

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра физики

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

Лабораторный практикум К-303.2
по дисциплине «Физика»
для обучающихся всех специальностей
и направлений бакалавриата

Составитель Т. В. Лавряшина
 И. В. Цвеклинская
 А. А. Мокрушев

Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 6 от 29.01.2020

Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
направления подготовки 20.03.01
Протокол № 7 от 25.02.2020

Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Методические рекомендации студентам	2
Лабораторная работа № 1 «Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса».....	3
Лабораторная работа № 2 «Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Пуазейля».....	9
Лабораторная работа № 3 «Определение коэффициента Пуассона методом Клемана – Дезорма».....	16
Лабораторная работа № 4 «Определение изменения энтропии при изохорном процессе в газах».....	21
Вопросы для самоподготовки.....	26
Список рекомендуемой литературы.....	28

Методические рекомендации студентам

В лабораторный практикум К-303.2 включены лабораторные работы по разделу физики «Молекулярная физика. Термодинамика», предусмотренные рабочей программой дисциплины «Физика» для студентов всех специальностей и направлений подготовки.

При выполнении лабораторного практикума студент не только получает элементарные навыки проведения эксперимента, но и учится самостоятельно анализировать физические явления, сопоставлять выводы теории и экспериментальные результаты, выделять главное, понимать роль идеализации, рассчитывать погрешности измерений.

Рекомендации студентам по организации самостоятельной работы в учебных лабораториях включают следующие положения:

1. На каждое занятие согласно графику выполнения лабораторных работ студент приходит подготовленным. На самостоятельную работу студентам по учебному плану отводится 50 % от объёма часов, предназначенных для изучения дисциплины, в том числе на подготовку к выполнению каждой лабораторной работы около 4 часов.

2. Подготовка включает изучение содержания лабораторной работы, проработку теоретического материала по учебникам и учебным пособиям для самостоятельной работы, заготовку краткого конспекта отчёта предстоящей работы. Конспект отчёта содержит название и цель работы, рисунок установки, поясняющий идею метода, рабочие формулы и таблицы для занесения в них измеряемых и вычисляемых величин. Конспект отчёта может быть выполнен как в рукописном, так и в электронном варианте.

3. Для выполнения работы необходимо получить допуск, объяснив суть используемого метода, устройство установки, порядок измерений, алгоритм вычислений искомых величин и их погрешностей, а также ожидаемый характер исследуемых зависимостей.

4. Результаты эксперимента и отчёт, содержащий вывод о проделанной работе, подписываются преподавателем.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса

1. Цель работы: определить коэффициент внутреннего трения жидкости методом Стокса и число Рейнольдса.

2. Оборудование: цилиндр с исследуемой жидкостью, шарик, микрометр, линейка, секундомер, магнит.

3. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] § 48; [2] 10.7, 10.8; [3] §§ 39–43, 79; б) ответить на вопросы для самоподготовки 1–17; в) уметь пользоваться измерительными приборами.

Для выполнения работы студент должен знать: а) явления переноса (диффузию, внутреннее трение, теплопроводность) и уравнения, описывающие эти неравновесные процессы; б) методику расчёта коэффициента внутреннего трения жидкости, его физический смысл; в) физический смысл числа Рейнольдса и различие между ламинарным и турбулентным течением жидкости; г) порядок расчёта абсолютной и относительной погрешностей при прямых и косвенных измерениях.

4. Выполнение работы

4.1. Метод расчёта коэффициента внутреннего трения

В трубах при движении жидкости различные слои жидкости движутся с разными скоростями, причём, чем дальше слой от стенки сосуда, тем его скорость больше. При этом слой жидкости с большей скоростью увлекает рядом находящийся слой, движущийся с меньшей скоростью. Слой же с меньшей скоростью, в свою очередь, действует на слой, движущийся с большей скоростью, и тормозит его, то есть происходит обмен импульсом соседних слоёв. В жидкостях, где расстояние между молекулами меньше, чем в газах, внутреннее трение обусловлено, в первую

очередь, молекулярным взаимодействием и увеличивается с понижением температуры.

При установившемся движении скорости слоёв остаются постоянными. Силу, с которой один слой жидкости действует на другой, называют *силой внутреннего трения*. Величина силы внутреннего трения зависит от разности скоростей движения слоёв, от расстояния между слоями и площади их соприкосновения:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S,$$

где F – модуль силы внутреннего трения; η – коэффициент внутреннего трения, зависящий от природы и температуры жидкости; $\frac{dv}{dx}$ – производная, характеризующий быстроту изменения скорости течения жидкости в направлении оси X , перпендикулярном площадке S . Знак модуля в формуле поставлен в связи с тем, что в зависимости от направления оси X и характера изменения скорости течения жидкости производная $\frac{dv}{dx}$ может быть как положительной, так и отрицательной, а модуль силы F – положительная величина.

Коэффициент внутреннего трения может быть определен из наблюдений за движением шарика в вязкой среде (метод Стокса).

На шарик (рис. 1), движущийся в вязкой среде, действуют силы:

- 1) направленная вниз сила тяжести

$$m g = \rho V g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g, \quad (1)$$

где m – масса шарика; V – его объём; ρ – плотность материала шарика; g – ускорение свободного падения;

- 2) направленная вверх сила Архимеда

$$F_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 g, \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность жидкости;

3) сила сопротивления среды, обусловленная вязкостью жидкости, направлена в сторону, противоположную скорости движения шарика.

