

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

Кафедра физики

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

Лабораторный практикум К-303.2
по дисциплине «Физика»
для технических специальностей и направлений

Составитель Т. В. Лавряшина

Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 13 от 27.05.2014

Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
направления 280700.62
Протокол № 2 от 01.10.2014

Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2014

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Методические рекомендации студентам | 2 |
| Лабораторная работа № 1 «Определение коэффициента внутреннего трения 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»..... | 15 |
| Лабораторная работа № 4 «Определение изменения энтропии при изохорном процессе в газах»..... | 20 |
| Вопросы для самоподготовки..... | 25 |
| Список рекомендуемой литературы..... | 26 |

Методические рекомендации студентам

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

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 объема часов, отводимых 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 отчета предстоящей работы. Конспект отчета содержит название и цель работы, рисунок установки, поясняющий идею метода, рабочие формулы и таблицы для занесения в них измеряемых и вычисляемых величин. Конспект отчета 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 отчет, содержащий вывод о проделанной работе, подписываются преподавателем.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса

1. Цель работы: определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса.

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 (диффузия, внутреннее трение, теплопроводность) и уравнения, описывающие эти неравновесные процессы; б) методику расчета коэффициента внутреннего трения жидкости, его физический смысл; в) физический смысл числа Рейнольдса и различие между ламинарным и турбулентным течением; г) порядок расчета абсолютной и относительной погрешностей при прямых и косвенных измерениях.

4. Выполнение работы

4.1. Метод расчета коэффициента внутреннего трения

В трубах при движении жидкости различные слои жидкости движутся с разными скоростями, причем, 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 слоев.

При установившемся движении скорости слоев остаются постоянными. Силу, с которой один слой жидкости действует на

другой, называют *силой внутреннего трения*. Величина силы внутреннего трения зависит от разности скоростей движения слоев, от расстояния между слоями и площади их соприкосновения.

Эта зависимость выражается формулой

$$\vec{F} = \eta \left| \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta x} \right| S,$$

где \vec{F} – сила внутреннего трения; η – коэффициент внутреннего трения; $\Delta \vec{v}$ – разность скоростей слоев, отстоящих на расстояние Δx ; $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta x}$ – градиент скорости, характеризующий быстроту ее изменения в указанном направлении; S – площадь, на которую действует сила трения.

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 объем; ρ – плотность материала шарика; g – ускорение свободного падения;

2) направленная вверх сила Архимеда

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

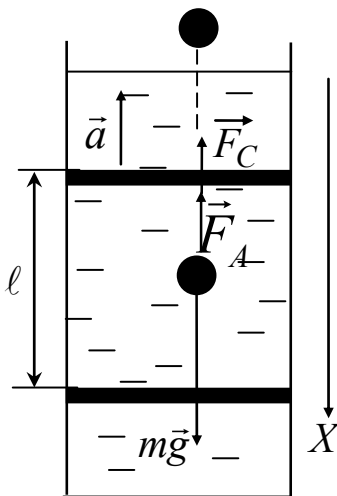


Рис. 1. Схема сил, действующих на движущийся в жидкости шарик

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 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 твердого 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 учетом 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 ее 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.

Из уравнения (6) с учетом соотношения для определения скорости v_0 равномерного движения находят коэффициент внутреннего трения исследуемой жидкости:

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

4.2. Измерения и расчет коэффициента внутреннего трения и кинематической вязкости

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

4.2.2. Определить абсолютную и относительную погрешность измерений диаметра шарика.

Таблица 1

Результаты измерений диаметра шарика и расчета погрешностей прямых измерений

$$\alpha = 0,95;$$

$$t_{\alpha,n} = 2,78$$

| № П/П | d_i | $\langle d \rangle$ | Δd_i | Δd_i^2 | $\sum \Delta d_i^2$ | $\sigma_{\langle d \rangle}$ | $\Delta d_{\text{сл}}$ | $\Delta d_{\text{пр}}$ | Δd | ε_d | $\langle d \rangle \pm \Delta d$ |
|----------|-------|---------------------|--------------|-----------------|---------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|------------|-----------------|----------------------------------|
| | мм | мм | мм | мм ² | мм ² | мм | мм | мм | мм | % | мм |
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | |

4.2.3. Осторожно опустить шарик в цилиндр. Когда шарик окажется на уровне края верхней метки, включить секундомер. Секундомер необходимо выключить, когда шарик достигнет верхнего края второй метки. Результат считать промахом, если шарик движется вблизи стенки сосуда.

