

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

Кафедра физики и химии

Н. А. АХРАМЕНКО, Е. И. ДОЦЕНКО, И. И. ПРОНЕВИЧ

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Лабораторный практикум по курсу «Физика»

Гомель 2016

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра физики и химии

Н. А. АХРАМЕНКО, Е. И. ДОЦЕНКО, И. И. ПРОНЕВИЧ

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

*Одобрено методической комиссией строительного факультета
в качестве лабораторного практикума по курсу «Физика»*

Гомель 2016

УДК 53(076.5)

ББК 22.3

A95

Рецензент – д-р. физ.-мат. наук, профессор *П. А. Хило* (УО «ГТТУ им. П. О. Сухого»).

Ахраменко, Н. А.

A95 Молекулярная физика и термодинамика : лаб. практикум по курсу «Физика» / Н. А. Ахраменко, Е. И. Доценко, И. И. Проневич; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2016. – 58 с.

ISBN 978-985-554-450-1

Приведены описания лабораторных работ по разделу "Молекулярная физика и термодинамика" программы курса физики для инженерно-технических специальностей высших учебных заведений.

Предназначен для методического обеспечения лабораторных занятий по физике студентов инженерно-технических специальностей.

УДК 53(076.5)

ББК 22.3

ISBN 978-985-554-450-1

© Ахраменко Н. А., Доценко Е. И.,
Проневич И. И., 2016

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, предварительно ознакомившиеся с ее основным содержанием и порядком проведения по данному методическому пособию, изучившие основные теоретические предпосылки к каждой работе по рекомендуемой учебной, научной и технической литературе, а также успешно сдавшие предварительный зачет на допуск к работе (контрольный опрос преподавателем устно, с помощью карточек и т. п.).

В связи с наличием значительного количества лабораторных работ по всем разделам курса физики на кафедре принята следующая их нумерация: по разделу «Механика» – 1.1, 1.2 и т.д.; «Молекулярная физика и термодинамика» – 2.1, 2.2 и т.д.; «Электростатика и постоянный ток» – 3.1, 3.2 и т.д.; «Магнетизм» – 4.1, 4.2 и т.д.; «Колебания и волны» – 5.1, 5.2 и т.д.; «Волновая оптика» – 6.1, 6.2 и т.д.; «Квантовая оптика, атомная физика, физика твердого тела» – 7.1, 7.2 и т.д. Эта нумерация использована в данном лабораторном практикуме.

Подключать приборы и аппаратуру к источникам питания и проводить опыты только с разрешения преподавателя или лаборанта!

Чтобы устранить возможность искажения показаний приборов, не допускается произвольное хождение студентов по лаборатории, в ней должен соблюдаться порядок и поддерживаться тишина.

Все черновые записи, результаты измерений, а также предвари-

тельные вычисления необходимо вести в специальной тетради, которую после завершения работы в конце занятия предъявить преподавателю на подпись. Отчеты по выполненным работам нужно оформлять на бланках отчета по лабораторным работам чернилами четко, разборчиво, аккуратно.

Рисунки, схемы, графики (на миллиметровке) требуется выполнять с соблюдением всех правил технического черчения и государственных стандартов.

Зачеты по выполненным работам принимаются согласно расписанию занятий. К зачету студент обязан повторить основные теоретические сведения в объеме данной работы (используя основную и дополнительную литературу), содержание и порядок ее выполнения, а также подготовить ответы на контрольные вопросы

При выполнении лабораторных работ вся группа разбивается на подгруппы по 2–3 студента (согласно алфавитному списку), которые в течение всего семестра выполняют работы по графику.

Во время перерыва перед началом занятий дежурный студент отвечает за порядок в аудитории, а также после завершения занятий.

Отработка пропущенных по уважительной причине лабораторных работ проводится вне сетки расписания под контролем преподавателя.

Студент должен соблюдать меры общей, электрической и противопожарной безопасности, которые следует предварительно изучить (в часы самоподготовки перед первым лабораторным занятием) и расписаться в журнале по технике безопасности. Студент должен бережно относиться к лабораторному оборудованию и несет материальную ответственность за порчу лабораторного оборудования и приборов.

Лабораторная работа № 2.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ

Цель работы. Освоить метод определения универсальной газовой постоянной.

1 Краткие сведения из теории

В простейшей модели, используемой для описания свойств газообразного состояния веществ, молекулы газа рассматриваются как материальные точки, взаимодействующие только при столкновениях по законам упругого удара. Газ, свойства которого можно описать при помощи такой модели, называется **идеальным**. Потенциальное взаимодействие между молекулами любого газа становится пренебрежимо малым при большом разрежении, т. е. при малых плотностях газа. Всякий реальный газ при достаточном разрежении близок по своим свойствам к идеальному. Такие газы, как воздух, азот, кислород, даже в обычных условиях, т. е. при комнатной температуре и атмосферном давлении, мало отличаются от идеального газа. Особенно близки по свойствам к идеальному газу гелий и водород.

Опыт показывает, что всякая макроскопическая (состоящая из огромного числа молекул) изолированная система с течением времени переходит в состояние термодинамического равновесия и не может самопроизвольно выйти из этого состояния. Для описания состояния термодинамической системы вводятся физические величины, которые называются **термодинамическими параметрами** или параметрами состояния системы. Обычно состояние заданной массы газа определяется значением трех параметров: давления p , объема V и термодинамической температуры T . Эти параметры связаны друг с другом так, что изменение одного из них влечет за собой изменение других.

Соотношение, связывающее между собой параметры какой-либо системы, называется уравнением состояния этой системы.

Для данной массы идеального газа отношение произведения численных значений давления и объема к термодинамической температуре есть величина постоянная (**уравнение Клапейрона**):

$$\frac{pV}{T} = C = \text{const} . \quad (1)$$

Численное значение газовой постоянной C зависит от массы газа и его химического состава. Уравнение (1) есть уравнение состояния идеального газа.

Если в объеме V содержится масса газа m , т. е. $v = m/\mu$ молей, уравнение состояния идеального газа принимает форму, называемую **уравнением Менделеева – Клапейрона**:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (2)$$

где μ – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная, представляющая собой газовую постоянную, отнесенную к одному молю газа. Универсальность вытекает из закона Авогадро, согласно которому моли всех идеальных газов при одинаковых давлениях и температурах занимают одинаковые объемы. При нормальных условиях ($T = 273$ К, $p = 101$ кПа) моль любого газа занимает объем $V_{\mu} = 22,4$ л.

Элементарная работа, совершаемая идеальным газом в изобарном процессе ($p = \text{const}$),

$$\delta A = p dV = \frac{m}{\mu} R dT, \quad (3)$$

где использована связь между изменениями объема dV и температуры dT из уравнения Менделеева – Клапейрона при постоянном давлении.

Из уравнения (3) следует физический смысл универсальной газовой постоянной R . Она численно равна работе, совершаемой молем идеального газа при его изобарном нагревании на один градус:

$$R = \frac{\delta A}{\frac{m}{\mu} dT}. \quad (4)$$

Универсальная газовая постоянная является важной физической константой. Она входит в основное уравнение газового состояния (2) и уравнение Майера:

$$C_{p,\mu} - C_{V,\mu} = R, \quad (5)$$

где $C_{p,\mu}$ и $C_{V,\mu}$ – молярные теплоемкости газа при постоянном давлении и постоянном объеме.

Внутренняя энергия идеального газа определяется через величину универсальной газовой постоянной R :

$$U = i \frac{\nu RT}{2}, \quad (6)$$

где i – число степеней свободы молекулы газа; ν – число молей; T – термодинамическая температура.

2 Оборудование и приборы

Установка (рисунок 1) состоит из стеклянной колбы 1, которая с помощью тройника 2 и резиновых шлангов соединена с насосом 3 и манометром 4. Кран 5 соединяет колбу с атмосферой и насосом.

Пусть в сосуде содержится воздух при атмосферном давлении p_0 . Уравнение его состояния запишется в виде

$$p_0 V = \frac{m_0}{\mu} R T, \quad (7)$$

где V – объем сосуда; m_0 – масса воздуха в сосуде; μ – молярная масса воздуха; T – его термодинамическая температура.

После откачки из колбы некоторого количества воздуха и установления в ней прежней комнатной температуры уравнение состояния примет вид

$$pV = \frac{m}{\mu} R T, \quad (8)$$

где p и m – давление и масса воздуха в колбе после откачки.

Из (7) и (8) получим

$$R = \frac{\mu V}{T} \frac{\Delta p}{\Delta m}, \quad (9)$$

где $\Delta p = p_0 - p$ – уменьшение давления в колбе вследствие откачки воздуха; $\Delta m = m_0 - m$ – масса откачанного воздуха.

3 Порядок выполнения работы

1 Определить взвешиванием массу m_0 колбы (вместе с краном и чехлом) при атмосферном давлении p_0 воздуха в ней. Значение p_0 определить по барометру.

2 С помощью резинового шланга (см. рисунок 1) подсоединить колбу к манометру 4 и насосу 3. Открыть кран 5. Медленно откачать из колбы воздух до давления p , измеряемого манометром 4. Закрыть кран 5. Манометром измерить изменение давления $\Delta p = p_0 - p$.

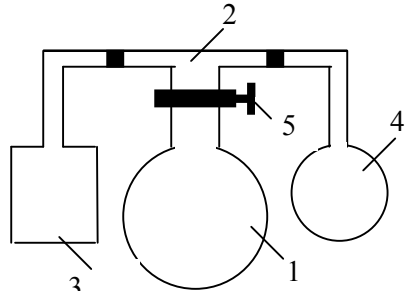


Рисунок 1

3 Отсоединить колбу вместе с краном и чехлом и взвешиванием определить ее массу m . Вычислить массу откачанного воздуха $\Delta m = m_0 - m$, соответствующую изменению давления Δp в колбе.

4 Провести пять различных измерений и вычислений согласно пп. 2 и 3 в интервале давлений $(0,1 \dots 0,9) \cdot 10^5$ Па.

5 По термометру определить температуру воздуха T в лаборатории. Учесть, что температура должна быть переведена в кельвины.

6 По формуле (9) вычислить пять значений универсальной газовой постоянной R для соответствующих значений Δp и Δm . (Объем воздуха в колбе $V = 1,26 \cdot 10^{-3}$ м³. Молярная масса воздуха $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль). Найти среднее арифметическое значение универсальной газовой постоянной $\langle R \rangle$.

7 Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

Таблица 1

Номер измерения	p_0	p	Δp	m_0	m	Δm	R	$\langle R \rangle$
	10 ⁵ Па			кг			Дж/(моль·К)	
1								
2								
3								
4								
5								

8 Определить среднюю квадратичную погрешность σ и полуширину доверительного интервала Δ при $P = 0,95$. Оценить относительную ошибку измерений ε . Окончательный результат представить в виде

$$R = (\langle R \rangle \pm \Delta R) \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \text{ при } P = 0,95. \varepsilon = \dots\%$$

Контрольные вопросы

- 1 Описать модель идеального газа.
- 2 Какими параметрами характеризуется идеальный газ?
- 3 Уравнение состояния идеального газа.
- 4 Понятие работы в термодинамике. Формула элементарной работы для изобарного процесса.
- 5 Физический смысл универсальной газовой постоянной.
- 6 Дать определение теплоемкости, удельной теплоемкости и молярной теплоем-

кости. Уравнение Майера.

7 Описать метод определения универсальной газовой постоянной в данной лабораторной работе.

8 Почему процесс откачки нужно проводить достаточно медленно?

9 Изопроцессы идеального газа.

Лабораторная работа № 2.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы. Ознакомиться с одним из методов определения коэффициента внутреннего трения жидкости. Вычислить значение коэффициента внутреннего трения минерального масла.

1 Краткие сведения из теории

Свойство жидкостей и газов оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой называется внутренним трением, или **вязкостью**. Между слоями, движущимися с разными скоростями, действуют касательные силы внутреннего трения. Слой, движущийся быстрее, увлекает за собой слой, движущийся медленнее, а тот, в свою очередь, тормозит первый. Опыт показывает, что сила внутреннего трения F , приложенная к слою площадью S , определяется по формуле

$$F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta l} S,$$

где η – коэффициент динамической вязкости, численно равный силе внутреннего трения, действующей на единицу площади поверхности слоя при градиенте скорости $\Delta v / \Delta l = 1$ м/(с·м); Δv – разность скоростей двух соседних слоев, расположенных на расстоянии Δl по нормали к ним.

Размерность коэффициента в СИ $[\eta] = \text{Па}\cdot\text{с}$.

Вязкость газов обусловлена переносом импульса из одних слоев в другие за счет теплового движения молекул. С ростом температуры газа вязкость растет. Вязкость жидкости главным образом определяется силами молекулярного взаимодействия и растет по мере понижения температуры.