Согласно формуле, выведенной Стоксом, сила внутреннего

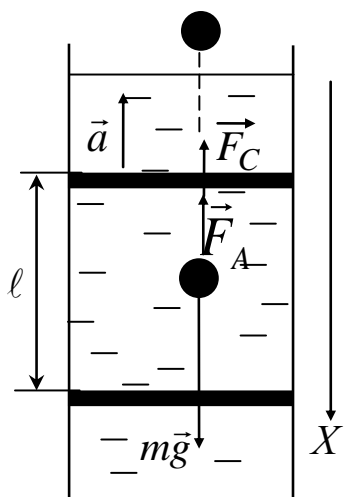


Рис. 1. Схема сил, действующих на движущийся в жидкости шарик

трения пропорциональна скорости v шарика, его радиусу r и коэффициенту η внутреннего трения (динамической вязкости):

$$F_C = 6 \pi \eta r v. \quad (3)$$

Эта формула справедлива для движущегося в жидкости твёрдого шарика при условии, что скорость его невелика, а расстояние до границ жидкости значительно больше диаметра шарика.

Основное уравнение поступательного движения шарика записывается в виде

$$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_C = m\vec{a}. \quad (4)$$

В проекции на ось X (см. рис. 1) с учётом равенств (1–3) уравнение (4) примет вид

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 g - 6 \pi \eta r v = -m a. \quad (5)$$

Сила сопротивления $F_C = 6 \pi \eta r v$ зависит от скорости и при некотором её значении движение шарика становится равномерным, то есть выполняется соотношение

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 g - 6 \pi \eta r v_0 = 0, \quad (6)$$

где $v_0 = \frac{\ell}{t}$ – скорость установившегося равномерного движения;

ℓ – расстояние между метками на цилиндре с жидкостью;
 t – время равномерного движения шарика между метками.

Из уравнения (6) с учётом соотношения для определения скорости v_0 равномерного движения определяют коэффициент внутреннего трения исследуемой жидкости

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0) g d^2 t}{18 \ell}. \quad (7)$$

Для характеристики свойств жидкости кроме коэффициента η внутреннего трения используют понятие кинематической вязкости ν . Кинематическая вязкость определяется отношением коэффициента внутреннего трения η к плотности ρ вещества:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (8)$$

Своим происхождением эта характеристика обязана классическим методам измерения вязкости жидкости. Одним из таких методов является измерение времени вытекания жидкости заданного объёма через калиброванное отверстие под действием силы тяжести. Прибор для измерения вязкости называется *вискозиметром*.

4.2. Измерения и расчёт коэффициента внутреннего трения и кинематической вязкости жидкости

4.2.1. Измерить диаметр d шарика пять раз. Результаты измерения диаметра шарика и расчёта погрешностей прямых измерений занести в табл. 1.

4.2.2. Определить абсолютную и относительную погрешности измерений диаметра шарика.

4.2.3. Осторожно опустить шарик в цилиндр. Когда шарик окажется на уровне верхнего края первой метки, включить секундомер. Секундомер необходимо выключить, когда шарик достигнет верхнего края второй метки. Результат считать промахом, если шарик движется вблизи стенки сосуда. С помощью магнита извлечь шарик из жидкости.

4.2.4. Опыт повторить пять раз. Время t_i движения шарика занести в табл. 2, аналогичную табл. 1 (составить самостоятельно).

4.2.8. Определить абсолютную погрешность $\Delta\eta$ результата косвенных измерений коэффициента внутреннего трения

$$\Delta\eta = \langle \eta \rangle \varepsilon_\eta,$$

где $\langle \eta \rangle$ – среднее значение коэффициента внутреннего трения. Не забудьте полученный результат разделить на 100 %, если ε_η рассчитано в процентах.

Результат вычислений записать в виде

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta\eta.$$

4.2.9. Рассчитать среднее значение $\langle v \rangle$ кинематической вязкости жидкости, используя соотношение

$$\langle v \rangle = \frac{\langle \eta \rangle}{\rho_0}.$$

4.3. Определение числа Рейнольдса

Перенос импульса молекулами жидкости из слоя в слой происходит только при её слоистом движении, когда соседние слои, имеющие различные скорости, движутся по параллельным траекториям. Такое течение жидкости называют *ламинарным*. Это означает, что скорость частиц жидкости, проходящих через данную точку пространства, одна и та же. С увеличением скорости течения до нестационарного, при котором скорость частиц в каждой точке пространства беспорядочно изменяется, течение становится *турбулентным*, происходит интенсивное перемешивание жидкости.

Характер течения жидкости (или газа) определяется значением безразмерной величины – числа Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\rho_0 \langle v \rangle L}{\eta}, \quad (9)$$

где ρ_0 – плотность жидкости (газа); $\langle v \rangle$ – средняя по сечению трубы скорость потока; L – размер, характерный для поперечного потока; η – коэффициент внутреннего трения.

С учётом соотношения (8) число Рейнольдса можно записать в виде

$$\text{Re} = \frac{\langle v \rangle L}{\langle \nu \rangle}.$$

При расчёте числа Рейнольдса в данной лабораторной работе в качестве характерного размера используйте среднее значение диаметра шарика, а среднюю по сечению трубы скорость потока примите равной скорости равномерного движения шарика, так как его диаметр много меньше диаметра сосуда:

$$\text{Re} = \frac{\langle \ell \rangle \langle d \rangle}{\langle t \rangle \langle \nu \rangle}. \quad (10)$$

Движение жидкости, увлекаемой движущимся в ней шариком, будет ламинарным при условии $\text{Re}_{\text{крит}} < 1$.

4.3.1. Рассчитать число Рейнольдса по соотношению (10). Каков характер движения жидкости в сосуде, обусловленный равномерным падением в ней шарика?

5. Сделать вывод.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Пуазейля

1. Цель работы: экспериментально определить коэффициент внутреннего трения воды методом Пуазейля; установить характер движения жидкости.