4.2.4. С помощью магнита извлечь шарик из масла. Опыт повторить пять раз. Время движения t_i шарика занести в табл. 2, аналогичную табл. 1 (составить самостоятельно).

4.2.5. Измерить расстояние ℓ_i между метками на цилиндре (например, по верхним краям меток). Измерения занести в табл. 3, аналогичную табл. 1 (составить самостоятельно).

4.2.6. Вычислить среднее значение коэффициента внутреннего трения $\langle \eta \rangle$ по формуле (7), подставляя в нее средние значения диаметра $\langle d \rangle$, времени $\langle t \rangle$ равномерного движения шарика и

расстояния $\langle \ell \rangle$ между метками. Данные измерений и вычислений занести в табл. 4.

4.2.7. Рассчитать относительную погрешность результата косвенных измерений коэффициента внутреннего трения

$$\varepsilon_{\eta} = \sqrt{4\varepsilon_d^2 + \varepsilon_t^2 + \varepsilon_{\ell}^2}.$$

Таблица 4

*Результаты расчета коэффициента внутреннего трения
и кинематической вязкости*

| $\langle d \rangle$ | $\langle \ell \rangle$ | $\langle t \rangle$ | ρ | ρ_0 | $\langle \eta \rangle$ | ε_{η} | $\Delta\eta$ | $\langle \nu \rangle$ |
|---------------------|------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------------------|----------------------|--------------|-----------------------|
| м | м | с | кг/м ³ | кг/м ³ | Па · с | % | Па · с | м ² /с |
| | | | | | | | | |

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 кинематической вязкости $\langle \nu \rangle$, используя соотношение

$$\langle \nu \rangle = \frac{\langle \eta \rangle}{\rho_0}. \quad (8)$$

4.3. Определение числа Рейнольдса

Перенос молекулами жидкости из слоя в слой происходит только при ее слоистом движении, когда соседние слои, имеющие различные скорости, движутся по параллельным траекториям. Такое течение жидкости (или газа) 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 учетом соотношения (8) число Рейнольдса можно записать в виде

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

При расчете 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:

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

Турбулентное течение возникает при значениях числа Рейнольдса $\text{Re} > 10^3$.

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: экспериментальное определение коэффициента внутреннего трения воды методом Пуазейля.

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

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 расчета 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 капилляр за время t и штатива с крючком 4 для закрепления капиллярной трубки.

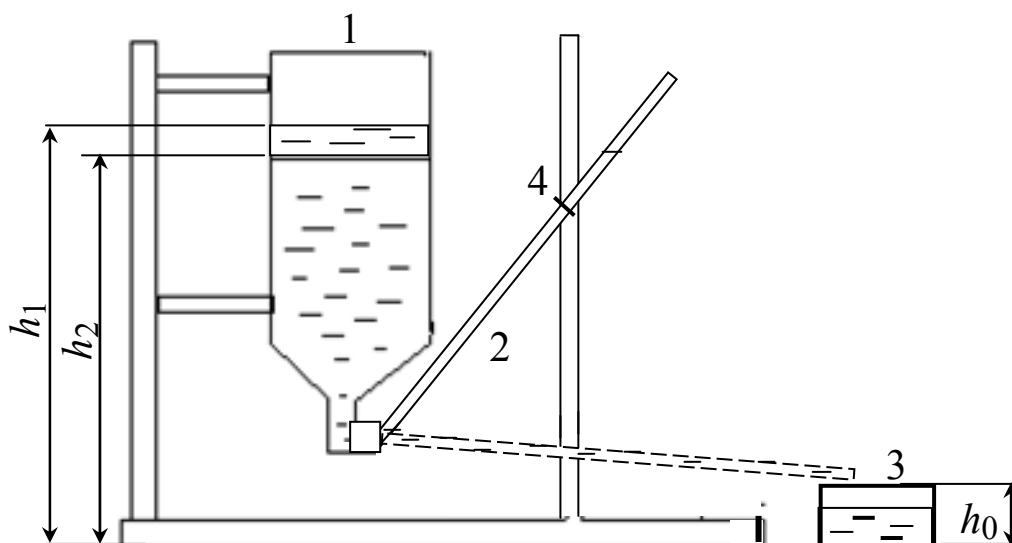


Рис. 1. Схема установки для расчета коэффициента внутреннего трения

4.2. Метод расчета коэффициента внутреннего трения жидкости

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

Согласно закону Ньютона сила внутреннего трения F , возникающая между слоями площадью S , зависит от коэффициента внутреннего трения η и модуля градиента скорости $\left| \frac{dv}{dx} \right|$ направленного движения слоев:

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

Градиент скорости направленного движения слоев, характеризует быстроту изменения скорости в направлении, перпендикулярном движению слоев.