В данной работе необходимо определить коэффициент вязкости касторового масла с помощью падения в нее тяжелого стального шарика.

При падении шарика в жидкость на него действуют три силы: направленная вниз сила тяжести P , выталкивающая сила F_A , величина которой определяется по закону Архимеда, и сила внутреннего трения F_C .

Если шарик падает в жидкость, простирающейся безгранично, то, как показал Стокс, сила внутреннего трения, действующая на него,

$$F_C = 6\pi\eta r v, \quad (1)$$

где r – радиус шарика; v – скорость его падения.

Сила тяжести и выталкивающая сила

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

где ρ – плотность материала шарика; ρ_0 – плотность жидкости.

Если опустить шарик в жидкость, то вначале под действием некомпенсированной силы тяжести он будет двигаться ускоренно. При этом будет возрастать сила F_C , и при некоторой скорости шарика она достигнет такой величины, что вместе с силой F_A уравновесит силу тяжести шарика, т. е.

$$P = F_C + F_A. \quad (3)$$

Начиная с этого момента, движение шарика становится равномерным. Если скорость установившегося движения обозначить через v_0 , то из выражений (1) – (3) получим

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

Отсюда
$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho - \rho_0}{v_0}.$$

Скорость v_0 может быть заменена отношением длины отрезка пути L , проходимого шариком при его равномерном движении, ко времени t

$$v_0 = \frac{L}{t}.$$

Тогда

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{(\rho - \rho_0)t}{L}. \quad (4)$$

Если учесть, что шарик движется не в безграничной среде, а в сосуде цилиндрической формы радиуса R , то формула (4) примет вид

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{(\rho - \rho_0)t}{L \left(1 + 2,4 \frac{r}{R}\right)}. \quad (5)$$

При $r \ll R$ можно пользоваться формулой (4). Необходимо отметить, что при движении шарика в жидкости вместе с ним движется тонкий слой жидкости, непосредственно соприкасающийся с поверхностью шарика. Поэтому шарик при движении испытывает сопротивление, обусловленное трением между слоями жидкости, а не между поверхностью шарика и соприкасающейся с ним жидкостью.

Таким образом, слой, соприкасающийся с поверхностью шарика, движется со скоростью шарика, а остальные слои – со все уменьшающимися по мере удаления от шарика скоростями.

2 Оборудование и приборы

Для проведения опыта применяется стеклянный цилиндрический сосуд, наполненный касторовым маслом (рисунок 1). К тыльной стороне сосуда прикреплена линейка с делениями. Для проведения опыта шарик опускается в сосуд, после чего он, падая, движется вдоль оси цилиндра.

Чтобы шарик на относительно большом расстоянии двигался равномерно, его масса и, следовательно, размеры должны быть невелики. Поэтому в работе применяют шарики малого диаметра.

Чтобы найти плотность исследуемой жидкости, нужно на лабораторных весах взвесить поочередно одинаковые стеклянные стаканчики, один из которых наполнен исследуемой жидкостью, а другой – пустой.

Масса пустых стаканчиков одинакова, поэтому разность масс Δm равна массе жидкости. По формуле для определения плотности

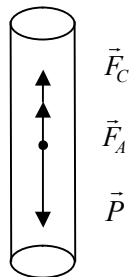


Рисунок 1

$$\rho = \frac{\Delta m}{V}, \quad (6)$$

где V – объем жидкости, найти плотность жидкости. При этом необходимо учесть, что величины, входящие в формулу (6) должны быть выражены в системе СИ.

3 Порядок выполнения работы

1 Определить плотность жидкости и шарика. Плотность материала шарика определяется из таблицы. Плотность жидкости рассчитывается по формуле (6). Измеренные и вычисленные значения занести в таблицу 1.

Таблица 1

$V, \text{ м}^3$	m_1	m_2	Δm	$\rho_0, \text{ кг/м}^3$
	кг			

2 Измерить штангенциркулем и определить среднее значение радиусов r и R (радиус маленького шарика и внутренний радиус сосуда).

3 Опустить шарик в жидкость. Определить время, в течение которого шарик проходит путь L , двигаясь равномерно. Чтобы движение шарика было равномерным, надо секундомер включить при нахождении шарика в жидкости на глубине не меньше 10 см от поверхности жидкости. Останавливать секундомер следует при нахождении шарика на расстоянии, примерно, равным 5 см от дна сосуда. L измеряется по линейке, время – по секундомеру. Провести аналогичные измерения 5 раз.

4 Вычислить значение коэффициента вязкости η по формуле (5), найти среднее арифметическое значение коэффициента вязкости $\langle \eta \rangle$ и внести их в таблицу 2.

Таблица 2

Номер измерения	r	R	L	$t, \text{ с}$	η	$\langle \eta \rangle$
	м				Па·с	
1						
2						

3				
4				
5				

5 Определить среднюю квадратичную погрешность σ , полуширину доверительного интервала $\Delta\eta$ при $P = 0,95$ и относительную погрешность. Результаты представить в следующем виде:

$$\eta = (\langle\eta\rangle \pm \Delta\eta) \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad \varepsilon = \dots \% \text{ при } P = 0,95.$$

Контрольные вопросы

- 1 Объяснить механизм внутреннего трения в газах и жидкостях.
- 2 Написать уравнение вязкости (опытный закон внутреннего трения).
- 3 Физический смысл коэффициента динамической вязкости.
- 4 Объяснить метод определения плотности жидкости.
- 5 В чем состоит сущность метода Стокса?
- 6 Вывести формулу (4).
- 7 Вывести размерность вязкости в СИ.
- 8 Сформулировать закон Архимеда.
- 9 Как определяется плотность жидкости?

Лабораторная работа № 2.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ И ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЛЕКУЛЯРНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА

Цель работы. Экспериментально определить динамическую вязкость воздуха, среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул воздуха.

1 Краткие сведения из теории

Внутреннее трение (вязкость) связано с возникновением сил трения между слоями жидкости или газа, перемещающимися параллельно друг другу с разными скоростями. Со стороны слоя, движущегося быстрее, на более медленно движущийся слой действует ускоряющая сила. Наоборот, медленно движущиеся слои тормозят более быстро движущиеся слои. Возникающие при этом силы трения направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев. С точки зрения молекулярно-кинетической теории причиной вязкости является нало-

жение упорядоченного движения слоев газа с различными скоростями на хаотическое тепловое движение молекул. Благодаря тепловому движению молекулы переходят из одного слоя в другой и переносят в этот слой свой импульс.

Основной закон вязкости – закон Ньютона. Он имеет вид

$$dp = -\eta \frac{du}{dx} S_n dt, \tag{1}$$

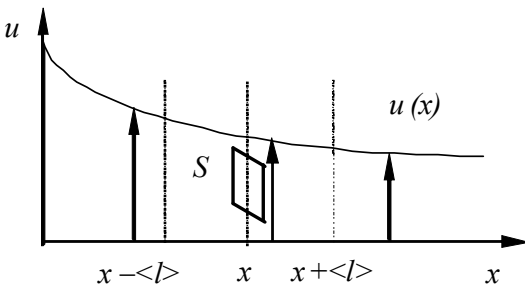
где dp – импульс, переносимый через площадку S за время dt ; du/dx – величина градиента скорости, показывающая, как быстро меняется скорость слоев вдоль оси x ; S_n – проекция площадки S на плоскость, перпендикулярную к направлению переноса импульса. Знак минус указывает, что импульс переносится от слоев, движущихся с большей скоростью, к слоям, движущимся с меньшей скоростью.

Модуль силы внутреннего трения между слоями

$$F = \frac{dp}{dt} = \eta \frac{du}{dx} S_n. \tag{2}$$

Выражения (1) и (2) являются различными формами записи основного закона внутреннего трения. В них η – коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость) жидкости или газа. Физический смысл вязкости можно определить с помощью любого из этих соотношений. Например, из (2) следует, что вязкость η определяется силой внутреннего трения, действующей на единицу площади поверхности слоя при градиенте скорости, равном единице. Кроме динамической вязкости часто используется понятие кинематической вязкости $\nu = \eta/\rho$, где ρ – плотность газа.

Найдем, чем определяется и от чего зависит динамическая вяз-



кость газов. Рассмотрим слои газа, движущиеся в направлении x и находящиеся на расстоянии $\langle l \rangle$ слева и справа от площадки S (рисунок 1).

Скорости этих сло-

Рисунок 1

ев равны $u(x - \langle l \rangle)$ и $u(x + \langle l \rangle)$, где x – координата площадки S . Вследствие хаотичности теплового движения молекул в одном направлении через единичную площадку в единицу времени проходит $n \langle v \rangle / 6$ молекул массой m . Поэтому за промежуток времени dt в направлении x через площадку S слева направо переносится импульс

$$dp_1 = \frac{1}{6} n \langle v \rangle m u(x - \langle l \rangle) S dt,$$

а справа налево –

$$dp_2 = \frac{1}{6} n \langle v \rangle m u(x + \langle l \rangle) S dt.$$

Суммарный импульс, переносимый через площадку S за время dt ,

$$dp = dp_1 - dp_2 = \frac{1}{6} n \langle v \rangle m [u(x - \langle l \rangle) - u(x + \langle l \rangle)] S dt.$$

Так как $\langle l \rangle$ мало, то скорость каждого слоя можно разложить в ряд Тейлора и ограничиться двумя первыми членами разложения:

$$u(x \pm \langle l \rangle) = u(x) \pm \frac{du}{dx} \langle l \rangle.$$

Тогда

$$dp = -\frac{1}{3} n \langle v \rangle m \langle l \rangle \frac{du}{dx} S dt. \quad (3)$$

Сравнивая (1) и (3), найдем вязкость газа

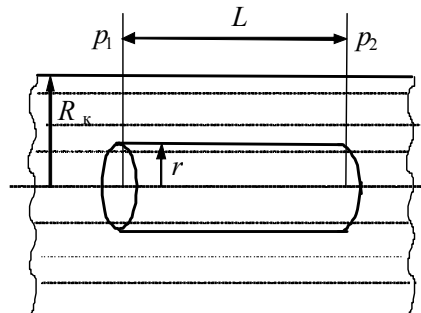
$$\eta = \frac{1}{3} m n \langle v \rangle \langle l \rangle = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle, \quad (4)$$

где $\rho = mn$ – плотность газа. Величина вязкости η зависит только от температуры T . От давления она не зависит, так как $\rho \sim n \sim p$, а $\langle l \rangle \sim n^{-1} \sim p^{-1}$. Если принять $d \approx \text{const}$, то $\eta \sim \langle v \rangle \sim \sqrt{T}$.

Вязкость жидкости или газа может быть определена методом Пуазейля по объему жидкости или газа, протекающего через капиллярную трубку.

Данный метод применим к случаю ламинарного течения жидкости (газа), т.е. когда слои жидкости не перемешиваются и движутся параллельно друг другу.

Рассмотрим стационарный по-



ток газа, ламинарно текущего через капилляр круглого сечения (рисунок 2). Радиус капилляра равен R_k .

Мысленно выделим в объеме газа цилиндр радиуса r , длины L и обозначим давление на его торцах через p_1 и p_2 . В стационарных условиях сила давления на цилиндр $(p_1 - p_2)\pi r^2$ уравнивается силой трения, действующей на боковую поверхность цилиндра $S = 2\pi rL$.

Сумма сил, действующих на цилиндр, должна быть равной нулю:

$$(p_1 - p_2)\pi r^2 - 2\pi rL\eta \frac{dv}{dr} = 0.$$

Заметим, что скорость газа обращается в нуль на стенках капилляра, так как молекулы "прилипают" к стенкам. Учитывая это, интегрируем равенство по радиусу поперечного сечения от $r = 0$ до $r = R_k$. Находим, что скорость газа меняется квадратично с радиусом и максимальна на оси трубки ($r = 0$):

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} (R_k^2 - r^2).$$

Объем газа, протекающий через поперечное сечение капилляра за время $\Delta\tau$,

$$V_0 = \Delta\tau \int_0^{R_k} v 2\pi r dr = \frac{\pi R_k^4 (p_1 - p_2) \Delta\tau}{8\eta L}. \quad (5)$$

Формула (5) носит название **формулы Пуазейля**. Она показывает, что вязкость газа можно определить, измеряя его расход V_0 , перепад давления $(p_1 - p_2)$, длину капилляра L и его радиус R_k . Из формулы (5) выразим вязкость:

$$\eta = \frac{\pi R_k^4 (p_1 - p_2) \Delta\tau}{8V_0 L}. \quad (6)$$

Для определения средней длины свободного пробега воспользуемся соотношением (4), предварительно выразив плотность газа ρ из уравнения Менделеева – Клапейрона и рассчитав среднюю арифметическую скорость молекул газа $\langle v \rangle$,

$$\rho = \frac{p_0 \mu}{RT}; \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}. \quad (7)$$

В итоге имеем

$$\langle l \rangle = \frac{3\eta RT}{p_0 \mu \langle v \rangle}, \quad (8)$$

где $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; T – термодинамическая температура воздуха; p_0 – атмосферное давление; $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса воздуха.