2. Оборудование: экспериментальная установка для определения коэффициента внутреннего трения воды, секундомер, штангенциркуль, масштабная линейка, термометр.

3. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] § 48; [2] 10.7, 10.8; [3] §§ 39–

43, 79; б) ответить на вопросы для самоподготовки 1–16, 18; в) изучить экспериментальную установку.

Для выполнения работы студент должен знать: а) явления переноса (диффузия, внутреннее трение, теплопроводность) и уравнения, описывающие эти неравновесные процессы; б) физический смысл коэффициента внутреннего трения и числа Рейнольдса; в) различие между ламинарным и турбулентным течением жидкости; г) методику расчёта погрешностей прямых и косвенных измерений; д) уметь пользоваться измерительными приборами.

4. Выполнение работы

4.1. Описание установки

Установка (рис. 1) для определения коэффициента внутреннего трения жидкости методом Пуазейля состоит из сосуда 1 с исследуемой жидкостью, капиллярной трубки 2 длиной ℓ и радиусом R , сосуда 3 для сбора жидкости, протекающей через капиллярную трубку за время t , и штатива с крючком 4 для закрепления капиллярной трубки.

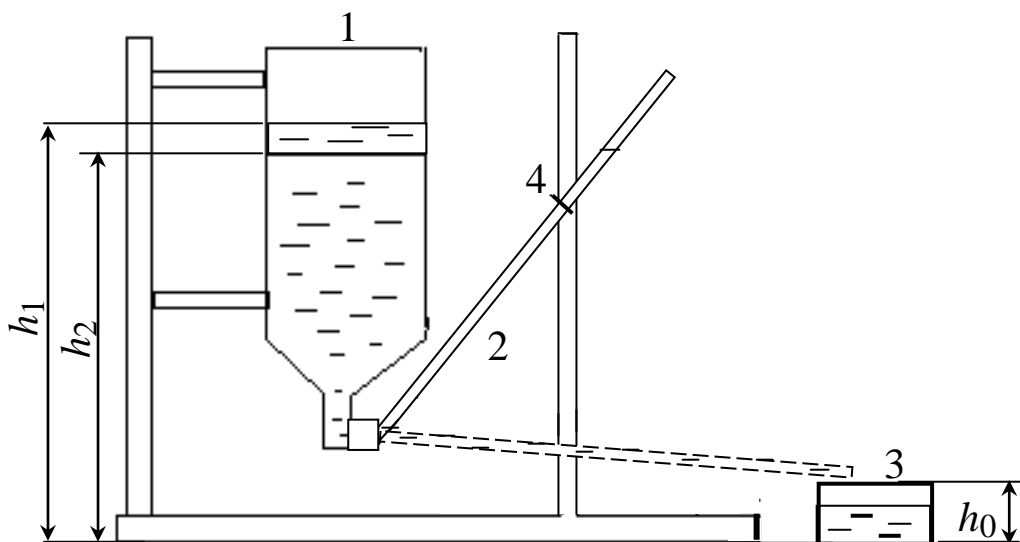


Рис. 1. Схема установки для расчёта коэффициента внутреннего трения

4.2. Метод расчёта коэффициента внутреннего трения жидкости

Внутреннее трение (вязкость) возникает при относительном перемещении параллельно движущихся слоёв вещества. При этом за счёт обмена импульсами частиц соседних слоёв происходит выравнивание скоростей их движения.

Величина силы внутреннего трения зависит от разности скоростей движения слоёв, от расстояния между слоями и площади их соприкосновения:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S,$$

где F – модуль силы внутреннего трения; η – коэффициент внутреннего трения, зависящий от природы и температуры жидкости; $\frac{dv}{dx}$ – производная, характеризующий быстроту изменения скорости течения жидкости в направлении оси X , перпендикулярном

площадке S . Знак модуля в формуле поставлен в связи с тем, что в зависимости от направления оси X и характера изменения скорости течения жидкости производная $\frac{dv}{dx}$ может быть как положительной, так и отрицательной, а модуль силы F – положительная величина.

Для определения коэффициента внутреннего трения в данной работе используется метод Пуазейля, в котором жидкость плотностью ρ в сосуде 1 создает гидростатическое давление. При её вытекании через капиллярную трубку за время dt уровень жидкости в сосуде понижается на dh , что приводит к уменьшению давления на концах трубки на dp :

Для определения коэффициента внутреннего трения в данной работе используется метод Пуазейля, в котором жидкость плотностью ρ в сосуде 1 создает гидростатическое давление. При её вытекании через капиллярную трубку за время dt уровень жидкости в сосуде понижается на dh , что приводит к уменьшению давления на концах трубки на dp :

$$dp = -\rho g dh \quad \text{или} \quad dp = -\frac{\rho g}{S} dV, \quad (1)$$

где S – площадь поперечного сечения столба жидкости в сосуде; dV – изменение объёма жидкости в сосуде за время dt .

Такой же объём dV жидкости протекает и через капиллярную трубку радиусом R и длиной ℓ за время dt . Согласно форму-

ле Пуазейля (см. [1] § 32) объём жидкости, протекающей через трубку, определяется соотношением

$$dV = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \ell \eta} dt, \quad (2)$$

где $\Delta p = p_1 - p_2$ – разность статических давлений.

Статические давления p_1 и p_2 на концах капиллярной трубки определяются суммой атмосферного давления p_0 и гидростатического давления ρgh жидкости:

$$p_1 = p_0 + \rho gh \quad \text{и} \quad p_2 = p_0 + \rho gh_0, \quad (3)$$

где h – высота уровня жидкости в сосуде; h_0 – высота, на которой находится нижний конец капиллярной трубки (h и h_0 отсчитывается от одной и той же поверхности).