Для определения коэффициента внутреннего трения в данной работе используется метод Пуазейля, в котором жидкость плотностью ρ в сосуде 1 создает гидростатическое давление. При ее вытекании через капилляр за время dt уровень жидкости в со-

суде понижается на dh , что приводит к уменьшению давления на концах капилляра 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 объема жидкости в сосуде за время dt .

Такой же объем dV жидкости протекает и через капиллярную трубку радиусом R и длиной ℓ за время dt . Согласно формуле Пуазейля (см. [1] § 32) объем протекающей через трубку жидкости 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 на концах капиллярной трубки.

Статические давления p_1 и p_2 на концах капиллярной трубки определяются суммой атмосферного давления p_0 и гидростатического давления $\rho g h$ жидкости:

$$p_1 = p_0 + \rho g h \quad \text{и} \quad p_2 = p_0 + \rho g h_0, \quad (3)$$

где h – высота уровня жидкости в сосуде; h_0 – высота, на которой находится нижний конец капилляра (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) дает дифференциальное уравнение:

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

Решение этого уравнения после разделения переменных и интегрирования имеет 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 капилляру.

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

4.3.1. Измерить внутренний диаметр d сосуда 1, высоту h_0 сосуда 3, положение h_1 уровня жидкости в сосуде 1. Длина ℓ капиллярной трубки, ее радиус R и плотность жидкости ρ указаны на установке. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости

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

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

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

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

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.

4.3.5. Рассчитать среднее значение кинематической вязкости $\langle \nu \rangle$ исследуемой жидкости, учитывая, что кинематической вязкостью ν называется отношение динамической вязкости η жидкости к ее плотности ρ :

$$\langle \nu \rangle = \frac{\langle \eta \rangle}{\rho}. \quad (6)$$

4.4. Определение характера течения жидкости в сосуде и капилляре

При малых скоростях потока жидкости ее 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 ее точке со временем не изменяются. Течение жидкости называется *ламинарным*, если соседние слои не перемешиваются. Если вдоль потока происходит образование вихрей и перемешивание слоев жидкости, то течение называется *турбулентным*.

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

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

где ρ – плотность жидкости; $\langle \nu \rangle$ – средняя по сечению скорость потока, которая определяется отношением объема V_t жидкости,

протекающей за время t , к площади S поперечного сечения потока

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

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

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

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

Объем 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). Результаты занести в табл. 2.

4.4.1. Рассчитать объем V_t жидкости, протекающей по цилиндрическому сосуду 1 (следовательно, и по капиллярной трубке) за время t .

4.4.2. Рассчитать число Рейнольдса Re для течения жидкости в сосуде 1 и в капиллярной трубке по соотношению (9), используя среднее значение коэффициента внутреннего трения жидкости $\langle \eta \rangle$. Характерный размер L поперечного потока в первом случае принять равным внутреннему радиусу r сосуда 1 и во втором случае – радиусу R капилляра.

Таблица 2

Определение числа Рейнольдса

| Величина | ρ | $\langle \eta \rangle$ | V_t | t | L | Re |
|----------|-------------------|------------------------|----------------|-----|-----|----|
| | кг/м ³ | Па·с | м ³ | с | м | |
| Сосуд | | | | | | |
| Капилляр | | | | | | |

4.4.3. Определить характер течения жидкости в сосуде 1 и в капиллярной трубке, учитывая, что критическое значение числа Рейнольдса для трубки круглого сечения $Re_{кр} \approx 10^3$. При значении числа Рейнольдса $Re < Re_{кр}$ движение жидкости является ламинарным.

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 теплоемкости; г) метод определения коэффициента Пуассона; д) соотношение Майера; е) расчет погрешностей измерений.