Эффективный диаметр молекул определяется из соотношения:

$$d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi p_0 \langle l \rangle}}. \quad (9)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; n – концентрация молекул газа; T – термодинамическая температура. Здесь учтено, что $p_0 = nkT$, p_0 – давление воздуха по барометру.

2 Оборудование и приборы

Сосуд Мариотта, капилляр, мензурка, секундомер, термометр, барометр.

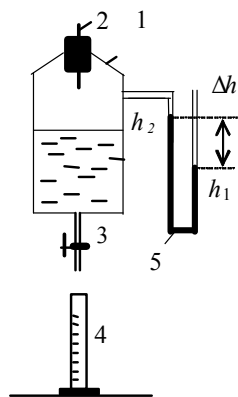
На рисунке 3 приведена схема установки. В ее состав входит сосуд Мариотта 1 с водой. В пробку сосуда вставлен капилляр 2. Вода может через кран 3 выливаться в мензурку или мерный стакан 4. При открытом кране 3 вода вытекает из сосуда 1, а воздух поступает в сосуд через капилляр 2.

Возникающую на концах капилляра разность давлений измеряют с помощью жидкостного манометра 5, выведенного на лицевую панель установки. Разность давлений на концах капилляра равна

$$p_1 - p_2 = \rho g(h_2 - h_1) = \rho g \Delta h, \quad (10)$$

где $\rho = 10^3$ кг/м³ – плотность воды; $g = 9,8$ м/с² – ускорение силы тяжести.

При равномерном вытекании жидкости можно считать, что разность давлений



воздуха вне сосуда и внутри его, а следовательно, и разность давлений на концах капилляра остается постоянной.

Объем вытекшей воды, величину которого определяют с помощью мензурки или мерного стакана 4, равен объему вошедшего в сосуд воздуха. Время протекания этого объема воздуха через капилляр измеряется секундомером. Так как перепад давлений на концах капилляра существенно меньше атмосферного давления, то плотность воздуха в сосуде и вне его можно приблизительно считать одинаковой и произвести вычисления η по формуле (6), из которой вязкость воздуха

$$\eta = B \frac{h \Delta \tau}{V_0}. \quad (11)$$

Здесь B – постоянная прибора, рассчитываемая до опытов,

$$B = \frac{\pi \rho g R_k^4}{8L}. \quad (12)$$

Параметры капилляра проведены на установке.

3 Порядок выполнения работы

1 Выписать данные установки. По барометру определить давление воздуха в лаборатории p_0 , по термометру – его температуру. По формуле (12) рассчитать постоянную прибора B .

2 Наполнить сосуд 1 водой и плотно закрыть его пробкой с капилляром 2.

3 Подставив стакан под кран 3, установить режим вытекания жидкости (каплями). Заменить стакан на мерный сосуд 4 и измерить время $\Delta \tau$ вытекания 20–30 см³ жидкости. Измерить разность уровней воды Δh в жидкостном манометре 5. Закрыть кран 3. Объем воздуха, вошедшего в сосуд через капилляр, в нашем приближении равен объему вытекшей из него жидкости и определяется с помощью мензурки.

4 Прodelать опыт не менее 5 раз с разными расходами воды.

5 Для каждого из опытов по формуле (11) вычислить η . Найти среднее значение вязкости $\langle \eta \rangle$, абсолютные ошибки каждого измерения, среднюю квадратичную ошибку σ . Результаты измерений и рассчитанные величины занести в таблицу 1. Рассчитать и записать по-

луширину доверительного интервала при доверительной вероятности $P = 0,95$. Определить относительную ошибку измерений ϵ .

6 С помощью формул (7)–(9) вычислить среднюю арифметическую скорость теплового движения, среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул воздуха. Сравнить полученные значения вязкости и характеристик молекулярного движения со справочными данными.

Таблица 1

Номер измерения	B	$\Delta\tau$	Δh	V	η	$\langle\eta\rangle$	$\Delta\eta$	$\langle v \rangle$	d	$\langle l \rangle$
	кг·м/с ²	с	м	м ³	Па·с			м/с	м	
1										
2										
3										
4										
5										

Контрольные вопросы

1 Каков механизм внутреннего трения в жидкостях и газах? Закон внутреннего трения. Коэффициент вязкости, его физический смысл. От чего зависит вязкость газов? Зависит ли она от температуры?

2 С помощью молекулярно-кинетической теории вывести формулу (6).

3 Что такое средняя длина свободного пробега молекул газа и от чего она зависит? В каких единицах она измеряется?

4 Кратко пояснить методику определения динамической вязкости и средней длины свободного пробега молекул воздуха в данной работе.

5 Дать вывод формулы для определения вязкости в работе.

6 Эффективный диаметр молекул. От чего он зависит?

Лабораторная работа № 2.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ВОЗДУХА

И СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ

Цель работы. Экспериментально определить динамическую вязкость воздуха и среднюю длину свободного пробега молекул воздуха.

1 Краткие сведения из теории

Конечные размеры молекул и их огромная концентрация даже в обычных условиях приводят к тому, что молекулы вследствие теплового движения непрерывно сталкиваются друг с другом. Между двумя последовательными столкновениями молекулы движутся равномерно и прямолинейно. Расстояние, которое молекула преодолевает за время пробега от одного столкновения до следующего, называется **длиной свободного пробега**. Так как эти расстояния могут быть самыми различными, то в молекулярно-кинетической теории вводится понятие средней длины свободного пробега $\langle l \rangle$, являющейся характеристикой всей совокупности молекул газа при заданных значениях давления и температуры.

Чтобы подсчитать среднюю частоту $\langle z \rangle$ столкновений одной молекулы с другими, представим, что все молекулы, кроме одной рассматриваемой, неподвижны. За промежуток времени Δt молекула, движущаяся со средней арифметической скоростью $\langle v \rangle$, пройдет путь, равный $\langle v \rangle \Delta t$, и столкнется со всеми молекулами, центры которых лежат внутри ломаного цилиндра радиуса d (рисунок 1). Число столкновений за 1 с равно числу молекул, центры которых находятся внутри цилиндра высотой $\langle v \rangle$ и радиусом основания d . Если концентрация молекул n , то мысленно выпрямив цилиндр, найдем

$$\langle z \rangle = \pi d^2 n \langle v \rangle.$$

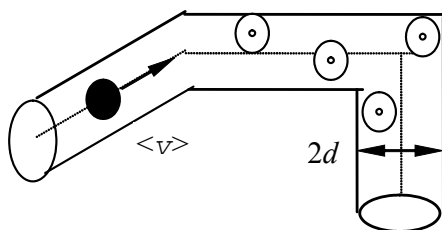


Рисунок 1

В действительности движутся все молекулы и возможность соударения двух молекул зависит от их относительной скорости.

Для однокомпонентных газов с помощью распределения Максвелла можно показать, что

$$\langle v \rangle_{\text{отн}} = \sqrt{2} \langle v \rangle.$$

Тогда соотношение для среднего числа столкновений молекулы примет вид

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle, \quad (1)$$

а выражение для средней длины свободного пробега молекул

$$\langle l \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}. \quad (2)$$

Средняя длина свободного пробега молекул обратно пропорциональна их концентрации n и при постоянном объеме (изохорный процесс) не зависит от температуры. Однако опыт показывает, что с ростом температуры величина $\langle l \rangle$ несколько возрастает. Это обусловлено тем, что реальные молекулы не являются шарами определенного диаметра. Они представляют собой сложные системы заряженных частиц. Между молекулами действуют силы притяжения и отталкивания, сложным образом зависящие от расстояния между ними. Следовательно, необходимо говорить об усредненной характеристике взаимодействия, которую и представляет собой **эффективный диаметр молекул**, определяемый как наименьшее расстояние между центрами сталкивающихся молекул. Чем больше относительная скорость молекул, тем меньше это расстояние. При повышении температуры увеличивается средняя скорость движения молекул и, следовательно, уменьшается их эффективный диаметр.

Вязкость жидкости или газа может быть определена методом Пуазейля по объему жидкости или газа, протекающего через капиллярную трубку (см. лабораторную работу № 2.3)

Объем газа, протекающий через поперечное сечение капилляра за время $\Delta\tau$,

$$V_0 = \frac{\pi R_k^4 (p_1 - p_2) \Delta\tau}{8\eta L}. \quad (3)$$

Формула (3) носит название **формулы Пуазейля**. Она показывает, что вязкость газа можно определить, измеряя его расход V_0 , перепад давления $(p_1 - p_2)$, длину капилляра L и его радиус R_k . Из формулы (3) выразим вязкость:

$$\eta = \frac{\pi R_k^4 (p_1 - p_2) \Delta\tau}{8V_0 L}. \quad (4)$$

Для определения средней длины свободного пробега воспользуемся соотношением (см. лабораторную работу № 2.3)

$$\langle l \rangle = \frac{3\eta RT}{p_0 \mu \langle v \rangle}, \quad (5)$$

где $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; T – термодинамическая температура воздуха; p_0 – атмосферное давление; $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса воздуха.

2 Оборудование и приборы

Измерительный стенд, капилляр, секундомер, термометр, барометр.

На рисунке 2 приведена схема установки. В установке капилляр 3 соединяется одним концом с мерной емкостью 4, а другим – с атмосферой. Мерная емкость 4 соединяется резиновой трубкой с вспомогательным сосудом 5 с водой.

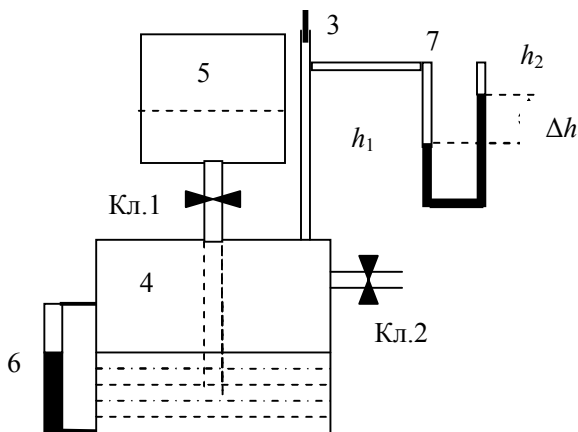


Рисунок 2

Для заполнения емкости 4 воздухом включают на стенде компрес-

сор и нажимают напускной клапан Кл. 2. При этом вода из емкости 4 вытесняется в сосуд 5, за ее вытеснением можно следить по мерной трубке 6, выведенной на лицевую панель стенда. При достижении уровня воды необходимой отметки клапан Кл. 2 отключают.

Затем нажимают клапан Кл. 1. При этом вода перетекает из сосуда 5 в мерную емкость 4, вытесняя из последней воздух через капилляр 3. Возникающую на концах капилляра разность давлений измеряют с помощью жидкостного манометра 7, выведенного на лицевую панель. Разность давлений на концах капилляра

$$p_1 - p_2 = \rho g(h_1 - h_2), \quad (6)$$

где $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Объем вытесненного воздуха равен объему перетекшей воды. Величину последнего определяют по изменению уровня воды в емкости с помощью мерной трубки 6. Время протекания этого объема воздуха через капилляр измеряется секундомером. В работе применяется установка с параметрами:

- длина капилляра – $L = 59 \text{ мм}$;
- радиус капилляра – $R_k = 0,15 \text{ мм}$;
- объем в мерной емкости между двумя соседними метками мерной трубки, различающимися на $\Delta x = 20 \text{ мм}$, – $V_0 = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

3 Порядок выполнения работы

1 Выписать данные установки. По барометру в лаборатории определить давление воздуха, по термометру – его температуру.

2 Включить на стенде компрессор и нажать напускной клапан Кл.2 на лицевой панели модуля. Следить за вытеснением воды из мерной емкости 4 по мерной трубке 6. При достижении уровня воды немного ниже нижней отметки отпустить клапан и выключить компрессор.

3 Нажать клапан и в момент прохождения уровнем нижней отметки включить секундомер.

4 Через равные разности уровней на мерной трубке (например, $\Delta x = 20 \text{ мм}$ соответствует уровням: 170, 150, 130, 110, ..., 10) произвести отсчеты времени в моменты прохождения соответствующих меток

на мерной трубке. После прохождения последней отметки отпустить клапан Кл.1.

5 Повторить п. 2,3. Нажать клапан Кл.1 и измерить разность уровней воды ($h_1 - h_2$) в жидкостном манометре в соответствующие моменты времени (т. е. в моменты прохождения уровнем воды в мерной трубке 6 отметок 170, 150, 130, ..., 10). После прохождения последней отметки отпустить клапан Кл.1.