Разность статических давлений Δp на концах капиллярной трубки равна

$$\Delta p = \rho g(h - h_0). \quad (4)$$

Система уравнений (1)–(4) даёт дифференциальное уравнение

$$dh = -\frac{\pi R^4 \rho g (h - h_0)}{8 S \ell \eta} dt.$$

После интегрирования уравнение примет вид

$$\ln \frac{h_1 - h_0}{h_2 - h_0} = \frac{\pi R^4 \rho g t}{8 S \ell \eta},$$

где h_1 и h_2 – уровни жидкости в сосуде в начальный и конечный моменты времени протекания жидкости по капиллярной трубке.

Приняв во внимание, что площадь поперечного сечения столба жидкости в сосуде $S = \pi d^2 / 4$ (d – внутренний диаметр сосуда), получим формулу для расчёта коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Пуазейля:

$$\eta = \frac{\rho g R^4 t}{2 d^2 \ell \ln \frac{h_1 - h_0}{h_2 - h_0}}. \quad (5)$$

4.3. Измерения и расчёт коэффициента внутреннего трения воды и её кинематической вязкости

4.3.1. Измерить внутренний диаметр d сосуда 1, высоту h_0 сосуда 3, длину ℓ капиллярной трубки и начальное положение h_1 уровня жидкости в сосуде 1. Радиус R капиллярной трубки указан на установке. Для определения плотности воды при температуре проведения эксперимента использовать справочные данные. Результаты занести в табл. 1.

4.3.2. Снять капиллярную трубку 2 с крючка 4 и поместить свободный её конец на сосуд 3, одновременно включив секундомер для измерения времени t течения жидкости.

4.3.3. Закрепить капиллярную трубку 2 на крючке 4, измерить положение h_2 уровня жидкости в сосуде после вытекания её части за время t .

Таблица 1

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости

$d =$ $\ell =$ $R =$ $\rho =$

№ п/п	h_1 м	h_0 м	h_2 м	t с	η Па·с	$\langle \eta \rangle$ Па·с	$\eta_{\text{табл}}$ Па·с	$\langle v \rangle$ м ² /с
1								
2								
3								
4								
5								

4.3.4. Рассчитать по формуле (5) коэффициент внутреннего трения воды и его среднее значение $\langle \eta \rangle$, сравнить полученное значение с табличным значением $\eta_{\text{табл}}$ при заданной температуре проведения эксперимента:

$$\varepsilon_{\eta} = \frac{|\langle \eta \rangle - \eta_{\text{табл}}|}{\eta_{\text{табл}}} \cdot 100 \%$$

4.3.5. Рассчитать среднее значение кинематической вязкости $\langle \nu \rangle$ исследуемой жидкости, используя соотношение

$$\langle \nu \rangle = \frac{\langle \eta \rangle}{\rho}.$$

4.4. Определение характера течения жидкости в сосуде и капиллярной трубке

При малых скоростях потока жидкости её движение *слоистое*. Графически такое движение изображают с помощью линий тока. *Линия тока* – это линия, в каждой точке которой вектор скорости частиц жидкости направлен по касательной к ней. Часть потока, ограниченная линиями тока, образует *трубку тока*. Движение жидкости называется *установившимся (стационарным)*, если форма и расположение линий тока, а также значение скоростей в каждой её точке со временем не изменяются. Течение жидкости называется *ламинарным*, если соседние слои не перемешиваются. При перемешивании слоёв и образовании вихрей течение жидкости будет *турбулентным*.

Рейнольдс установил, что характер течения жидкости определяется безразмерной величиной Re (число Рейнольдса):

$$Re = \frac{\rho \langle v \rangle L}{\eta}, \quad (7)$$

где ρ – плотность жидкости; $\langle v \rangle$ – средняя по сечению скорость потока, которая определяется отношением объёма V_t жидкости, протекающей за время t , к площади S поперечного сечения потока:

$$\langle v \rangle = \frac{V_t}{t S}, \quad (8)$$

L – характерный размер для поперечного сечения потока (например, радиус при круглом сечении); η – коэффициент внутреннего трения жидкости.

С учётом соотношения (8) формула для определения числа Рейнольдса примет вид

$$Re = \frac{\rho V_t L}{\eta t S}. \quad (9)$$

Объём V_t жидкости, протекающей за время t внутри сосуда 1, рассчитывается по формуле

$$V_t = \frac{\pi d^2}{4} (h_1 - h_2), \quad (10)$$

где d – внутренний диаметр сосуда; h_1 и h_2 – положение уровней жидкости в сосуде (рис. 1).

Решая совместно (9) и (10), получим формулу для определения числа Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\rho L (h_1 - h_2)}{\eta t}. \quad (11)$$

4.4.1. Рассчитать число Рейнольдса Re для течения воды в сосуде 1 и в капиллярной трубке по соотношению (11), используя среднее значение коэффициента $\langle \eta \rangle$ внутреннего трения. Характерный размер L поперечного потока в первом случае принять равным радиусу сосуда 1, а во втором случае – радиусу R капиллярной трубки. Разность уровней $(h_1 - h_2)$ и время t течения жидкости взять, используя один из экспериментов. Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

Определение числа Рейнольдса

Величина	ρ	$\langle \eta \rangle$	$(h_1 - h_2)$	t	L	Re
	кг/м ³	Па·с	м	с	м	
Сосуд						
Капиллярная трубка						

4.4.3. Определить характер течения воды в сосуде и в капиллярной трубке, учитывая, что для трубы круглого сечения критическое значение числа Рейнольдса $\text{Re}_{\text{крит}} \approx 10^3$.