4. Выполнение работы

4.1. Описание установки

Экспериментальная установка (рис. 1) для определения коэффициента Пуассона γ состоит из сосуда 1 большой емкости, заполненного воздухом, и жидкостного манометра 2. Кран 3 со-

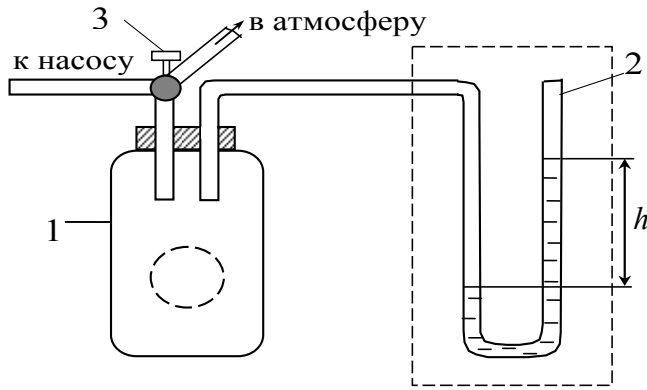


Рис. 1. Экспериментальная установка:
1 – сосуд с воздухом; 2 – жидкостный манометр; 3 – кран

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 сосуд с атмосферой, то часть воздуха 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.

единяет сосуд либо с насосом, либо с атмосферой. Накачивание воздуха в сосуд при помощи насоса приводит к повышению в нем давления. Увеличение давления в сосуде по сравнению с атмосферным определяется разностью уровней жидкости в манометре.

4.2. Методика расчета коэффициента Пуассона

Коэффициент Пуассона γ численно равен отношению удельных (или молярных) теплоемкостей газа при постоянном давлении и объеме

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

Молярные теплоемкости газа при постоянном давлении C_{Mp} и при постоянном объеме 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 объем V

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

Для экспериментального определения коэффициента Пуассона мысленно выделим внутри сосуда произвольную часть воздуха, ограниченную замкнутой поверхностью. Воздух, заключенный 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 выделенной массы воздуха равно атмосферному давлению p_0 , а ее температура T_0 равна комнатной температуре.

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

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

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

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

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

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

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

Разности давлений $p_1 - p_0$ и $p_2 - p_1$ много меньше атмосферного давления p_0 , поэтому для упрощения расчетов эти разности можно принять за бесконечно малые величины. Последнее относится и к соответствующим изменениям объема выделенной

части воздуха. С учетом этого уравнение (5) можно записать в виде:

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

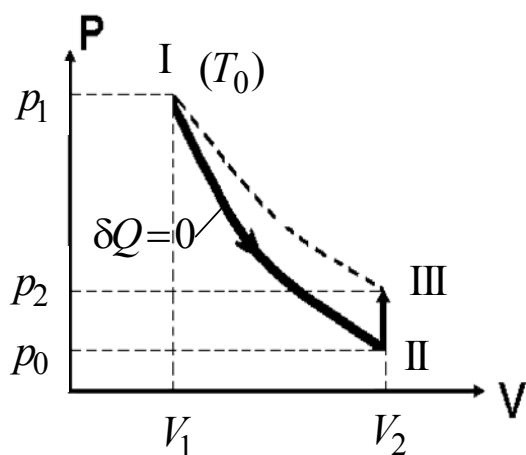


Рис. 2. Зависимость давления от объема при адиабатном расширении и изохорном нагревании воздуха

В состояниях I и III температура газа одинакова, поэтому для этих состояний будет одинаковым и произведение pV , то есть $pV = \text{const}$ 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 воздуха в конце изохорного охлаждения зависит от атмосферного давления и добавочного давления, определяемого разностью уровней h_1 жидкости в манометре, получим

$$p_1 = p_0 + \rho g h_1, \quad (9)$$

где ρ – плотность жидкости в манометре.

Давление воздуха в конце изохорного нагревания определяется соотношением

$$p_2 = p_0 + \rho g h_2. \quad (10)$$

Решая совместно уравнения (8)–(10), получим формулу для расчета 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 расчет 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 отсчет разности уровней жидкости в манометре h_1 . Результаты занести в табл. 1

Таблица 1

Результаты измерений и расчета 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 (сравниваются уровни жидкости в коленах манометра), закрыть его. Через 2–3 минуты произвести отсчет разности уровней жидкости в манометре h_2 .

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

4.3.5. Опыт повторить не менее 5 раз, примерно сохраняя степень накачивания.

4.3.6. Рассчитать среднее значение $\langle \gamma_{\text{э}} \rangle$ экспериментально определенного 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 жестких молекул принять равным пяти. Рассчитать

теоретическое значение γ_T коэффициента Пуассона по соотношению (3)

$$\gamma_T = \frac{i+2}{i}.$$

4.3.8. Оценить отклонение ε результатов экспериментального измерения $\langle \gamma_{\text{э}} \rangle$ от расчетного значения γ_T

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

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 27–32; в) уметь пользоваться измерительными приборами.