6 Произвести вычисления ($p_1 - p_2$), η , $\langle l \rangle$ по формулам (6), (4), (5). Промежуток времени Δt находится как разность соседних значений τ .

7 Найти средние значения вязкости $\langle \eta \rangle$ и средней длины свободного пробега $\langle l \rangle_{\text{ср}}$, абсолютные ошибки каждого измерения. Измеренные и рассчитанные величины занести в таблицу 1.

8 Рассчитать средние квадратичные ошибки σ и полуширину доверительных интервалов при доверительной вероятности, равной $P = 0,95$, а также относительные ошибки измерений вязкости и средней длины свободного пробега. Записать доверительный интервал для измеренных вязкости и средней длины свободного пробега, а также значения относительных ошибок измерений.

Таблица 1

Номер измерения	τ	$\Delta\tau$	$h_1 - h_2$	$p_1 - p_2$	η	$\langle \eta \rangle$	$\Delta\eta$	$\langle l \rangle$	$\langle l \rangle_{\text{ср}}$	$\Delta \langle l \rangle$
	с	м	Па	Па·с			м			
1										
2										
3										
4										
5										

Контрольные вопросы

1 Каков механизм внутреннего трения в жидкостях и газах? Закон внутреннего трения.

2 Коэффициент вязкости. Пояснить его физический смысл. От чего зависит вязкость газов?

3 С помощью молекулярно-кинетической теории вывести формулу (6).

4 Что такое средняя длина свободного пробега молекул газа и от чего она зависит? В каких единицах она измеряется?

5 Кратко пояснить методику определения динамической вязкости и средней длины свободного пробега молекул воздуха в данной работе.

6 Дать вывод формулы для определения вязкости в данной работе.

Лабораторная работа № 2.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЁМКОСТЕЙ ГАЗА C_p/C_v

Цель работы. Произвести опытную проверку теоретического значения γ для двухатомного газа (воздуха).

1 Краткие сведения из теории

Состояние некоторой массы газа характеризуется тремя параметрами: объёмом V , давлением p и температурой T . Уравнение, связывающее эти величины, называется **уравнением состояния газа**. Уравнением состояния идеального газа является уравнение Менделеева – Клапейрона, которое для одного моля газа имеет вид

$$pV_\mu = RT, \quad (1)$$

где V_μ – объём одного моля газа.

Для любой массы газа

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (2)$$

где $\nu = \frac{m}{\mu}$ – число молей газа; $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ – универсальная

газовая постоянная; μ – молярная масса, т. е. масса одного моля данного вещества; m – масса газа.

Известно, что величина теплоемкости зависит от вида процесса, протекавшего в газе. Установим эту зависимость, воспользовавшись уравнением состояния (2) и первым началом термодинамики.

Согласно первому началу термодинамики, количество теплоты δQ , переданное системе, расходуется на увеличение её внутренней энергии dU и на работу δA , совершаемую против внешних сил, т. е.

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (3)$$

где $dU = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT$; i – число степеней свободы молекулы идеального

газа; $\delta A = pdV$; dV – изменение объёма данной массы газа.

По определению теплоёмкость тела численно равна количеству теплоты, необходимой для его нагревания на один градус:

$$C = \frac{\delta Q}{dT} = \frac{dU}{dT} + \frac{\delta A}{dT}. \quad (4)$$

Количество теплоты, необходимое для нагревания на один градус одного моля вещества, называется молярной теплоемкостью –

$$C_\mu = \frac{C}{\nu} = \frac{\mu}{m} C.$$

Как видно из выражения (4), газ, нагреваясь при постоянном объёме ($V = \text{const}$, $dA = 0$), не совершает работу, и все полученное им количество теплоты идет только на увеличение его внутренней энергии. Температура газа при этом увеличивается. Такой процесс называют **изохорным**. Тогда имеем

$$C_V = \frac{\delta Q}{dT} = \frac{dU}{dT} = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R. \quad (5)$$

В этом случае теплоёмкость называется теплоёмкостью газа при постоянном объёме. Молярная теплоемкость при постоянном объёме

$$C_{V,\mu} = \frac{i}{2} R. \quad (6)$$

Процесс, который протекает при постоянном давлении газа ($p = \text{const}$), называется **изобарным**.

Для этого случая выражение (4) преобразуется к виду

$$C_p = \frac{dU}{dT} + \frac{\delta A}{dT} = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R + p \frac{dV}{dT}, \quad (7)$$

где C_p – теплоёмкость газа при постоянном давлении.

Из уравнения состояния газа (2) получаем при $dp = 0$:

$$p dV = \frac{m}{\mu} R dT, \quad p \frac{dV}{dT} = \frac{m}{\mu} R. \quad (8)$$

Подставляя значения (8) в уравнение (7), находим:

$$C_p = \frac{m}{\mu} \left(\frac{i}{2} R + R \right) = \frac{m}{\mu} \left(\frac{i+2}{2} \right) R, \quad C_{p,\mu} = \frac{i+2}{2} R. \quad (9)$$

Из уравнений (6) и (9) следует, что молярная теплоёмкость $C_{p,\mu}$ больше молярной теплоёмкости $C_{V,\mu}$ на величину универсальной газовой постоянной R . Из выражения (8) можно установить физический смысл универсальной газовой постоянной: она численно равна работе изобарного расширения моля идеального газа при повышении его температуры на один градус.

Разделив уравнение (9) на выражение (6), найдём для каждого газа отношение C_p к C_V :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{C_{p,\mu}}{C_{V,\mu}} = \frac{i+2}{i}. \quad (10)$$

Это отношение называется **показателем адиабаты или коэффициентом Пуассона**. Как следует из уравнения (10), величина γ для идеального газа определяется только числом степеней свободы молекулы. Одноатомная молекула обладает тремя поступательными степенями свободы. Для всех одноатомных газов $i = 3$; $\gamma = 5/3 = 1,67$. Двухатомная молекула, кроме поступательного движения, может совершать вращательное движение вокруг двух осей. Для двухатомных газов $i = 5$, $\gamma = 1,4$, для трехатомных – $i = 6$, $\gamma = 1,33$.

Метод определения γ основан на закономерностях адиабатного расширения и сжатия газа. **Адиабатным** процессом называется процесс, протекающий без теплообмена ($\delta Q = 0$) с окружающей средой.

Первое начало термодинамики в применении к этому процессу будет иметь вид

$$dU + \delta A = 0; \quad (11)$$

$$\delta A = -dU = -\frac{m}{\mu} C_{V,\mu} dT.$$

Таким образом, при адиабатном процессе расширения или сжатия работа совершается газом только за счет изменения запаса внутренней энергии. Если $\delta A > 0$, то газ охлаждается, если $\delta A < 0$, – нагревается.

Уравнение адиабатного процесса (**уравнение Пуассона**) для массы газа m

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (12)$$

где γ – показатель адиабаты (коэффициент Пуассона).

2 Оборудование и приборы

Измерительная установка. Состоит из теплоизолированного (стеклянного) баллона Б большого объема, нагнетательного насоса Н, открытого жидкостного манометра М, кранов K_1 и K_2 (рисунок 1).

3 Порядок выполнения работы

Применяемый метод определения γ для двухатомного газа (воздуха) основан на том, что в заключенном в сосуд газе происходит последовательно адиабатный и изохорный процессы. В начальный момент времени состояние газа характеризуется следующими параметрами: некоторым объемом $V_0 + \Delta V_1$ (V_0 – объем баллона); давлением, равным атмосферному p_0 ; температурой T_0 , равной комнатной.

На графике зависимости давления от объема это состояние показано точкой 1 (рисунок 2).

В баллон при закрытом кране K_1 и открытом K_2 нагнетают воздух, быстро опуская поршень насоса Н (адиабатный процесс). Состояние воздуха характеризуется пара-

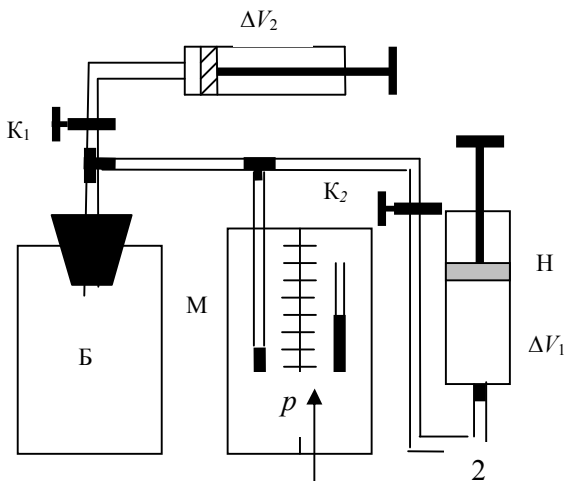


Рисунок 1

метрами $p_2 > p_0$; $T_2 > T_0$.

На графике $p = f(V)$ это состояние показано точкой 2.

Закрыв кран K_2 ,

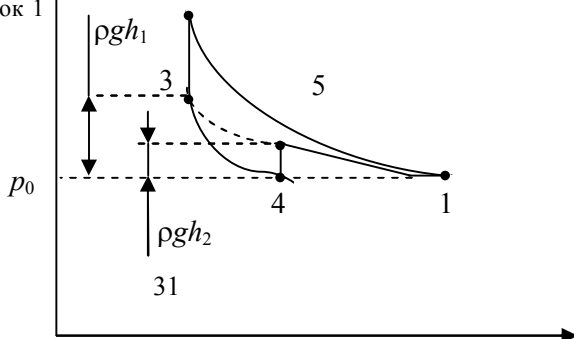


Рисунок 2

V

выжидаем 2–3 мин., пока температура воздуха в баллоне не станет равной температуре окружающей среды. В этом состоянии давление воздуха в баллоне p_3 выше атмосферного p_0 . Это превышение измеряется с помощью жидкостного манометра по величине избыточной высоты столба h_1 манометрической жидкости. На графике это состояние с параметрами $p_3 = p_0 + \rho gh_1$; $V_3 = V_2 = V_0$; $T_3 = T_0$ показано точкой 3.

После этого открывают кран K_1 , и воздух увеличивает свой объем на ΔV_2 . Будем считать, что легкий (в идеальном случае невесомый) поршень при этом равномерно без скольжения движется вправо до тех пор, пока давление воздуха не станет равным атмосферному. При этом газ испытывает близкое к адиабатному расширение. Состояние газа в этом случае характеризуется параметрами $p_4 = p_0$; $V_4 = V_0 + \Delta V_2$; $T_4 < T_0$. На графике это состояние газа показано точкой 4.

Согласно уравнению Пуассона

$$p_3 V_3^\gamma = p_4 V_4^\gamma. \quad (13)$$

Вследствие адиабатного расширения воздуха температура его понизится.

Затем в результате теплообмена через промежуток времени 2–3 мин станет равной комнатной T_1 . При этом давление газа повысится до величины $p_5 = p_0 + \rho gh_2$.

Пятое конечное состояние газа (точка 5 на рисунке 2) будет характеризоваться параметрами p_5 ; V_5 ; $T_5 = T_1$.

При изотермическом процессе

$$p_3 V_2 = p_5 V_4. \quad (14)$$

Решая уравнения (13) и (14) относительно γ , получаем

$$\gamma = \frac{\lg p_3 - \lg p_4}{\lg p_3 - \lg p_5}. \quad (15)$$

Разложим $\lg p_3$ и $\lg p_5$ в ряд Тейлора и ограничимся для данного случая двумя первыми членами, учитывая, что избыточное давление существенно меньше атмосферного:

$$\lg p_3 = \lg(p_0 + \rho g h_1) = \lg p_0 + \frac{\rho g h_1}{p_0} + \dots; \quad (16)$$

$$\lg p_5 = \lg(p_0 + \rho g h_2) = \lg p_0 + \frac{\rho g h_2}{p_0} + \dots$$

Подставляя эти значения в формулу (15) и имея в виду, что $\lg p_4 = \lg p_0$, получаем

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (17)$$

Работу выполнять в следующем порядке:

1 Открыть кран K_2 и, закрыв кран K_1 , нагнетать насосом воздух в баллон до разности уровней в манометре 200–300 мм.

2 Закрывать кран K_2 и выждать 2–3 мин, пока температура в баллоне станет равной комнатной. При этом уровни жидкости в манометре перестанут изменяться. Измерить высоту избыточного уровня жидкости h_1 , мм, в манометре.

3 Открыть кран K_1 и в тот момент, когда уровни жидкости в обоих коленах манометра сравняются, быстро закрыть кран K_1 . Выждав 2–3 мин, пока газ нагреется до комнатной температуры, измерить высоту избыточного уровня h_2 . Значения h_1 и h_2 отсчитывать как разность высот жидкости в обоих коленах U-образного манометра.