5. Сделать вывод.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Определение коэффициента Пуассона методом Клемана – Дезорма

1. Цель работы: определить коэффициент Пуассона для воздуха методом Клемана – Дезорма.

2. Оборудование: экспериментальная установка, секундомер.

3. Подготовка к работе: а) изучить теоретические положения по учебникам: [1] §§ 50–55; [2] 9.1–9.6; [3] §§ 65–69; б) ответить на вопросы для самоподготовки 19–26; в) уметь пользоваться измерительными приборами.

Для выполнения работы необходимо знать: а) определения и уравнения четырех процессов в идеальных газах (изотермический, изобарный, изохорный, адиабатный), их графическое представление в различных координатах; б) первое начало термодинамики; в) понятия удельной и молярной теплоёмкости; г) метод определения коэффициента Пуассона; д) соотношение Майера; е) расчёт погрешностей измерений.

4. Выполнение работы

4.1. Описание установки

Экспериментальная установка (рис. 1) для определения коэффициента Пуассона γ состоит из сосуда 1 большой ёмкости, заполненного воздухом, и жидкостного манометра 2. Кран 3 соединяет сосуд либо с насо-

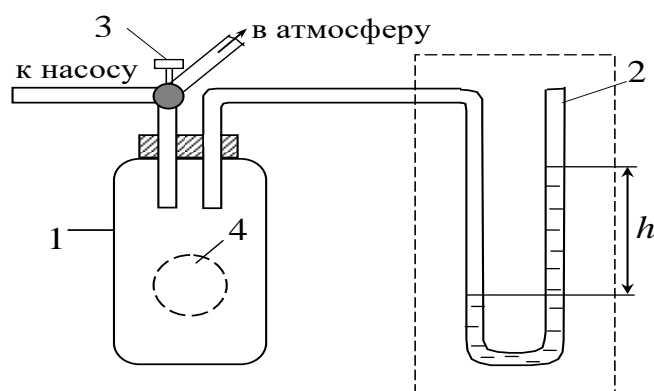


Рис. 1. Экспериментальная установка:
1 – сосуд с воздухом; 2 – жидкостный манометр; 3 – кран; 4 – выделенный объём

сом, либо с атмосферой. Накачивание воздуха в сосуд при помощи насоса приводит к повышению в нём давления. Увеличение давления в сосуде по сравнению с атмосферным определяется разностью уровней h жидкости в манометре. Увеличивать давление в сосуде можно медленно (изотермически) или быстро (адиабатный процесс). Сжатие воздуха сопровождается повышением его температуры. После прекращения накачивания воздуха в сосуде будет протекать изохорный процесс с понижением температуры. Если кран соединяет воздух в сосуде с атмосферой, то часть его выйдет из сосуда (адиабатное расширение), и температура воздуха в сосуде понизится. Давление воздуха в сосуде станет равным атмосферному. После закрытия крана воздух в сосуде изохорно нагревается до комнатной температуры.

4.2. Методика расчёта коэффициента Пуассона

Коэффициент Пуассона γ численно равен отношению удельных (или молярных) теплоёмкостей газа при постоянном давлении и объёме:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{C_{Mp}}{C_{MV}}. \quad (1)$$

Молярные теплоёмкости газа при постоянном давлении C_{Mp} и при постоянном объёме C_{MV} определяются соотношениями

$$C_{Mp} = \frac{i+2}{2} R \quad \text{и} \quad C_{MV} = \frac{i}{2} R, \quad (2)$$

где i – число степеней свободы молекулы газа.

Следовательно, коэффициент Пуассона γ зависит от типа молекул газа:

$$\gamma = \frac{i+2}{i}. \quad (3)$$

Коэффициент Пуассона входит в уравнение адиабатного процесса, связывающего, например, давление p и объём V :

$$pV^\gamma = \text{const}. \quad (4)$$

Для экспериментального определения коэффициента Пуассона мысленно выделим внутри сосуда произвольную часть воздуха, ограниченную замкнутой поверхностью 4. Воздух, заключённый внутри этой поверхности, будет расширяться или сжиматься, совершая работу против давления окружающего воздуха в сосуде, и обмениваться с ним теплом. Когда кран соединяет сосуд с атмосферой, давление p_0 выделенной массы воздуха равно атмосферному давлению, а её температура T_0 равна комнатной температуре.

Параметры, характеризующие состояние воздуха в выделенном объёме, при протекании указанных ниже процессов (рис. 2) имеют следующие значения:

1 состояние (в конце изохорного охлаждения) – p_1, T_0, V_1 ;

2 состояние (в конце адиабатного расширения) – p_0, T, V_2 ;

3 состояние (в конце изохорного нагревания) – p_2, T_0, V_2 .

При адиабатном переходе воздуха из состояния 1 в состояние 2 теплообмена с окружающей средой не происходит ($\delta Q = 0$).

