см	h_2 , см	Δh , см	k	$k_{\text{теор}}$	$k_{\text{ср}}$	Δk	δk , %
1								1,4			
2											
3											
4											
5											
6											
7											

4. Обработка результатов

1. Вычислить $\Delta H = H_1 - H_2$.
2. Вычислить $\Delta h = h_1 - h_2$.
3. Определить для каждого опыта свое значение:

$$k = \frac{1}{1 - \frac{\Delta h}{\Delta H}}. \quad (1.22)$$

4. Найти среднее арифметическое значение искомой величины по формуле $k_{\text{ср}} = \frac{k_1 + k_2 + \dots + k_N}{N}$, где N – число опытов.

5. Рассчитать абсолютную погрешность (Δk) и относительную погрешность (δk) величины k , исходя из истинного значения искомой величины по следующим формулам:

$$\Delta k = |k_{\text{ср}} - k|, \quad (1.23)$$

$$\delta k = \frac{\Delta k}{k_{\text{ср}}} \cdot 100 \%. \quad (1.24)$$

6. Данные результатов вычислений занести в табл. 2.
7. Построить график зависимости $k = f(\text{№ опыта})$, отметить в графике зависимости прямую $k_{\text{ср}}$, оценить по отклонению экспериментальных точек от средней прямой погрешность определения величины k .

5. Контрольные вопросы

1. Дайте определение адиабатическому процессу.
2. Какие факторы влияют на точность экспериментального определения коэффициента Пуассона?
3. Какие термодинамические процессы происходят в емкости с воздухом при проведении опыта?
4. Какие величины измеряются в опыте?
5. Вывести соотношение для экспериментального определения коэффициента Пуассона.
6. Как исключить факторы, влияющие на точность определения коэффициента Пуассона?

Библиографический список

1. Трофимова Т.И. Основы термодинамики.— М.: Издательский Центр «Академия», 2008. § 2.2.1-2.2.6.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. — 4-е изд. — М.: Бином, 2010. § 17.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. — М.: Физматлит, 2006. §21, 22.

СОДЕРЖАНИЕ

Цель работы.....	3
1. Теоретические основы работы	3
1.1. Постановка задачи.....	5
1.2. Методика проведения эксперимента и расчетные соотношения.....	8
2. Описание экспериментальной установки.	10
3. Порядок выполнения работы.....	11
4. Обработка результатов.....	13
5. Контрольные вопросы.....	14
Библиографический список	14

Редактор и корректор Н.П. Новикова
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2017 г., поз. 56

Подп. к печати 27.04.17. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1.
Печать офсетная. Объем 1,0 печ.л; 1,0 уч.-изд.л.
Тираж 50 экз. Изд. №56. Цена "С" . Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,
г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.