4 Опыт повторить не менее пяти раз и по формуле (17) вычислить значение γ , а затем – среднее значение $\langle \gamma \rangle$.

5 Данные занести в таблицу 1.

Таблица 1

Номер измерения	h_1	h_2	γ	$\langle \gamma \rangle$	$\Delta \gamma$
	мм				
1					
2					
3					
4					

Предупреждение! Следить, чтобы воздух в баллон нагнетался аккуратно с целью исключения попадания влаги в баллон из манометра, вследствие чего могут быть получены ошибочные значения γ .

6 Найти абсолютные погрешности отдельных измерений, среднюю квадратичную ошибку, доверительный интервал для вероятности 0,95. Оценить относительную ошибку измерений.

7 Результаты измерений представить в следующем виде:

$$\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta\gamma, \quad \varepsilon = \dots\% \text{ при } P = 0,95.$$

Контрольные вопросы

1 Сформулировать первое начало термодинамики и указать физический смысл величин δQ , dU , δA .

2 Что называется теплоемкостью тела? Что представляет собой молярная теплоемкость вещества? Почему теплоемкость газа зависит от условий процессов?

3 Что такое C_p и C_V ? Почему C_p больше, чем C_V ? Доказать, что $C_{p,m} = C_{V,m} + R$.

4 Какой процесс называется адиабатным? Что происходит с внутренней энергией газа при адиабатном процессе?

5 Изложить сущность метода проведения опыта и вывести формулу (17).

Лабораторная работа № 2.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА

Цель работы. Опытным путем определить показатель адиабаты для воздуха.

1 Краткие сведения из теории

Адиабатным процессом называется процесс, протекающий без теплообмена ($\delta Q = 0$) с окружающей средой. К адиабатным можно отнести все быстропотекающие процессы. Практически адиабатный процесс осуществляется при достаточно быстром расширении или

сжатия газа. Его широко применяют в циклах двигателей внутреннего сгорания, холодильных установках.

Так как γ является показателем адиабаты в адиабатном процессе, то в методике определения γ используются закономерности адиабатного расширения и сжатия газа.

Уравнение адиабатного процесса (**уравнение Пуассона**) для неизменной массы газа имеет вид

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{C_{p,\mu}}{C_{V,\mu}} = \frac{i+2}{i}$, i – число степеней свободы молекул газа.

Изучить также теорию лабораторной работы № 2.5.

2 Оборудование и приборы

Экспериментальная установка состоит из модуля А с металлическим баллоном, наполненным воздухом (рисунок 1).

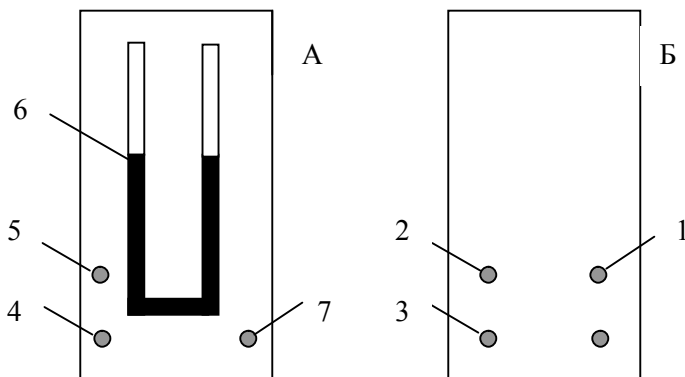


Рисунок 1

Баллон соединен с манометром 6 и компрессором, находящимся в модуле Б. Сначала, включив тумблер 2, с помощью компрессора в баллон накачивают воздух, затем закрывают напускной кран 5. Спустя несколько минут температура в баллоне становится равной температуре в лаборатории. Обозначим эту температуру T_1 . Давление воз-

духа в баллоне

$$p_1 = p_0 + p', \quad (2)$$

где p_0 – атмосферное давление, p' – избыточное давление воздуха, которое можно определить по показаниям манометра.

Выберем мысленно в баллоне объем V вдали от клапана. Начальное состояние воздуха в объеме характеризуется параметрами p_1 , T_1 , V_1 . Если открыть на короткое время выпускной клапан 7, часть воздуха выйдет из баллона, давление станет равным $p_2 = p_0$, выбранный нами объем увеличится до значения V_2 . Температура воздуха понизится, так как при вытекании из баллона воздух совершает работу против силы атмосферного давления ($T_2 < T_1$).

В момент времени, когда закрывают выпускной клапан 7, состояние выбранного объема характеризуется параметрами p_2 , T_2 , V_2 . Считая переход из состояния 1 в состояние 2 адиабатным процессом, получим

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma. \quad (3)$$

После того как выпускной клапан закрыли, происходит изохорный процесс; температура воздуха в баллоне приближается к температуре воздуха в лаборатории T_1 , давление воздуха по окончании этого процесса

$$p_3 = p_0 + p'', \quad (4)$$

где p'' – измеряется с помощью манометра.

Параметры воздуха по окончании изохорного процесса: p_3 , T_1 , V_3 . Причем $V_3 = V_2$. Так как температуры воздуха в первом и третьем состояниях одинаковы, а число молекул в выбранном нами объеме постоянно (объем V выбран вдали от клапана), то для состояния 1 и 3 можно применить закон Бойля – Мариотта

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = p_3 V_3. \quad (5)$$

Решая систему уравнений (3) и (5), получим

$$(p_3/p_1)^\gamma = p_2/p_1. \quad (6)$$

Прологарифмировав это соотношение, найдем

$$\gamma = \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) / \ln\left(\frac{p_1}{p_3}\right). \quad (7)$$

Используя соотношения (1) и (3), получим

$$\gamma = \ln\left(1 + \frac{p'}{p_0}\right) / \ln\left(\frac{p_0 + p'}{p_0 + p''}\right). \quad (8)$$

Так как избыточные давления p' и p'' весьма малы по сравнению с атмосферным p_0 , то можно использовать разложения функции типа $\ln(1+x)$ в ряд. При $x \ll 1$ и $\ln(1+x) \approx x$. Тогда

$$\gamma = \frac{p'}{p' - p''} = \frac{H}{H - h}, \quad (9)$$

где H и h – разности уровней жидкости в манометре в первом и третьем состояниях (т. к. $p' = \rho g H$ и $p'' = \rho g h$).

Отметим, что значение h соответствует условию, когда выпускной клапан закрыли точно в момент окончания адиабатного процесса. Если закрыть клапан до выравнивания давлений или спустя некоторое время после окончания адиабатного процесса, то результат вычислений по формуле (9) дает в первом случае завышенное, а во втором – заниженное значение γ . Для получения наиболее точного экспериментального значения γ необходимо закрыть клапан точно в момент окончания адиабатного процесса, т. е. в момент выравнивания уровней при выпуске воздуха из металлического баллона.

3 Порядок выполнения работы

1 Включить установку тумблером 1. Тумблером 2 включить компрессор. Открыть напускной клапан, нажав кнопку 5.

2 Компрессором накачать в баллон воздух так, чтобы разность уровней манометрической жидкости в манометре 6 стала равной 250–300 мм. Закрыть напускной клапан 5 насоса, отпустить кнопку, выключить компрессор, выждать 2–3 мин до тех пор, пока температура воздуха в баллоне не станет равной температуре окружающей среды (падение уровня манометрической жидкости в жидкостном манометре 6 прекратится). По нижнему уровню мениска определить уровни жидкости L_1 и L_2 в коленах манометра. Записать в таблицу 1 значения L_1 , L_2 и $H = L_1 - L_2$.

3 Нажать на выпускной клапан 7, соединив баллон с атмосферой. В тот момент, когда уровни в обоих коленах манометра сравниваются,

резко отпустить кнопку выпускного крана. Выждав 2–3 мин, пока газ в баллоне нагреется до комнатной температуры, определить уровни жидкости L'_1 и L'_2 . Значения L'_1 , L'_2 и $h = L'_1 - L'_2$ записать в таблицу.

4 Опыт повторить не менее пяти раз и по формуле (19) вычислить значения γ , занеся их потом в таблицу 1.

5 Найти среднее значение $\langle \gamma \rangle$, абсолютные погрешности отдельных измерений, среднюю квадратичную погрешность σ , полуширину доверительного интервала Δ для доверительной вероятности $P = 0,95$. Оценить относительную ошибку измерений.

Таблица 1

Номер опыта	L_1	L_2	$H=L_1-L_2$	L'_1	L'_2	$H=L'_1-L'_2$	γ	$\langle \gamma \rangle$
	мм							
1								
2								
3								
4								
5								

6 Окончательный результат представить в виде

$$\gamma = \langle \gamma \rangle + \Delta, \quad \varepsilon = \dots \% \quad \text{при } P = 0,95.$$

Контрольные вопросы

1 Сформулировать первое начало термодинамики и указать физический смысл величин δQ , dU , δA .

2 Понятие теплоемкости. Теплоемкость газов в различных изопроцессах. Удельная и молярная теплоемкости.

3 Чем определяются молярные теплоемкости газа $C_{V,m}$ и $C_{p,m}$. В каких единицах они измеряются?

4 Какой процесс называется адиабатным? Что происходит с внутренней энергией газа при адиабатном процессе?

5 Изложить сущность метода экспериментального определения показателя адиабаты.

6 Вывести рабочую формулу (9).

7 Доказать, что $C_{p,m} - C_{V,m} = R$.

Лабораторная работа № 2.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ОЛОВА

Цель работы. Экспериментально определить удельную теплоту кристаллизации олова и изменение энтропии при фазовом переходе на примере кристаллизации олова из расплава при его охлаждении.

1 Краткие сведения из теории

Простейшей физической моделью теплообмена при охлаждении тела является его охлаждение в сплошной однородной среде с постоянной температурой T_c . В этом случае внутри охлаждаемого тела в течение всего процесса во всех точках тела температура одинакова. Такой процесс состоит из непрерывно следующих друг за другом равновесных состояний и, следовательно, является обратимым. Вследствие теплообмена с внешней средой происходит: охлаждение расплава (температура вещества понижается до T_k); кристаллизация расплава (температура вещества постоянна и равна температуре кристаллизации); охлаждение кристаллизованавшегося вещества (происходит дальнейшее понижение температуры).

При охлаждении происходит передача теплоты dQ от расплава к окружающей среде. По закону Фурье

$$dQ = -k \frac{dT}{dr} S dt, \quad (1)$$

где dQ – теплота, переносимая в направлении r перпендикулярно площади S поверхности охлаждаемого вещества (расплава) за время dt ; dT/dr – градиент температуры, равный скорости изменения температуры на единицу длины dr в направлении нормали к этой площадке; k – коэффициент теплопроводности (теплопроводность), численно равный количеству теплоты dQ , переносимой за время $t = 1$ с перпендикулярно площадке $S = 1 \text{ м}^2$ при градиенте температуры $dT/dr = 1 \text{ К/м}$. Знак минус в законе Фурье показывает, что при теплопроводности теплота переносится в направлении убывания температуры.

В процессах охлаждения вещества в данном агрегатном состоянии (твердом, жидком, газообразном) теплота рассчитывается по формуле

$$dQ = c m dT, \quad (2)$$

где m – масса охлаждаемого вещества; dT – изменение температуры; c

– удельная теплоемкость, равная теплоте, отдаваемой (сообщаемой) веществом массой 1 кг при изменении его температуры на 1 К.

При кристаллизации (плавлении) вещества, т. е. при переходе вещества из одного агрегатного состояния в другое (жидкое в твердое или наоборот) при постоянной температуре фазового перехода выделяется (поглощается) теплота, величина которой вычисляется по формуле

$$dQ = \lambda_k m, \quad (3)$$

где λ_k – удельная теплота кристаллизации, равная теплоте, отдаваемой (принимаемой) веществом массой 1 кг при постоянной температуре кристаллизации (плавления) T_k , m – масса вещества.

Теплообмен всегда связан с изменением степени упорядоченности термодинамической системы. Количественной мерой этого является скалярная физическая величина – энтропия. Изменение энтропии в элементарном обратимом процессе

$$dS = \left(\frac{dQ}{T} \right)_{\text{обр}}, \quad (4)$$

где T – температура процесса, dQ – теплота процесса.

Применяя закон сохранения энергии к процессу кристаллизации олова, получим уравнение

$$\lambda_k m_o + \alpha S (T_k - T_c) \Delta \tau_k = 0, \quad (5)$$

где λ_k – удельная теплота кристаллизации; m_o – масса олова; $\lambda_k m_o$ – теплота, отдаваемая оловом при кристаллизации; $\alpha S (T_k - T_c) \Delta \tau_k$ – теплота, отдаваемая среде через поверхность ампулы с образцом площадью поверхности S за время кристаллизации $\Delta \tau_k$; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности ампулы в окружающую среду (величина постоянная, зависящая от конструкции модуля); T_k – температура кристаллизации олова; T_c – температура окружающей среды.