Взяв полный дифференциал от выражения (4), получим после преобразования

$$\gamma p dV + V dp = 0. \quad (5)$$

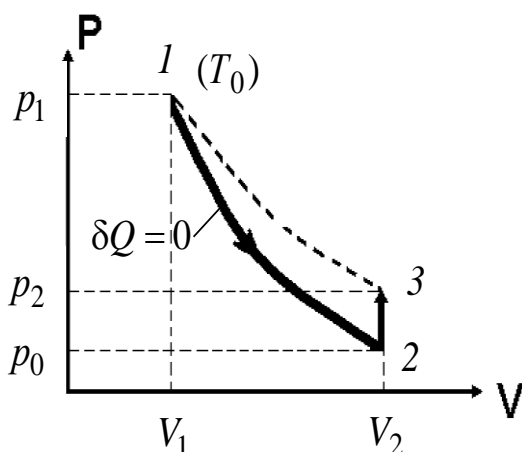


Рис. 2. Зависимость давления от объёма при адиабатном расширении и изохорном нагревании воздуха

Разности давлений $p_1 - p_0$ и $p_2 - p_1$ много меньше атмосферного давления p_0 , поэтому для упрощения расчётов эти разности можно принять за бесконечно малые величины. Последнее относится и к соответствующим изменениям объёма выделенной части воздуха. С учётом этого уравнение (5) можно записать в виде

$$\gamma p (V_2 - V_1) + V(p_0 - p_1) = 0. \quad (6)$$

В состояниях 1 и 3 температура газа одинакова, поэтому

для этих состояний будет одинаковым и произведение pV , т. е. $pV = \text{const}$ и полный дифференциал

$$pdV + Vdp = 0$$

или

$$p(V_2 - V_1) + V(p_2 - p_1) = 0. \quad (7)$$

Из уравнений (6) и (7) выразим коэффициент Пуассона:

$$\gamma = (p_1 - p_0)/(p_1 - p_2). \quad (8)$$

Учитывая, что давление выделенной части воздуха в конце изохорного охлаждения зависит от атмосферного давления p_0 и добавочного давления, определяемого разностью уровней h_1 жидкости в манометре, получим

$$p_1 = p_0 + \rho gh_1, \quad (9)$$

где ρ – плотность воды в манометре.

Давление выделенной части воздуха в конце изохорного нагревания определяется соотношением

$$p_2 = p_0 + \rho gh_2. \quad (10)$$

Решая совместно уравнения (8)–(10), получим формулу для расчёта коэффициента Пуассона:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (11)$$

Следовательно, метод Клемана – Дезорма для определения коэффициента Пуассона γ состоит в измерении разности уровней в манометре h_1 (в конце процесса изохорного охлаждения воздуха в баллоне) и h_2 (в конце процесса его изохорного нагревания).

4.3. Измерения и расчёт коэффициента Пуассона

4.3.1. Накачать насосом воздух в сосуд до разности уровней жидкости в манометре 15–20 см.

4.3.2. Через 2–3 минуты (после прекращения перемещения уровней жидкости в коленах манометра) произвести отсчёт разности h_1 уровней жидкости в манометре. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений и расчёта коэффициента Пуассона

№ п/п	h_1	h_2	$\gamma_{\text{э}}$	$\langle \gamma_{\text{э}} \rangle$	$\gamma_{\text{т}}$	ε
	мм	мм				%
1						
2						
3						
4						
5						

4.3.3. Открыть кран и в момент, когда прекратится шипение (сравняются уровни жидкости в коленах манометра), закрыть его. Через 2–3 минуты произвести отсчёт разности h_2 уровней жидкости в манометре.

4.3.4. По формуле (11) вычислить экспериментальное значение коэффициента Пуассона $\gamma_{\text{э}}$.

4.3.5. Опыт повторить не менее 5 раз, следя за тем, чтобы перед началом опытов система каждый раз находилась в состоянии, близком к исходному состоянию 1.

4.3.6. Рассчитать среднее значение $\langle \gamma_{\text{э}} \rangle$ экспериментально определённого коэффициента Пуассона.

4.3.7. Учитывая, что воздух является смесью двухатомных газов (азот, кислород, водород) и трехатомного углекислого газа, молекулы которого имеют линейную цепочку, число степеней свободы i для жёстких молекул принять равным пяти. Рассчитать теоретическое значение $\gamma_{\text{т}}$ коэффициента Пуассона по соотношению (3):

$$\gamma_{\text{т}} = \frac{i+2}{i}.$$

4.3.8. Оценить отклонение ε результатов экспериментального измерения $\langle \gamma_{\text{э}} \rangle$ от расчётного значения $\gamma_{\text{т}}$:

$$\varepsilon = \frac{|\gamma_T - \langle \gamma_{\text{э}} \rangle|}{\gamma_T} \cdot 100\% .$$

5. Сделать вывод.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Определение изменения энтропии при изохорном процессе

1. Цель работы: определить изменение энтропии при изохорных процессах охлаждения и нагревания воздуха.

2. Оборудование: экспериментальная установка, секундомер.

3. Подготовка к работе: а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] §§ 57–58; [2] 11.3–11.6; [3] §§ 81–84; б) ответить на вопросы для самоподготовки 20, 27–32; в) уметь пользоваться измерительными приборами.

Для выполнения работы необходимо знать: а) определения и уравнения четырёх процессов в идеальных газах (изотермического, изобарного, изохорного, адиабатного), их графическое представление в координатах p – V , T – S ; б) первое и второе начала термодинамики; в) понятие энтропии, её статистический смысл; г) изменение энтропии в адиабатно замкнутых и открытых системах при равновесных и неравновесных процессах; д) метод расчёта изменения энтропии при изохорном нагревании и изохорном охлаждении воздуха; е) методику проведения измерений.

4. Выполнение работы

4.1. Описание установки

Установка (рис. 1) для экспериментального определения изменения энтропии ΔS состоит из сосуда 1 большой ёмкости, за-

полненного воздухом, и жидкостного манометра 2. Кран 3 соединяет сосуд с атмосферой. Если кран закрыт, то накачивание воздуха в сосуд при помощи насоса приводит к повышению в сосуде давления. Этот процесс можно совершать медленно (изотермически) или быстро (адиабатно). Увеличение давления в сосуде по сравнению с атмосферным определяется разностью уровней h жидкости в манометре.