Для выполнения работы необходимо знать: а) определение и уравнения четырех процессов в идеальных газах (изотермического, изобарного, изохорного, адиабатного), их графическое представление в координатах $p-V$, $T-S$; б) первое и второе начало термодинамики; в) понятие энтропии, ее статистический смысл; г) изменение энтропии в адиабатно замкнутых и открытых системах при равновесных и неравновесных процессах; д) метод расчета 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 емкости, заполненного воздухом, и жидкостного (водяного) манометра 2. Кран 3 соединяет сосуд с атмосферой. Если кран закрыт, то накачивание воздуха в сосуд при помощи насоса 4 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

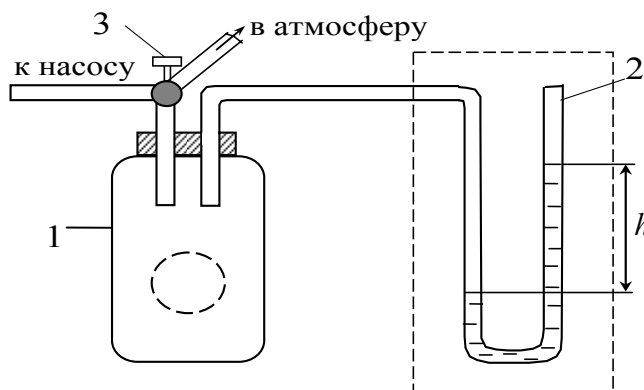


Рис. 1. Экспериментальная установка:
1 – сосуд с воздухом; 2 – жидкостный манометр; 3 – кран

жидкости в манометре.

Сжатие воздуха сопровождается повышением температуры по сравнению с комнатной. После прекращения накачивания воздуха в сосуд в нем 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.

4.2. Методика расчета изменения энтропии

Энтропия S – однозначная функция состояния открытой системы, ее элементарное изменение при обратимом переходе системы из одного состояния в другое равно полученному или от-

качивание воздуха в сосуд при помощи насоса 4 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

данному количеству теплоты, деленному на температуру, при которой произошел этот процесс.

Для бесконечно малого изменения состояния системы справедливо соотношение

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

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 прямо 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 процессе 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. Закрывать кран и накачать в сосуд воздух, следя за показаниями манометра. Разность уровней в нем не должна превышать 15–20 см. Записать значение h_1 в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений уровней жидкости и расчета изменения энтропии

$$p_0 = \quad ; \quad \rho = \quad ; \quad v =$$

| № 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 | | | | | | | | | |

При этом 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 жидкости в манометре.

4.3.2. 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 :

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

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

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

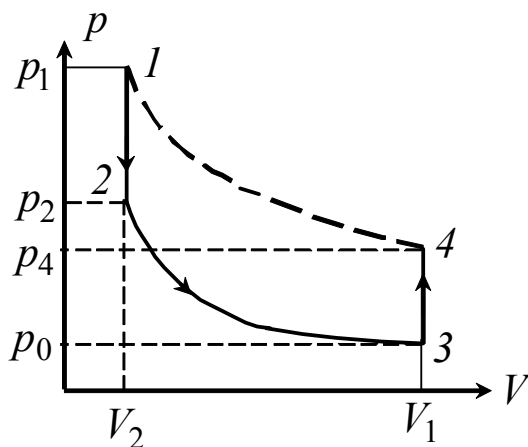


Рис. 2. Зависимость давления от объема для выделенной части воздуха в сосуде

4.3.4. 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).

4.3.5. 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 :

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

4.3.6. Рассчитать изменение энтропии $\Delta S_{3 \rightarrow 4}$ при изохорном нагревании ν молей воздуха:

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

4.3.7. Опыт повторить не менее 5 раз, следя за тем, чтобы перед началом опытов система каждый раз находилась в исходном состоянии 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? Трубкой 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 чем состоит метод Стокса для определения коэффициента внутреннего трения?
18. Как выводится формула Пуазейля, определяющая объем 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 теплоемкости 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 чем 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 четырех 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 : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 17-е изд., стереотип. – Москва : Академия, 2008. – 560 с.

2. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2007. – 720 с.

3. Савельев, И. В. Курс физики : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по техн. и технолог. направлениям и специальностям : в 3 т. Т. 1 : Механика. Молекулярная физика. – 4-е изд., стереотип. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 352 с.
http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=509

Составитель

Лавряшина Таисия Васильевна

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

Лабораторный практикум К-303.2
по дисциплине «Физика»
для технических специальностей и направлений

Рецензент В. В. Дырдин

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 06.10.2014. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 1,4.
Тираж 50 экз. Заказ

КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28
Издательский центр КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 а