Применяя закон сохранения энергии к процессу охлаждения отвердевшего олова после кристаллизации, получим

$$(c_o m_o + c_a m_a) dT + \alpha S (T - T_c) d\tau = 0, \quad (6)$$

где $(c_o m_o + c_a m_a) dT$ – теплота, отданная телом при его охлаждении

на dT за время $d\tau$; $\alpha S(T - T_c) d\tau$ – теплота, отданная окружающей среде через поверхность ампулы S за время $d\tau$;
 c_o , c_a – удельные теплоёмкости олова и материала ампулы; T – температура твёрдого олова.

Из уравнений (5) и (6), исключая неизвестные α и S , получим

$$\lambda_k = -(c_o m_o + c_a m_a) \frac{\Delta \tau_k}{m_o} \frac{\theta_k}{\theta} \frac{d\theta}{d\tau}, \quad (7)$$

где $\theta_k = T_k - T_c$; $\theta = T - T_c$.

Изменение энтропии при кристаллизации олова

$$\Delta S_k = \frac{\Delta Q_k}{T_k} = \frac{\lambda_k m_o}{T_k}. \quad (8)$$

Следовательно, для определения удельной теплоты кристаллизации λ_k и изменения энтропии в этом процессе ΔS_k необходимо измерить T_k , $\Delta \tau_k$ и вычислить производную $\frac{d\theta}{d\tau}$ функции $\theta = f(\tau)$ в произвольной точке, соответствующей температуре твёрдого олова в процессе его охлаждения. Производная находится из графика, построенного по экспериментальным данным (кривая охлаждения), $\frac{d\theta}{d\tau} \approx \frac{\Delta \theta}{\Delta \tau}$.

2 Оборудование и приборы

Ампула с оловом 1 нагревается в электрической печи 2 (рисунок 1). Внутри ампулы находится металлическая трубка-чехол с дифференциальной хромель-копелевой термопарой 3, горячий спай которой находится в ампуле, а холодный – на воздухе. Концы термопары через гнезда 4 необходимо соединить с милливольтметром 5, измеряющим термо-ЭДС ΔE .

Электрическая печь 2 находится в модуле стенда. Подключение электрической печи к сетевым разъёмам стенда производится вилкой с подводящими проводами. Стенд включается тумблером 6. В работе измеряются следующие величины: температура кристаллизации T_k ($T_k = \theta_k + T_c$), время кристаллизации $\Delta \tau_k$. Исследуется зависимость разности температур олова и окружающей среды θ от времени охлаждения $\theta = f(\tau)$, θ – находится по градуированному графику.

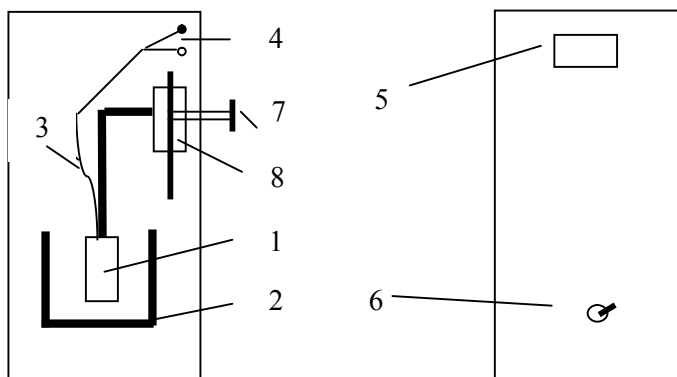


Рисунок 1

3 Порядок выполнения работы

1 Выписать данные установки.

2 Опустить ампулу с оловом 1 в электрическую печь 2, для чего отвернуть винт 7, переместить ползун 8 по направляющему стержню вниз до упора (проследить, чтобы ампула вошла в печь). Подключить милливольтметр к клеммам 4.

3 Включить стенд, милливольтметр, электрическую печь.

4 Проследить в течение 5–7 мин за тем, чтобы олово, находящееся в ампуле, расплавилось. В данной работе этот момент времени соответствует величине термо-ЭДС (при показаниях на шкале милливольтметра $\geq 11,5$ мВ).

5 Через 10–20 с. после окончания процесса плавления (при показаниях милливольтметра 13–15 мВ) отключить электрическую печь, отвернуть винт 7 ползуна 8, поднять ампулу с оловом 1 из печи 2 в верхнее положение. Зафиксировать это положение ампулы вне печи тем же винтом 7.

6 Включить секундомер, и через каждые 15 с. снимать показания милливольтметра, фиксирующего термо-ЭДС ΔE . Измерения продолжать до тех пор, пока не будут пройдены три области процесса: полного расплава, кристаллизации, охлаждения твёрдого олова. Время опыта около 10 мин..

7 Получив 40–50 экспериментальных точек, выключить милливольтметр и стенд. Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1

Номер опыта	ΔE , мВ	$\theta = (T - T_c)$, К	T_c , К	τ , с
1				
2				
...				
40				

8 Пользуясь градуировочным графиком (рисунок 2), найти значение температур $\theta = (T - T_c)$ и занести в таблицу 1.

По экспериментальным данным построить кривую охлаждения $\theta = f(\tau)$. Из полученной кривой определить время кристаллизации $\Delta\tau_k$ и температуру кристаллизации T_k ($T_k = \theta_k + T_c$), а также производную $\frac{d\theta}{d\tau}$ в области охлаждения твёрдого олова для пяти различных значений θ (рисунок 3).

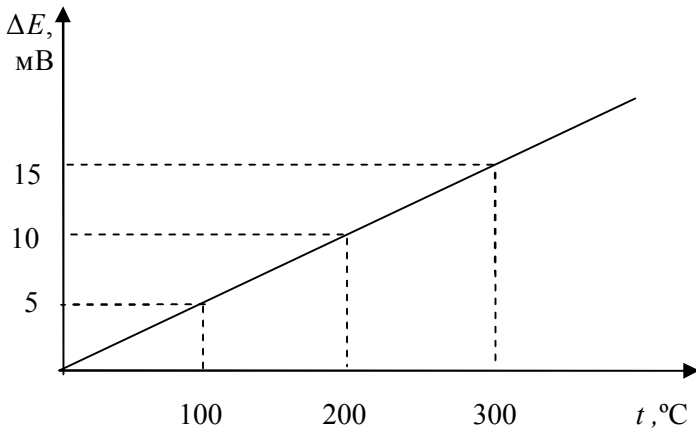


Рисунок 2

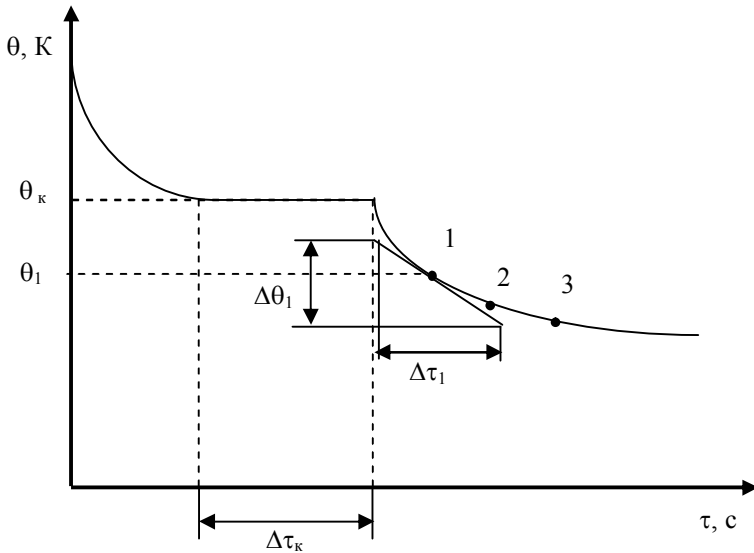


Рисунок 3

Данные установки:

- Масса олова m_o , г. 51.
- Масса ампулы m_a , г. 69.
- Удельная теплоемкость материала ампулы c_a , Дж/(кг · К) 690.
- Удельная теплоёмкость олова c_o , Дж/(кг · К) 250.

9 По полученным значениям $\Delta\tau_k$, T_k , $\frac{d\theta}{d\tau}$ вычислить пять разных

значений λ_k и ΔS_k , по формулам (7) и (8) и записать их в таблицу 2.

10 Найти средние значения $\langle\lambda_k\rangle$ и $\langle\Delta S_k\rangle$, абсолютные погрешности, квадратичные погрешности, полуширину доверительных интервалов при доверительной вероятности $P = 0,95$. Оценить относительную погрешность измерений.

Таблица 2

Номер опыта	λ_k	$\langle\lambda_k\rangle$	ΔS_k	$\langle\Delta S_k\rangle$
	Дж/кг		Дж/К	
1				
2				
3				
4				

11 Окончательный результат представить в следующей форме:

$$\lambda_{\kappa} = (\langle \lambda_{\kappa} \rangle \pm \Delta \lambda_{\kappa}), \text{ Дж/кг}, \quad \varepsilon = \dots\% \text{ при } P = 0,95,$$

$$\Delta S_{\kappa} = (\langle \Delta S_{\kappa} \rangle \pm \Delta(\Delta S_{\kappa})), \text{ Дж/К}, \quad \varepsilon = \dots\% \text{ при } P = 0,95.$$

Контрольные вопросы

- 1 Агрегатные состояния вещества. Фазовые переходы.
- 2 Удельная теплоёмкость вещества. Удельная теплота плавления (кристаллизации). В каких единицах она измеряется?
- 3 Теплообмен. Уравнение теплового баланса.
- 4 Энтропия. Изменение энтропии в различных процессах.
- 5 Принципиальная схема модуля. Методика измерений.
- 6 Нарисовать график кривой охлаждения и объяснить ход этой кривой.
- 7 Как измеряют температуру при охлаждении олова?

Лабораторная работа № 2.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

Цель работы. Экспериментально определить коэффициент теплопроводности воздуха, находящегося вокруг нагретой нити.

Краткие сведения из теории

Теплопроводность – явление переноса энергии в термодинамических неравновесных системах. Если, например, в одной области данного объема газа средняя кинетическая энергия молекул больше, чем в другой, то с течением времени вследствие теплового движения и постоянного столкновения молекул происходит выравнивание их средних кинетических энергий и, как следствие, выравнивание температуры во всем объеме газа. Явление теплопроводности описывается законом Фурье

$$dQ = -\lambda(T) \frac{dT}{dr} S dt, \quad (1)$$

где dQ – теплота, переносимая в направлении r перпендикулярно площадке S за время dt ; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности (теплопроводность), численно равный количеству теплоты dQ , переносимой за время $t = 1$ с перпендикулярно площадке $S = 1 \text{ м}^2$ при единичном градиенте температуры $dT/dr = 1 \text{ К/м}$; dT/dr – градиент температуры, равный скорости изменения температуры на единицу длины dr в направлении нормали к этой площадке. В общем случае коэффициент теплопроводности зависит от природы молекул и температуры газа. Знак минус в законе Фурье показывает, что при теплопроводности теплота переносится в направлении убывания температуры.

При нагревании нити, находящейся в воздухе, вдоль нормали к ней (по радиусу цилиндрической поверхности) создается градиент температуры. Площадь, через которую передается тепло, равна площади поверхности цилиндра, коаксиального с нагретой нитью. Теплопередача от нити в окружающую среду осуществляется вследствие теплопроводности воздуха, излучения, конвекции воздуха. При небольшой температуре нити будем считать, что теплопередача осуществляется в основном вследствие теплопроводности.

При этом можно записать:

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dr} \cdot 2\pi r L dt, \quad (2)$$

где dQ – теплота, передаваемая за время dt через цилиндрическую поверхность радиуса r , площадь которой $S = 2\pi r L$; λ – коэффициент теплопроводности; L – длина нити; dT/dr – радиальный градиент температуры.

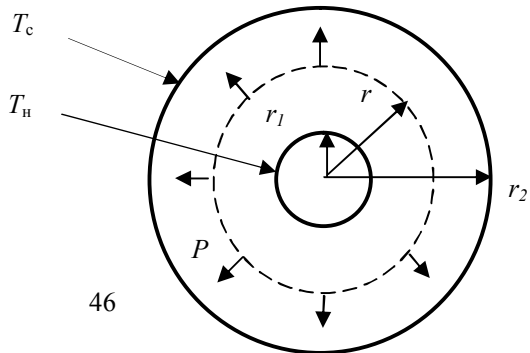
Из уравнения (2) можно определить мощность теплового потока через цилиндрическую поверхность радиуса r (рисунок 1):

$$P = \frac{dQ}{dt} = -2\pi\lambda \frac{dT}{dr} rL. \quad (3)$$

Отсюда получим

$$P \frac{dr}{r} = -2\pi\lambda L dT. \quad (4)$$

В установившемся режиме теплопередачи



$P = \text{const}$. Положим также, что в исследуемом диапазоне температур коэффициент теплопроводности меняется незначительно, поэтому его можно считать постоянным.