Сжатие воздуха сопровождается повышением температуры по сравнению с комнатной. После прекращения накачивания воздуха в сосуд в нём будет протекать изохорный процесс охлаждения с понижением температуры.

При соединении сосуда с атмосферой накачанный воздух быстро выходит (адиабатный процесс), внутренняя энергия уменьшается, следовательно, воздух в сосуде охлаждается до температуры, ниже комнатной. После закрытия крана воздух в сосуде изохорно нагревается до комнатной температуры.

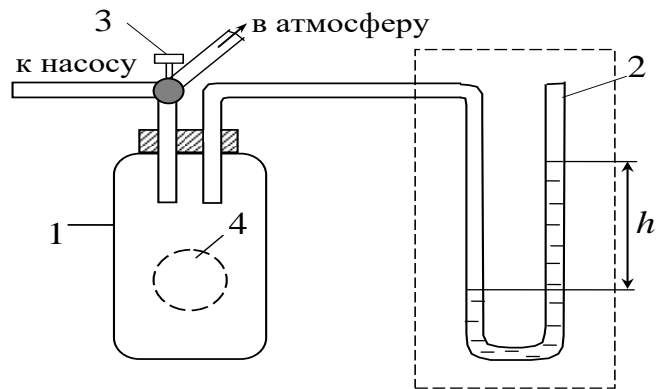


Рис. 1. Экспериментальная установка:
1 – сосуд с воздухом; 2 – жидкостный манометр; 3 – кран; 4 – выделенный объём

4.2. Методика расчёта изменения энтропии

Энтропия S – однозначная функция состояния открытой системы, её элементарное изменение при обратимом переходе системы из одного состояния в другое равно полученному или отданному количеству теплоты, делённому на температуру, при которой произошёл этот процесс.

При бесконечно малом изменении состояния системы справедливо соотношение

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{обр}} .$$

Для экспериментального определения изменения энтропии ΔS мысленно выделим внутри сосуда произвольную часть воздуха, ограниченную замкнутой поверхностью 4. Воздух, заключённый внутри этой поверхности, будет расширяться или сжиматься, совершая работу против давления окружающего воздуха в сосуде, и обмениваться с ним теплом.

При переходе системы из одного равновесного состояния 1 в другое состояние 2 через последовательность промежуточных равновесных состояний изменение энтропии рассчитывается по формуле

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{dU + \delta A}{T}, \quad (1)$$

где δQ – количество теплоты, подводимое к системе; dU – увеличение внутренней энергии системы; δA – работа, совершаемая системой над внешними телами.

При изохорном процессе работа не совершается $\delta A = 0$, так как $V = \text{const}$, $dV = 0$. Следовательно, изменение энтропии $\Delta S_{1 \rightarrow 2}$ при изохорном процессе определится соотношением

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 \frac{dU}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \frac{dT}{T} = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (2)$$

где i – число степеней свободы молекулы; m – масса газа; M – его молярная масса; R – молярная газовая постоянная; T – термодинамическая температура.

Уравнение изохорного процесса при переходе системы из состояния 1 в состояние 2 связывает давление газа и его температуру пропорциональной зависимостью:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (3)$$

Подставив уравнение (3) в уравнение (2), получим

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (4)$$

Следовательно, для определения изменения энтропии $\Delta S_{1 \rightarrow 2}$ при изохорном нагревании необходимо измерить давление в начальном p_1 и конечном p_2 состояниях газа.

4.3. Определение изменения энтропии при изохорных процессах охлаждения и нагревания воздуха

4.3.1. Используя уравнение Клапейрона – Менделеева, рассчитать число ν_0 молей воздуха в объёме сосуда V при атмосферном давлении p_0 и температуре T_0 . Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Определение числа молей воздуха в сосуде

Давление $p_0, \text{Па}$	Температура $T_0, \text{К}$	Объём $V, \text{м}^3$	Число молей $\nu_0, \text{моль}$

4.3.2. Закрывать кран и накачать в сосуд воздух, следя за показаниями манометра. Разность уровней h_1 в нём не должна превышать 15–20 см. Записать это значение в табл. 2.

Давление p_1 (рис. 2) в исходном состоянии 1 определяется суммой атмосферного давления p_0 и добавочного давления $\rho g h_1$:

$$p_1 = p_0 + \rho g h_1. \quad (5)$$

где ρ – плотность воды в манометре.

4.3.3. Измерить разность уровней h_2 жидкости в манометре в конце изохорного охлаждения через 2–3 минуты. Температура воздуха в сосуде станет равной температуре в комнате (уровни жидкости перестанут перемещаться). В конце изохорного процесса (состояние 2) давление воздуха в сосуде уменьшается и становится равным p_2 :

$$p_2 = p_0 + \rho g h_2. \quad (6)$$

*Результаты измерений уровней жидкости
и расчёта изменения энтропии*

$$\rho = \quad ; \quad \nu =$$

№ П/П	h_1	h_2	h_3	$\ln \frac{p_2}{p_1}$	$\Delta S_{1 \rightarrow 2}$	$\langle \Delta S_{1 \rightarrow 2} \rangle$	$\ln \frac{p_3}{p_0}$	$\Delta S_{3 \rightarrow 4}$	$\langle \Delta S_{3 \rightarrow 4} \rangle$
	м	м	м		Дж/К	Дж/К		Дж/К	Дж/К
1									
2									
3									
4									
5									

4.3.4. Используя соотношения (4)–(6), рассчитать изменение энтропии $\Delta S_{1 \rightarrow 2}$ при изохорном охлаждении ν молей выделенной части воздуха (задаётся преподавателем):

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = \frac{i}{2} \nu R \ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{i}{2} \nu R \ln \frac{p_0 + \rho g h_2}{p_0 + \rho g h_1}. \quad (7)$$

4.3.5. Открыть кран и закрыть его сразу, как только сравняются уровни жидкости в манометре. Давление воздуха в сосуде станет равным атмосферному давлению p_0 (состояние 3).

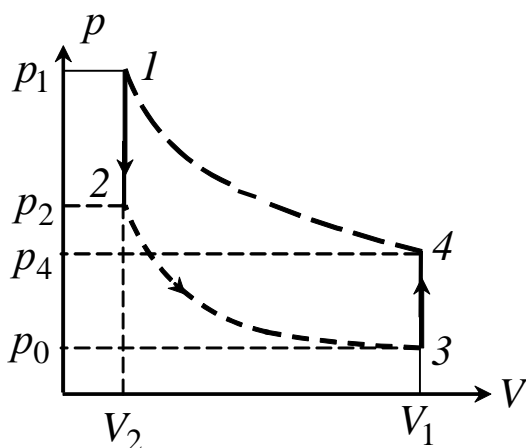


Рис. 2. Зависимость давления от объёма для выделенной части воздуха в сосуде

4.3.6. Через 2–3 минуты измерить разность уровней жидкости в манометре h_3 . Температура воздуха в сосуде станет равной комнатной (состояние 4), а давление p_4 будет определяться разностью уровней жидкости в манометре h_3 :

$$p_4 = p_0 + \rho g h_3. \quad (8)$$

4.3.7. Рассчитать изменение энтропии $\Delta S_{3 \rightarrow 4}$ при изохорном нагревании ν молей воздуха по формуле

$$\Delta S_{3 \rightarrow 4} = \frac{i}{2} \nu R \ln \frac{p_4}{p_0} = \frac{i}{2} \nu R \ln \frac{p_0 + \rho g h_3}{p_0}. \quad (9)$$

4.3.8. Опыт повторить не менее 5 раз, следя за тем, чтобы перед началом опытов система каждый раз находилась в состоянии, близком к исходному состоянию 1.

5. Сделать вывод.

Вопросы для самоподготовки

1. При каких условиях возникают явления переноса? Перечислить эти явления.

2. Записать уравнения диффузии, теплопроводности, внутреннего трения. Что переносится при каждом из указанных явлений?

3. Каков физический смысл коэффициентов переноса?

4. Какова причина возникновения силы внутреннего трения?

5. В каких единицах измеряется коэффициент внутреннего трения?

6. Какие силы действуют на шарик, движущийся внутри жидкости?

7. Изменяется ли сила внутреннего трения в процессе движения шарика? Каков характер этого изменения, если начальная скорость непосредственно после погружения: а) равна нулю; б) равна скорости, которую приобретает шарик, когда падает с высоты h ?

8. Как зависит от температуры коэффициент внутреннего трения жидкости?

9. Зависит ли коэффициент внутреннего трения жидкости от диаметра шарика?

10. Как рассчитать кинематическую вязкость? В каких единицах она измеряется?

11. Что называют линией тока? Тружкой тока?

12. Какое движение жидкости называется стационарным?

13. Какое течение жидкости называется ламинарным? Турбулентным?

14. Каков критерий определения характера течения жидкости?
15. Как определить число Рейнольдса?
16. Какая скорость входит в формулу для определения числа Рейнольдса?
17. В чём состоит метод Стокса для определения коэффициента внутреннего трения?
18. Как выводится формула Пуазейля, определяющая объём жидкости, протекающей по трубе за единицу времени?
19. Какими параметрами характеризуется состояние термодинамической системы?
20. Как формулируется первый закон термодинамики? Как записывается этот закон для различных термодинамических процессов?
21. Как рассчитать удельные теплоёмкости c_p и c_v для идеального газа?
22. Как на практике реализовать адиабатный процесс?
23. Как записываются уравнения адиабатного процесса? Что характеризует показатель адиабаты?
24. В чём состоит экспериментальный метод Клемана – Дезорма?
25. Почему коэффициент Пуассона больше единицы? Может ли он быть равным единице?
26. Какие процессы протекают с воздухом в данной работе? Как изменяются параметры воздуха при этом?
27. Как определяется элементарное изменение энтропии при обратимом равновесном процессе?
28. В каком направлении может изменяться энтропия замкнутой системы? Незамкнутой?
29. Как изменяется (убывает или возрастает) энтропия при различных обратимых процессах?
30. Как рассчитать изменение энтропии в четырёх изопроцессах в газах?
31. Как изображаются в координатах $p-V$ и $T-S$ четыре изопроцесса в газах?
32. Какова связь энтропии S с термодинамической вероятностью w ?

Список рекомендуемой литературы

1. Трофимова, Т. И. Курс физики : учебное пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 14-е изд., стер. – Москва : Академия, 2007. – 560 с. – (Высшее профессиональное образование). – ISBN 5769539367. – Текст : непосредственный.

2. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2007. – 720 с. – (Высшее образование). – ISBN 9785769538018. – Текст : непосредственный.

3. Савельев, И. В. Курс физики. Т. 1. Механика. Молекулярная физика : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по техническим и технологическим направлениям и специальностям / И. В. Савельев. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2007. – 352 с. – (Классическая учебная литература по физике). – ISBN 5811406852. – Текст : непосредственный.

Составители

Лавряшина Таисия Васильевна
Цвеклинская Ирина Валентиновна
Мокрушев Андрей Александрович

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

Лабораторный практикум К-303.2
по дисциплине «Физика»
для обучающихся всех специальностей
и направлений бакалавриата

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 10.03.2020. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 1,5.

Тираж 20 экз. Заказ _____.

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП Кузбасского государственного технического
университета имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 а.