Тогда выражение (4) можно проинтегрировать:

$$\int_{r_1}^{r_2} P \frac{dr}{r} = -2\pi \int_{T_H}^{T_c} \lambda L dT, \quad (5)$$

где r_1 – радиус нити; r_2 – внутренний радиус трубки; T_H – температура нити; T_c – температура поверхности трубки радиусом r_2 (среды).

После проведения интегрирования находим коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = \frac{P \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi L (T_H - T_c)}. \quad (6)$$

Мощность теплового потока вычисляется по экспериментальным данным:

$$P = U_H I_H, \quad (7)$$

где U_H – напряжение на нити; $I_H = U_0/R_0$ – ток, текущий через образцовое сопротивление R_0 и нить, соединенную последовательно с образцовым сопротивлением ($I_H = I_0$). Для определения I_H измеряется напряжение U_0 на образцовом сопротивлении R_0 . Температура нити определяется из температурной зависимости ее электрического сопротивления:

$$t_H = \frac{R_H - R_{H0}}{\alpha_t R_{H0}}, \quad T_H = (273 + t_H), \quad (8)$$

где R_{H0} – сопротивление нити при $t_{H0} = 0$ °C; R_H – сопротивление нити при температуре опыта t_H ; α_t – температурный коэффициент сопротивления материала нити. Температура T_H выражается в кельвинах.

3 Оборудование и приборы

Нагреваемая проволока из меди – нить находится в цилиндрическом стеклянном баллоне с двойными стенками (рисунок 2), между

которыми залита вода.

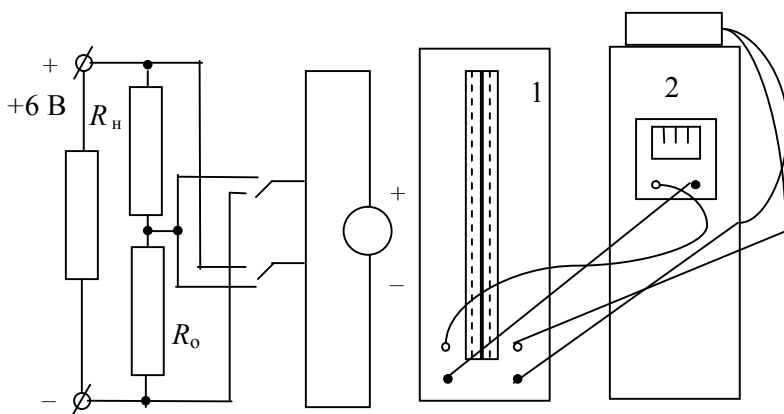


Рисунок 2

Температура воды в баллоне, и следовательно, температура стенки T_c трубки постоянна в течение опыта. Баллон с нитью укреплен в модуле 2 лабораторного стенда. На панели модуля 1 расположены электрические разъемы для соединения его с измерительными приборами модуля 2. Нить через разъем "Ист. питания" подключается к блоку питания (+6 В) модуля 2. Напряжение на нити U_n измеряется цифровым вольтметром, подключенным к разьему "Вольтметр" модуля 1. Ток в нити определяется по падению напряжения U_o на заданном образцовом сопротивлении R_o . Сила тока вычисляется по формуле $I_n = U_o/R_o$. Мощность выделяемой нитью тепловой энергии вычисляется по формуле (5). По формуле (6) находятся значения абсолютной температуры нити T_n , строится график $P = f(T_n)$, по которому находятся значения производной $dP/dT_n \approx \Delta P/\Delta T_n$ и по формуле (4) – значение $\lambda(T_n)$.

Порядок выполнения работы

1 Выписать данные модуля (r_1 , r_2 , R_{n0} , α_t , L , R_o).

Данные стенда:

Радиус нити r_1 , мм	0,035
Внутренний радиус трубки r_2 , мм	3
Сопротивление нити при 0°C $R_{н0}$, Ом	2,2
Температурный коэффициент сопротивления нити α_t , Ом/град	0,0038
Длина медной нити L , мм	440
Образцовое сопротивление R_0 , Ом	0,1

2 Убедиться в том, что все приборы выключены. Повернув регулятор напряжения источника питания против часовой стрелки до упора, включить стенд и вольтметр.

3 Соединить проводами блок питания с нитью через разъем "Ист. питания", вольтметр – с разъемом "Вольтметр" с **соблюдением полярности!!!**

4 Выбрать значения напряжения, при которых производятся измерения (рекомендуемые значения напряжений, устанавливаемые на источнике питания: 1; 2; 3; 4; 4,5 В).

5 Установить первое значение напряжения нити, следя за показаниями вольтметра. Тумблер на модуле 1 должен находиться в положении R_n .

6 Произвести по вольтметру отсчет напряжения на нити U_n . Переключить тумблер в положение R_0 , произвести отсчет напряжения на образцовом сопротивлении U_0 .

7 Пункты 5 и 6 повторить для следующих четырех измерений напряжений, выбранных в эксперименте. Значения напряжений U_n и U_0 занести в таблицу 1.

Таблица 1

Номер измерения	U_n , В	U_0 , В	I_n , А	R_n , Ом	T_n , К	P , Вт	λ , Вт/(м·К)	$\langle \lambda \rangle$, Вт/(м·К)
1								
2								
3								

8 По формулам $I_n = U_0/R_0$ и $R_n = U_n / I_n$ вычислить силу тока I_n , протекающего через образцовое сопротивление и нить, электрическое

сопротивление нити R_n . По формулам (5) и (6) вычислить выделяемую мощность P и температуру нити T_n . Результаты, записать в таблицу 1.

9 Построить график $P(T_n)$. По нему найти значения dP/dT_n в точках, соответствующих выбранным значениям T_n .

10 Вычислить по формуле (4) значения $\lambda(T_n)$ и записать их в таблицу 1.

11 Построить график зависимости коэффициента теплопроводности от температуры.

Контрольные вопросы

- 1 Явление теплопроводности.
- 2 Закон Фурье для теплопроводности.
- 3 Коэффициент теплопроводности. Его физический смысл и размерность.
- 4 Вывод формулы для экспериментального определения коэффициента теплопроводности.
- 5 Принципиальная схема модуля.
- 6 Методика экспериментального определения коэффициента теплопроводности.
- 7 Объяснить с позиции молекулярно-кинетической теории ход графика температурной зависимости коэффициента теплопроводности.
- 8 Что называется градиентом температуры?
- 9 От чего зависит коэффициент теплопроводности?
- 10 Вследствие каких процессов осуществляется теплопередача от нити в окружающую среду?

Лабораторная работа № 2.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ РОТАМЕТРА

Цель работы. Ознакомиться с одним из методов определения коэффициента вязкости газов. Вычислить значение коэффициента динамической вязкости воздуха, средней длины свободного пробега молекул и средней скорости теплового движения молекул.

1 Краткие сведения из теории

Свойство жидкостей и газов оказывать сопротивление перемеще-

нию одной их части относительно другой называется *внутренним трением или вязкостью*.

Механизм возникновения внутреннего трения между параллельными слоями газа (жидкости), движущимися с различными скоростями, заключается в следующем: каждая молекула газа участвует в двух движениях – хаотическом тепловом и упорядоченном направленном. Вследствие теплового движения молекулы переходят из одного слоя в другой. Попав в другой слой, молекула претерпевает соударения с молекулами этого слоя, в результате чего она либо отдает избыток своего импульса другим молекулам (если она прилетела из слоя, движущегося с большей скоростью), либо увеличивает свой импульс за счет других молекул (если она прилетела из слоя, движущегося с меньшей скоростью). Это приводит к торможению слоя, движущегося быстрее, и ускорению слоя, движущегося медленнее. Слои ведут себя так, как если бы к первому слою (скорость которого больше) была приложена тормозящая его движение сила, а ко второму слою (скорость которого меньше) – такая же по модулю ускоряющая его движение сила. Эти силы направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев. Таким образом, перемешивание молекул разных слоёв приводит к выравниванию скоростей упорядоченного движения разных слоёв, что макроскопически проявляется как действие сил трения между слоями.

Основной закон внутреннего трения – закон Ньютона. Он имеет вид

$$dp = -\eta \frac{du}{dx} S_n dt, \quad (1)$$

где dp – импульс, переносимый через площадку S за время dt ; du/dx – величина градиента скорости, показывающая, как быстро меняется скорость слоев вдоль оси x ; S_n – проекция площадки S на плоскость, перпендикулярную к направлению переноса импульса, η – коэффициент внутреннего трения, называемый динамическая вязкостью или просто вязкостью. Знак минус указывает, что импульс переносится от слоев, движущихся с большей скоростью, к слоям, движущимся с меньшей скоростью.

Модуль силы внутреннего трения между слоями равен

$$F = \frac{dp}{dt} = \eta \left| \frac{du}{dx} \right| S_n. \quad (2)$$

Сила внутреннего трения тем больше, чем больше рассматриваемая площадь поверхности слоя S , и зависит от того, насколько быстро меняется скорость течения жидкости или газа при переходе от слоя к слою. Вязкость зависит от температуры, причем характер этой зависимости для жидкостей и газов различен. Вязкость жидкостей с ростом температуры уменьшается, а газов, наоборот, увеличивается, что указывает на различие в них механизмов внутреннего трения.

Выражения (1) и (2) являются различными формами записи основного закона внутреннего трения. В СИ единица измерения коэффициента динамической вязкости – (Н·с)/м², или кг/(м·с), или Па·с. 1 Па·с равен динамической вязкости среды, в которой при *ламинарном течении* и градиенте скорости с модулем 1 м/с на 1 м, возникает сила внутреннего трения в 1 Н на 1 м² поверхности касания слоев.

Физический смысл вязкости можно определить с помощью любого из этих соотношений. Например, из выражения (2) следует, что вязкость η определяется силой внутреннего трения, действующей на единицу площади поверхности слоя при градиенте скорости, равном единице. Кроме динамической вязкости часто используется понятие кинематической вязкости $\nu = \eta/\rho$, где ρ – плотность газа.

Коэффициент динамической вязкости газа определяется по формуле

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle, \quad (3)$$

где ρ – плотность газа; $\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость движения молекул; $\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул.

Существует два режима течения жидкости – ламинарное и турбулентное. *Ламинарным (слоистым)* течением жидкости называется такое течение, при котором вдоль потока каждый выделенный тонкий слой жидкости скользит относительно соседних слоев, не перемешиваясь с ними. Такое течение жидкости наблюдается при небольших

скоростях её движения. *Турбулентное* (вихревое) течение – это течение, при котором вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости (газа). Такое течение жидкости наблюдается при больших скоростях течения. В работе будет рассматриваться ламинарное течение жидкости.

Средней длиной свободного пробега молекул называется расстояние, которое проходят молекулы газа между двумя последовательными столкновениями.

Вязкость жидкости или газа может быть определена методом Пуазейля. Данный метод применим к случаю ламинарного течения жидкости (газа).

Рассмотрим стационарный поток газа, ламинарно текущий через капилляр круглого сечения (рисунок 2). Мысленно выделим в объеме газа цилиндр радиуса r , длины L и обозначим давление на его торцах через p_1 и p_2 . В стационарных условиях сила давления, действующая на боковую поверхность цилиндра $(p_1 - p_2)\pi r^2$, уравновешивается силой трения (2), действующей на боковую поверхность цилиндра площадью $S = 2\pi rL$, т.е.

$$(p_1 - p_2)\pi r^2 = 2\pi rL\eta \frac{dv}{dr}.$$

Отсюда получаем

$$dv = \frac{(p_1 - p_2)}{2L\eta} r dr. \tag{4}$$

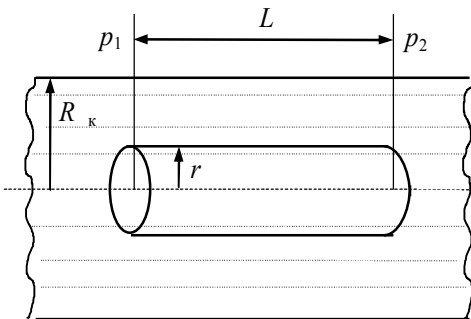


Рисунок 2

Учитывая, что скорость газа обращается в нуль на стенках капилляра, так как молекулы ”прилипают“ к стенкам, интегрируем равенство (4) по радиусу поперечного сечения от $r = 0$ до $r = R_k$. Находим, что скорость газа меняется

квадратично с радиусом и максимальна на оси трубки ($r = 0$):

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} (R_k^2 - r^2). \quad (5)$$

Объем газа, протекающий через поперечное сечение капилляра за время $\Delta\tau$, с учетом найденного значения скорости газа (5), равен:

$$\begin{aligned} V_0 &= \Delta\tau \int_0^{R_k} 2\pi v r dr = \frac{2\pi\Delta\tau(p_1 - p_2)}{4\eta L} \int_0^{R_k} r(R_k^2 - r^2) dr = \\ &= \frac{\pi R_k^4 (p_1 - p_2) \Delta\tau}{8\eta L}. \end{aligned}$$

Отсюда следует

$$V_0 = \frac{\pi R_k^4 (p_1 - p_2) \Delta\tau}{8\eta L}. \quad (6)$$

Формула (6) носит название формулы Пуазейля. Введем величину Q , называемую расходом газа:

$$Q = V_0 / \Delta\tau. \quad (7)$$

Из выражения (6), используя равенство (7), можно выразить вязкость:

$$\eta = \frac{\pi R_k^4 (p_1 - p_2)}{8QL}. \quad (8)$$

Таким образом, вязкость газа можно определить по формуле (8), измеряя расход газа $Q = V_0 / \Delta\tau$, перепад давления $(p_1 - p_2)$, длину капилляра L и его радиус R_k .

Среднюю арифметическую скорость молекул газа $\langle v \rangle$ можно определить по формуле

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad (9)$$

где $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; T – термодинамическая температура воздуха; μ – молярная масса газа.

Для определения средней длины свободного пробега молекул воспользуемся соотношением (3), предварительно выразив плотность газа ρ из уравнения Менделеева – Клапейрона:

$$\rho = \frac{p_0 \mu}{RT}.$$

В итоге имеем

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta RT}{p_0 \mu \langle v \rangle}, \quad (10)$$

где p_0 – атмосферное давление.

2 Оборудование и приборы

Для определения коэффициента вязкости воздуха в данной работе используется установка, блок-схема которой приведена на рисунке 3.

Воздух в капилляр 3 нагнетается микрокомпрессором. Объемный расход воздуха Q измеряется ротаметром 1, а нужное его значение устанавливается вентилем 2, расположенным на ротаметре. Для измерения разности давлений воздуха на концах капилляра предназначен U – образный водяной манометр.

Атмосферное давление измеряется барометром, температура – термометром, установленными в лаборатории. Геометрические размеры капилляра – радиус $r = 0,5$ мм и длина $L = 7$ см.

3 Порядок выполнения работы

1 Перед включением компрессора установить вентиль 2 в крайнее левое положение (закрыт).

Проверить все соединительные шланги.

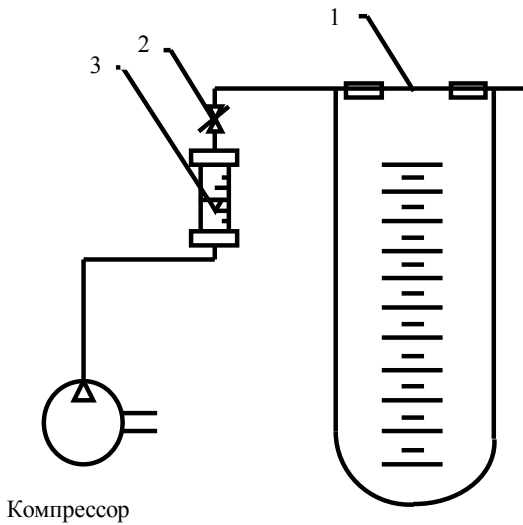


Рисунок 3

2 Включить компрессор.

3 Вентилем 2 установить выбранное значение объемного расхода воздуха Q . Объемный расход воздуха определяется по показаниям ротаметра из градуировочного графика (рисунок 4).

4 Измерить разность давлений в коленях манометра по формуле

$$\Delta P = \rho g \Delta h ,$$

где $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; Δh – разность высот

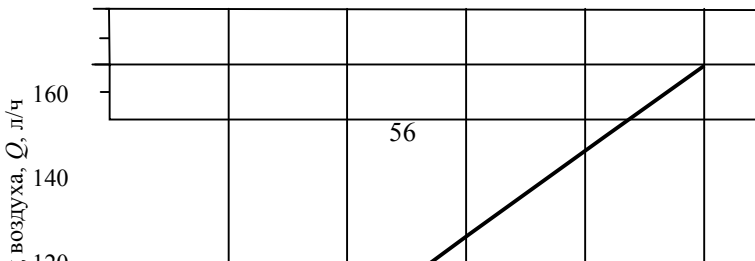
столбов жидкости в коленях манометра.

5 Провести измерения по пп. 3, 4 для пяти значений объемного расхода воздуха, заданных преподавателем. Результаты измерений для заданных значений Q занести в таблицу 1.

6 Установить регулятор расхода воздуха на минимум. Выключить компрессор.

7 Определить для каждого расхода воздуха коэффициент вязкости воздуха по формуле (8). Найти среднее значение коэффициента вязкости воздуха $\langle \eta \rangle$. Найденные значения занести в таблицу 1.

8 Найти среднеквадратичную погрешность, абсолютную погрешность измерений η для доверительной вероятности 0,95. Определить относительную ошибку измерений η .



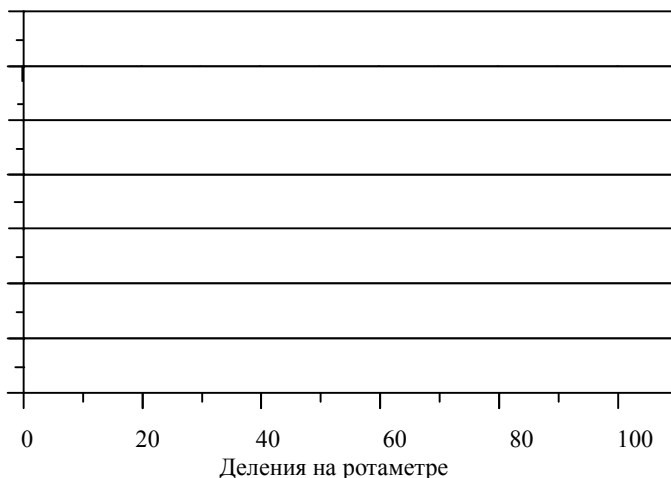


Рисунок 4.

9 Результаты измерений η представить в следующем виде:

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta \eta; \quad \varepsilon = \dots \% \quad \text{при} \quad P = 0,95.$$

Таблица 1

№ измерения	Q , л/ч	Δh , м	ΔP , Па	η , Па·с	$\langle \eta \rangle$, Па·с	$\langle v \rangle$, м/с	$\langle \lambda \rangle$, м
1							
2							
3							
4							
5							

10 По формуле (9) вычислить среднюю скорость теплового движения молекул воздуха, учитывая, что молярная масса воздуха $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

11 Рассчитать значение средней длины свободного пробега молекул по формуле (10).

12 Найденные в пп.10, 11 значения занести в таблицу 1.

Контрольные вопросы

1 Что называют вязкостью (внутренним трением)? Записать закон внутреннего трения.

2 Пояснить механизм возникновения силы внутреннего трения с точки зрения молекулярно-кинетической теории.

3 Коэффициент вязкости и его физический смысл. Единицы измерения коэффициента динамической вязкости.

4 Какое течение газа (жидкости) называется ламинарным, турбулентным?

5 Что такое средняя длина свободного пробега молекул? Как она связана с коэффициентом динамической вязкости для идеального газа?

6 Что называют расходом газа? Напишите формулу Пуазейля. Поясните все величины, входящие в эту формулу. При каких условиях она применима?

7 Нарисуйте схему установки, используемой в данной работе. Поясните ход эксперимента.

Рекомендуемая литература

1 Савельев, И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – Т. 2. – 496 с.

2 Детлаф, А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высшая школа, 1989. – 608 с.

3 Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 1990. – 478 с.

4 Чертов, А. Г. Физические величины / А. Г. Чертов. – М. : Высшая школа, 1990. – 315 с.

5 Сена, Л. И. Единицы физических величин и их размерности / Л. И. Сена. – М. : Наука, 1988. – 432 с.

6 Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М. : Мир, 1985. – 520 с.

7 Наркевич И. И. Физика для втузов. Т.1, 2 / И. И. Наркевич, Э. И. Волмянский, С. И Лобко. – Минск: Вышэйшая школа, 1992–1994.

8 Матвеев, А. Н. Курс общей физики / А. Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1976–1989.

9 Сивухин, Д. В. Общий курс физики / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1980. – 752 с.

10 Лабораторные занятия по физике / под ред. Л. Л. Гольдина. – М. : Наука, 1983. – 704 с.

11 Физический практикум / под ред. Г. С. Кембровского. – Мн. : Изд-во "Университетское", 1986. – 352 с.

12 Зайдель, А. Н. Ошибки измерений физических величин / А. Н. Зайдель. – Л. : Наука, 1974. – 108 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

**1 Некоторые физические постоянные
(округленные значения)**

Наименование	Значение
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8$ м/с
Гравитационная постоянная	$G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м ² ·кг ⁻²
Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,81$ м/с ²
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31$ Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Объём 1 моля газа при нормальных условиях	$V_\mu = 22,4 \cdot 10^{-3}$ м ³ /моль
Элементарный электрический заряд	$q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-31}$ кг
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Магнетон Бора	$\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

2 Плотность твёрдых тел и жидкостей

Вещество	$\rho, 10^3$ кг/м ³	Вещество	$\rho, 10^3$ кг/м ³
Алюминий	2,71	Вода (при 4 °С)	1,00
Железо	7,80	Глицерин	1,26
Медь	8,93	Дизельное топливо	1,00
Свинец	11,30	Масло касторовое	0,90
Серебро	10,50	Керосин	0,80
Эбонит	1,20	Масло касторовое	0,90
Магний	1,74	Спирт	0,83

3 Динамическая вязкость жидкостей при 20 °С

Жидкость	$\eta, 10^{-3}$ Па·с
Вода	1,00
Глицерин	1480,00
Масло касторовое	967,00
Масло машинное	1000,00

Ртуть	1,58
-------	------

4 Эффективный диаметр молекул d , динамическая вязкость η и теплопроводность λ газов при нормальных условиях

Газ	d , нм	η , мкПа·с	λ , мВт/(м·К)
Азот	0,38	16,6	24,3
Аргон	0,35	21,5	16,2
Водород	0,28	8,66	168,0
Воздух	0,27	17,2	24,8
Гелий	0,22	18,9	142,0
Кислород	0,36	19,8	24,4
Водяной пар	0,30	8,32	15,8

5 Температура плавления и удельная теплота плавления твердых тел

Вещество	$T_{пл}$, К	λ , кДж/кг	Вещество	$T_{пл}$, К	λ , кДж/кг
Алюминий	933	397	Медь	1356	205
Лед	273	334	Никель	1730	303
Ртуть	234	11,8	Свинец	600	23
Железо	1807	277	Олово	505	60
Серебро	1334	105	Вольфрам	3673	192

6 Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования

Приставка			Приставка		
Обозначение	Наименование	Множитель	Обозначение	Наименование	Множитель
Э	экса	10^{18}	д	деци	10^{-1}
П	пэта	10^{15}	с	санتي	10^{-2}
Т	тера	10^{12}	м	милли	10^{-3}
Г	гига	10^9	мк	микро	10^{-6}
М	мега	10^6	н	нано	10^{-9}
к	кило	10^3	п	пико	10^{-12}
г	гекта	10^2	ф	фемто	10^{-15}
да	дека	10^1	а	атто	10^{-18}

7 Греческий алфавит

Обозначения букв		Названия букв	Обозначения букв		Названия букв
Α	α	альфа	Ν	ν	ню
Β	β	бета	Ξ	ξ	кси
Γ	γ	гамма	Ο	ο	омикрон
Δ	δ	дельта	Π	π	пи
Ε	ε	эпсилон	Ρ	ρ	ро
Ζ	ζ	дзета	Σ	σ	сигма
Η	η	эта	Τ	τ	тау
Θ	θ	тета	Υ	υ	ипсилон
Ι	ι	йота	Φ	φ	фи
Κ	κ	каппа	Χ	χ	хи
Λ	λ	ламбда	Ψ	ψ	пси
Μ	μ	мю	Ω	ω	омега

Учебное издание

*АХРАМЕНКО Николай Арсеньевич,
ДОЦЕНКО Елена Иосифовна,
ПРОНЕВИЧ Игорь Иванович*

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Лабораторный практикум по курсу «Физика»

Редактор *И. И. Эвентов*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 14.07.2016 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать офсетная.
Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 2,91. Тираж 1000 экз.
Зак. № . Изд. № 47.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/361 от 13.06.2014.

№ 2/104 от 01.04.2014.

Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель