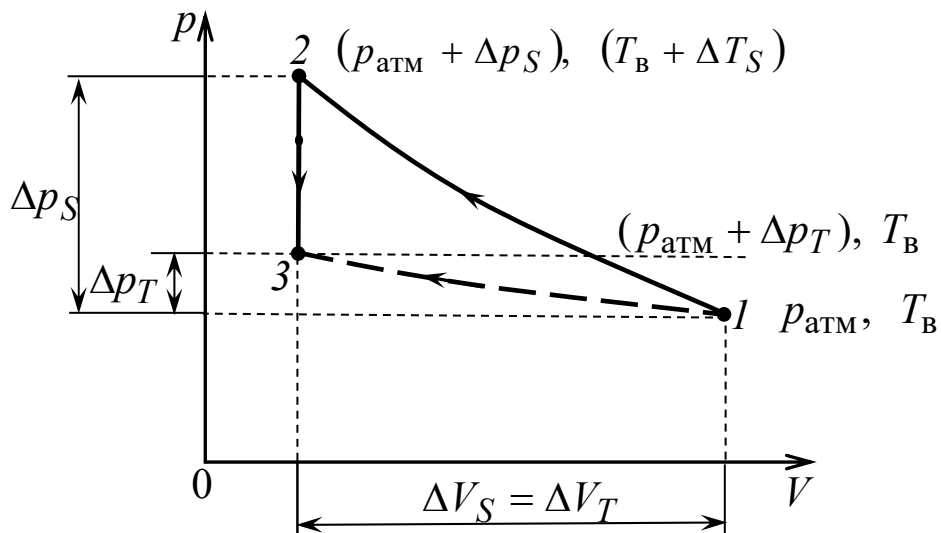


Е.С. Платунов

В.А. Самолетов

ФИЗИКА
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ
И ТЕРМОДИНАМИКЕ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Е.С. Платунов

В.А. Самолетов

**ФИЗИКА
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ
И ТЕРМОДИНАМИКЕ**

Учебно-методическое пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2017

УДК 530

Платунов Е. С., Самолетов В. А. Физика. Лабораторные работы по молекулярной физике и термодинамике: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 85 с.

Дано краткое теоретическое обоснование методов измерения, изложен порядок проведения лабораторных работ и обработки результатов измерений.

Предназначены для студентов направлений бакалавриата: 01.03.02, 09.03.01, 09.03.02, 09.03.03, 09.03.04, 10.03.01, 11.03.02, 11.03.03, 12.03.01, 12.03.02, 12.03.03, 12.03.05, 13.03.02, 14.03.01, 15.03.02, 15.03.04, 15.03.06, 16.03.01, 16.03.03, 18.03.02, 18.03.04, 19.03.01, 19.03.02, 19.03.03, 23.03.02, 23.03.03, 27.03.04, 27.03.05, 12.05.01 очной и заочной форм обучения.

Рекомендовано к печати Советом естественнонаучного факультета протокол №1 от 24.01.2017 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017

© Платунов Е.С., Самолетов В.А. 2017

ВВЕДЕНИЕ

В методических указаниях дано описание четырех лабораторных работ, связанных с основными разделами курса молекулярной физики и термодинамики.

Расчет погрешностей измерений проводится только в одной работе – «исследование изотермического процесса», с применением метода наименьших квадратов. В остальных работах расчет погрешностей не является обязательным.

Для удобства работы студентов список литературы приводится в конце каждой лабораторной работы. Громоздкие выводы и теоретические обоснования вынесены в приложения к конкретной работе (они расположены непосредственно после этой работы и обозначены порядковым номером со звездочкой).

Способы обработки и представление результатов измерения, а также справочные данные по единицам физических величин, физическим константам и свойствам веществ, общие для всех лабораторных работ, приведены в приложениях к методическим указаниям.

Все работы, выполняемые в лаборатории молекулярной физики и термодинамики, рассчитаны на два учебных часа.

Защита лабораторных работ проводится на плановых занятиях. Во время защиты студент сдает отчет, содержащий все пункты задания, и отвечает на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях к выполненной работе.

Инструктаж по технике безопасности работы в лаборатории молекулярной физики и термодинамики проводится преподавателем на первом занятии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Экспериментально найти зависимость изменения давления воздуха $p_{\text{изм}}$ от изменения объема $V_{\text{изм}}$.
2. Определить начальный объем исследуемого воздуха V_0 и количество воздуха ν .

На выполнение работы отводится два учебных часа.

Перечень используемого оборудования и средств измерений

Работа выполняется на универсальном стенде. Элементы стенда, используемые в данной работе, схематически изображены на рис. 1.

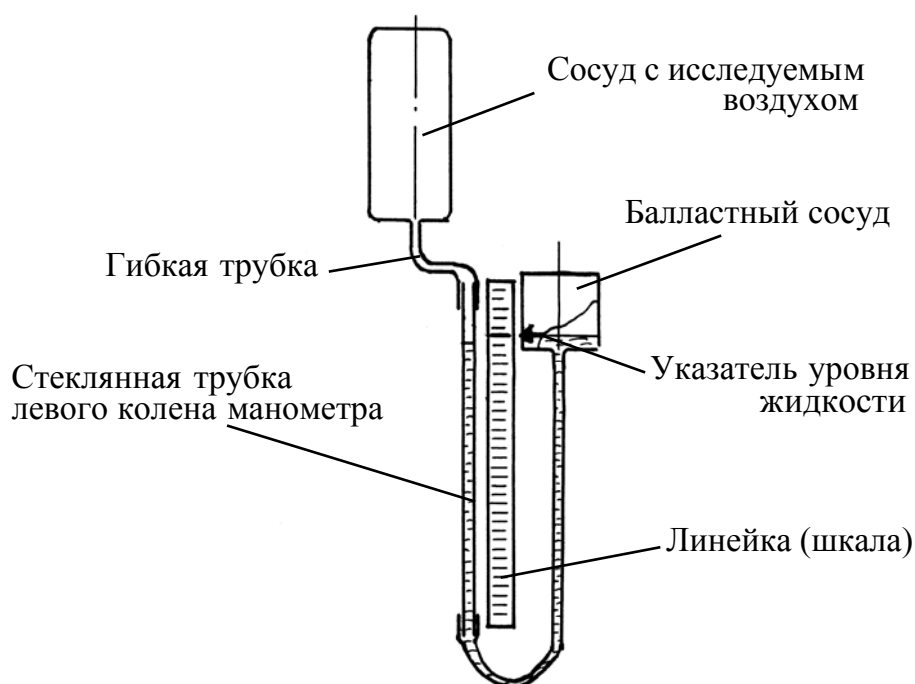


Рис. 1. Элементы стенда для выполнения работы

Уровень жидкости в трубках манометра измеряется с помощью линейки (шкалы).

Характеристики средств измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность $\Delta_{и}$
Линейка	300 мм	1 мм/дел.	–	1 мм
Термометр	(0...50) °С	1 °С/дел.	–	1 °С
Барометр	(80...106) кПа	0,1 кПа/дел.	–	0,1 кПа

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка стенда к работе

1. Отсоединить сосуд с исследуемым объемом воздуха от манометра, сняв гибкую трубку со штуцера, которым оканчивается верхняя часть стеклянной трубки (см. рис. 1, 2).

2. Переместить балластный сосуд вверх по вертикальной направляющей так, чтобы уровень жидкости в стеклянной трубке совпал с черной отметкой на шкале. Уровни жидкости в трубке и балластном сосуде должны стать одинаковыми, как в сообщающихся сосудах.

3. Указатель уровня жидкости балластного сосуда совместить с уровнем жидкости в стеклянной трубке.

4. Гибкой трубкой соединить сосуд с манометром. Для того чтобы давление в сосуде оставалось равным атмосферному, к штуцеру прижать шпильку и на них надеть гибкую трубку (как показано на рис. 2). Шпилька обеспечивает небольшой зазор между штуцером и трубкой, через который воздух из сосуда выдавливается в атмосферу. Когда уровень жидкости в стеклянной трубке установится на черной отметке, выдернуть шпильку. При этом гибкая трубка прижмется к штуцеру и обеспечит герметичность соединения.

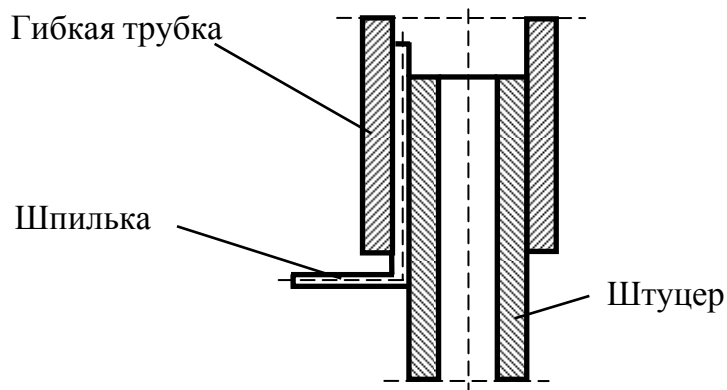


Рис. 2. Соединение штуцера и гибкой трубки

Выполнение измерений

1. С помощью барометра и термометра измерить атмосферное давление и температуру в лаборатории; записать результаты измерений

$$p_{\text{атм}} = \dots \text{Па}, \quad t_0 = \dots ^\circ\text{C}, \quad T_0 = 273 + t_0 = \dots \text{К}.$$

2. При правильной подготовке стенда к работе в первом измерении уровни жидкости в балластном сосуде h_6 и в стеклянной трубке манометра h_T равны нулю (см. табл. 2). Измерения обеих величин h_T и h_6 проводить относительно черной метки принятой за ноль отсчета (по правой шкале линейки).

Таблица 2

Измеряемые величины	Номер измерения										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
h_6 , мм	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
h_T , мм	0										
$(h_T - h_6)$, мм											
$p_{\text{изм}}$, Па											
$V_{\text{изм}}$, 10^{-6} м^3											

3. Ослабив крепежный винт балластного сосуда, опустить сосуд так, чтобы указатель уровня жидкости в нем установился ниже черной метки на 20 мм. С помощью крепежного винта закрепить балластный сосуд в этом положении. Через 1...2 мин измерить уровень

жидкости h_T относительно черной отметки в стеклянной трубке и результат измерения занести в табл. 2. *Указанная выше выдержка необходима, чтобы температура газа в новом состоянии сравнялась с температурой окружающей среды.*

4. Измерения повторить для всех значений h_0 , указанных в табл. 2, каждый раз опуская балластный сосуд на 20 мм относительно предыдущего уровня и ожидая выравнивая температуры 1...2 мин. Результаты измерений занести в табл. 2.

Внимание! Результаты измерений нужно подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

Теория опыта

Для идеального газа связь параметров состояния является наиболее простой и имеет вид (уравнение Клапейрона–Менделеева)

$$pV = \nu RT, \quad (1)$$

где p – давление газа, Па; V – объем, м³; T – температура, К; ν – количество вещества, моль; R – универсальная газовая постоянная, $R=8,31$ Дж/(моль·К).

Из уравнения (1) выразим давление

$$p = \nu \frac{RT}{V}. \quad (2)$$

Дифференцируя уравнение (2) по объему при условии $T = \text{const}$, получим связь между изменениями давления и объема

$$dp = -\frac{1}{V^2} \nu RT dV. \quad (3)$$

В начальном состоянии давление в сосуде равно атмосферному давлению $p_{\text{атм}}$, температура – температуре в лаборатории T_0 , а объем газа равен объему сосуда V_0 . Следовательно, имеем уравнение состояния для начальных условий

$$p_{\text{атм}} V_0 = \nu RT_0. \quad (4)$$

Учитывая, что в изотермическом процессе $T_0 = T$, из уравнения (4) выразим температуру

$$T = \frac{p_{\text{атм}} V_0}{\nu R}$$

и подставим ее в формулу (3).

Тогда

$$dp = -\frac{p_{\text{атм}} V_0}{V^2} dV. \quad (5)$$

Поскольку в данной лабораторной работе изменение объема dV много меньше начального объема V_0 , можно считать, что $V \approx V_0$ с погрешностью не более 3 %.

Тогда соотношение (5) принимает вид

$$dp = -\frac{p_{\text{атм}}}{V_0} dV. \quad (6)$$

Путем интегрирования перейдем от бесконечно малых изменений давления и объема к конечным изменениям этих величин и обозначим $dp = p_{\text{изм}}$, $dV = V_{\text{изм}}$.

Вместо формулы (6) получаем

$$p_{\text{изм}} = -\frac{p_{\text{атм}}}{V_0} V_{\text{изм}}. \quad (7)$$

Порядок обработки результатов измерений

1. Заполнить табл. 2. Для этого рассчитать изменения давления $p_{\text{изм}}$ и объема $V_{\text{изм}}$ исследуемого газа для всех измерений и заполнить соответствующие строки табл. 2.

$$p_{\text{изм}} = \rho_{\text{в}} g (h_{\text{т}} - h_{\text{с}}),$$

$$V_{\text{изм}} = h_{\text{т}} \frac{\pi d^2}{4},$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, $\rho_{\text{в}}=1000 \text{ кг/м}^3$; g – ускорение свободного падения, $g=9,81 \text{ м/с}^2$; d – внутренний диаметр стеклянной трубки левого колена манометра, $d = 7,8 \text{ мм}$.

2. Рассчитать начальный объем газа V_0 и количество вещества ν . Для этого по данным табл. 2 найти аналитический вид зависимости $p_{\text{изм}} = f(V_{\text{изм}})$. В соответствии с формулой (7) эта зависимость должна иметь вид прямой линии, проходящей через ноль

$$p_{\text{изм}} = bV_{\text{изм}}. \quad (8)$$

Значения коэффициента b в уравнении (8) и среднее квадратическое отклонение (СКО) S_b найти методом наименьших квадратов, изложенным в методических указаниях [3] и прил. 5.

Абсолютную погрешность коэффициента b в уравнении (8) для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ определить по формуле

$$\Delta_b = 2S_b. \quad (9)$$

Начальный объем исследуемого газа (объем сосуда) найти из соотношения (7) с учетом уравнения (8)

$$V_0 = -\frac{p_{\text{атм}}V_{\text{изм}}}{p_{\text{изм}}} = -\frac{p_{\text{атм}}}{b}. \quad (10)$$

Поскольку начальное состояние газа определяется уравнением состояния $p_{\text{атм}}V_0 = \nu RT$, то количество вещества в сосуде объемом V_0 равно

$$\nu = \frac{p_{\text{атм}}V_0}{RT} = -\frac{p_{\text{атм}}^2}{RTb}. \quad (11)$$

3. Рассчитать погрешность измерения начального объема V_0 .

Начальный объем V_0 определяется по формуле (10), поэтому погрешность измерения объема будем искать как погрешность косвенных измерений. Поскольку формула (10) представляет собой одночлен, то в соответствии рекомендациями методических указаний [3] вначале определим относительную погрешность измерения объема в процентах:

$$\varepsilon_{V_0} = \sqrt{\varepsilon_{p_{\text{атм}}}^2 + \varepsilon_b^2}. \quad (12)$$

Для этого в формулу (12) все относительные погрешности нужно подставить в процентах.

Относительная погрешность измерения атмосферного давления

$$\varepsilon_{p_{\text{атм}}} = \frac{\Delta p_{\text{атм}}}{p_{\text{атм}}} 100. \quad (13)$$

Относительная погрешность коэффициента b

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b} 100.$$

Абсолютная погрешность измерения давления

$$\Delta p_{\text{атм}} = \frac{2}{3} \Delta_{\text{ир}_{\text{атм}}}, \quad (14)$$

где $\Delta_{\text{ир}_{\text{атм}}}$ находим в табл. 1.

Абсолютная погрешность измерения объема

$$\Delta V_0 = V_0 \frac{\varepsilon_{V_0}}{100}. \quad (15)$$

Результат измерения записать в виде (см. прил. 3)

$$\boxed{V_0 = (\dots \pm \dots) \text{ м}^3; \quad \varepsilon_{V_0} = \dots\%; \quad \alpha = 0,95}$$

4. Количество вещества ν в сосуде объемом V_0 рассчитывается по формуле (11). Относительная погрешность измерения количества вещества ν в процентах определяется как погрешность косвенных измерений

$$\varepsilon_{\nu} = \sqrt{(2\varepsilon_{p_{\text{атм}}})^2 + \varepsilon_T^2 + \varepsilon_b^2}. \quad (16)$$

Погрешность величины R можно принять равной нулю. Относительная погрешность измерения температуры в процентах

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta T}{T} 100, \quad (17)$$

$$\Delta T = \frac{2}{3} \Delta_{\text{и}T}, \quad (18)$$

где $\Delta_{\text{и}T}$ находим в табл. 1.

Абсолютная погрешность измерения количества вещества

$$\Delta_v = v \frac{\varepsilon_v}{100}. \quad (19)$$

Результат измерения количества воздуха записать в виде (см. прил. 3)

$$v = (\dots \pm \dots) \text{ моль}; \quad \varepsilon_v = \dots\%; \quad \alpha = 0,95$$

Результатом работы являются:

1. Уравнение функции $p_{\text{изм}} = f(V_{\text{изм}})$, полученные методом наименьших квадратов.
2. Значение коэффициента b с указанием абсолютной и относительной погрешностей.
3. Значение начального объёма воздуха с указанием абсолютной и относительной погрешностей.
4. Значение количества воздуха с указанием абсолютной и относительной погрешностей.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные таблицы 1 и 2.
2. Расчет изменения давления $p_{\text{изм}}$ и объема $V_{\text{изм}}$ исследуемого газа.
3. Расчет коэффициентов линейной зависимости $p_{\text{изм}} = a + bV_{\text{изм}}$ методом наименьших квадратов.
4. Расчет начального объема газа V_0 и количества вещества v .
5. Расчет абсолютной и относительной погрешности измерения коэффициента b .
6. Расчет абсолютной и относительной погрешности измерения объема V_0 .
7. Расчет абсолютной и относительной погрешности измерения количества вещества v .
8. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку. Он

должен содержать результаты измерений, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Идеальный газ. Уравнение состояния. Приведите несколько вариантов записи уравнения состояния идеального газа.

Литература: [1, п. 1.3]; [2, § 41, 42].

2. Макроскопическое состояние. Термодинамический процесс.

Литература: [1, п. 1.1]; [2, § 41].

3. Атомная масса химического элемента, молекулярная масса вещества. Атомная единица массы. Число Авогадро. Молярная масса вещества.

Литература: [1, п. 1.3]; [2, § 41, 42].

4. Изохорный процесс. Уравнения, его описывающие, и графики процесса в различных координатах ($p - V$, $p - T$, $V - T$).

Литература: [1, п. 1.3]; [2, § 41].

5. Изотермический процесс. Уравнения, его описывающие, и графики процесса в различных координатах ($p - V$, $p - T$, $V - T$).

Литература: [1, п. 1.3]; [2, § 41].

6. Изобарный процесс. Уравнения, его описывающие, и графики процесса в различных координатах ($p - V$, $p - T$, $V - T$).

Литература: [1, п. 1.3]; [2, § 41] .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 2. Молекулярная физика и термодинамика: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 278 с.

2. **Трофимова Т.И.** Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Академия, 2005. – 542 с.

3. **Савельев, И.В.** Курс общей физики. В 3 тт. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. 12-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2016. – 436 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71760>

4. **Курепин В.В., Баранов И.В.** Обработка экспериментальных данных: Учеб.-метод. пособие – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ, ИЗОХОРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ВОЗДУХА В ПРОЦЕССЕ АДИАБАТНОГО СЖАТИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

По результатам комбинированного термодинамического процесса, проведенного над газом (воздухом), рассчитать значения изобарной, изохорной теплоемкостей, а также коэффициента Пуассона.

На выполнение работы отводится два учебных часа.

Перечень используемого оборудования и средств измерений

Работа выполняется на универсальном стенде (рис. 1).

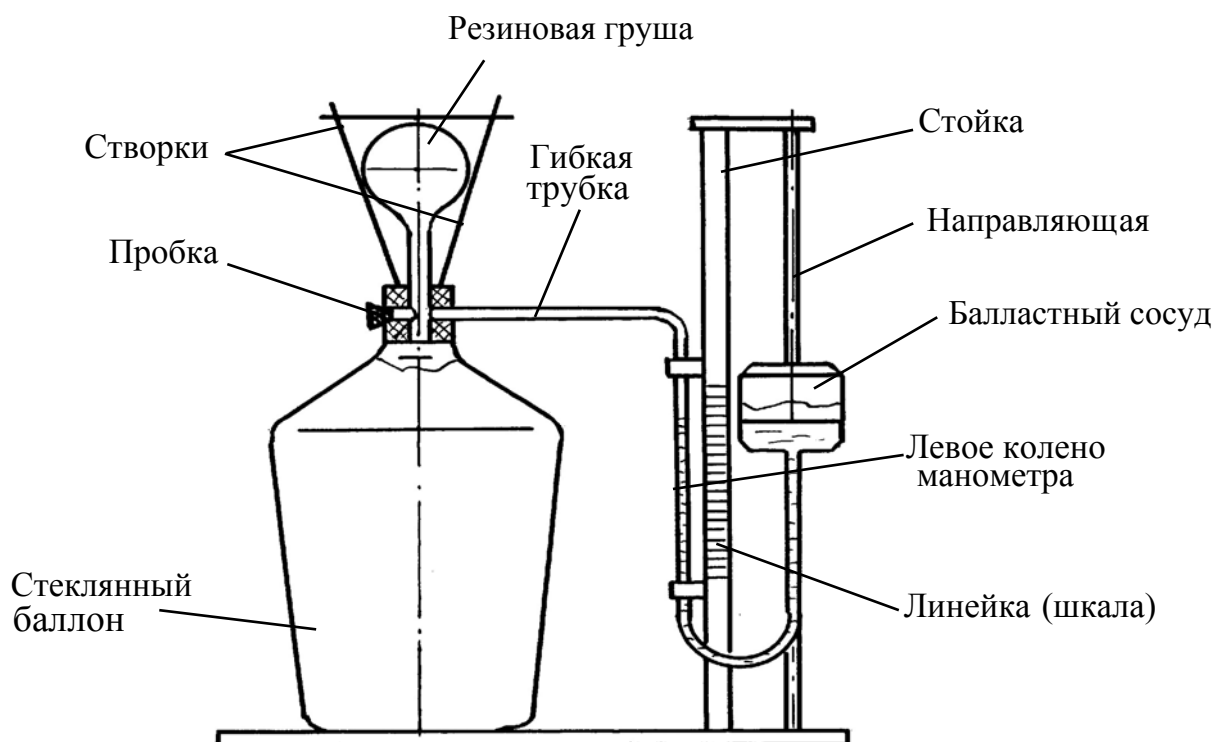


Рис. 1. Универсальный стенд

В работе используются стеклянный баллон с исследуемым газом (воздухом), резиновая груша и водяной дифференциальный манометр, состоящий из стеклянной трубки (левое колено манометра) и балластного сосуда (правое колено манометра). Уровень жидкости в левом колене измеряется линейкой (шкалой). Груша сжимается створками, в горловине стеклянного баллона имеется отверстие, которое закрывается пробкой.

Характеристики средств измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность $\Delta_{и}$
Линейка	300 мм	1 мм/дел.	–	1 мм
Термометр	(0...50) °С	1 °С/дел.	–	1 °С
Барометр	(80...106) кПа	0,1 кПа/дел.	–	0,1 кПа
Секундомер	30 мин	0,01 с	–	0,01 с

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе над газом проводится комбинированный термодинамический процесс, состоящий из последовательно протекающих адиабатного и изохорного процессов.

Диаграмма процессов показана на рис. 2

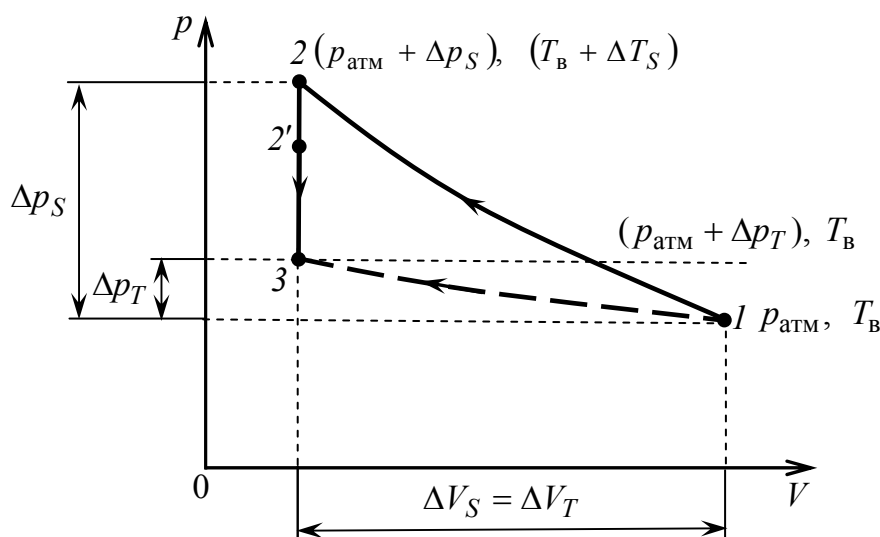


Рис. 2. Диаграмма процессов в эксперименте

Вначале газ с параметрами $p_{\text{атм}}$ и $T_{\text{в}}$ находится в состоянии 1. В результате адиабатного сжатия (процесс 1-2) давление газа в сосуде увеличивается относительно атмосферного давления на величину Δp_S , а температура становится больше температуры внешней среды на величину ΔT_S , следовательно газ переводится в новое состояние 2 с параметрами $(p_{\text{атм}} + \Delta p_S)$, $(T_{\text{в}} + \Delta T_S)$. Затем он изохорно охлаждается до начальной температуры $T_{\text{в}}$ (процесс 2-3). Давление газа при этом становится равным $p_{\text{атм}} + \Delta p_T$. Очевидно, что попасть в состояние 3 можно было и непосредственно из состояния 1 в результате изотермического процесса 1-3. Важно подчеркнуть, что изменения объемов в адиабатном процессе 1-2 ΔV_S и в изотермическом процессе 1-3 ΔV_T равны по величине

$$\Delta V_S = \Delta V_T.$$

Последнее обстоятельство использовано при выводе расчетных соотношений.

В прил. 1* к данной работе приведен подробный вывод расчетных формул для удельных теплоемкостей $c_{v \text{ уд}}$ и $c_{p \text{ уд}}$:

$$c_{v \text{ уд}} = \frac{R}{\mu} \frac{\Delta p_T}{\Delta p_S - \Delta p_T}. \quad (1)$$

$$c_{p \text{ уд}} = \frac{R}{\mu} \frac{\Delta p_S}{\Delta p_S - \Delta p_T}. \quad (2)$$

Из двух последних равенств легко находится коэффициент Пуассона

$$\gamma = \frac{\Delta p_S}{\Delta p_T}. \quad (3)$$

Так как изменение давления Δp рассчитывается по формуле

$$\Delta p = \rho_{\text{в}} g \Delta h,$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, то из формул (1) – (3) получим

$$c_{v\text{уд}} = \frac{R}{\mu} \frac{\Delta h_T}{\Delta h_S - \Delta h_T}, \quad (4)$$

$$c_{p\text{уд}} = \frac{R}{\mu} \frac{\Delta h_S}{\Delta h_S - \Delta h_T}, \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{\Delta h_S}{\Delta h_T}. \quad (6)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Выполнение измерений

1. Стекланный баллон с исследуемым газом (воздухом) соединить гибкой трубкой со стеклянной трубкой левого колена манометра (см. рис. 1).

2. Открыть отверстие в горловине стекланныго баллона, вынув пробку, и раскрыть сжимающие грушу створки.

3. Перемещая балластный сосуд манометра по направляющей, установить уровень жидкости в левом колене манометра на отметку $h_0 = 200$ мм (синяя метка шкалы).

4. Плотно закрыть пробкой отверстие в горловине стекланныго баллона. Давление в баллоне при этом будет равно атмосферному $p_{\text{атм}}$, а температура – внешней температуре $T_{\text{в}}$ (температура в лаборатории).

5. Быстро двумя руками сжать створками грушу до щелчка фиксатора и одновременно включить секундомер.

Из-за инерционности процесса уровень жидкости в левом колене будет продолжать опускаться и после того, как груша будет сжата. Характер изменения уровня жидкости в левом колене манометра показан на рис. 3 (сплошная линия).

Через каждые 5 с после сжатия груши и включения секундомера измерять уровень h_S жидкости в левом колене манометра. Измерения нужно проводить вдвоем: один следит за текущим временем по секундомеру и, не останавливая его, подает сигналы через каждые 5 с, а второй в заданные моменты времени измеряет уровень жидкости в левом колене манометра и записывает результаты измерений в соот-

ветствующие столбцы табл. 2. Измерения проводить в течение 70 с. В конце этого интервала измеряемая величина h_S начнет повторяться и ее следует принять за стационарное значение h_T . Если за 60...70 с стабилизация не наступает, следует обратиться к преподавателю.

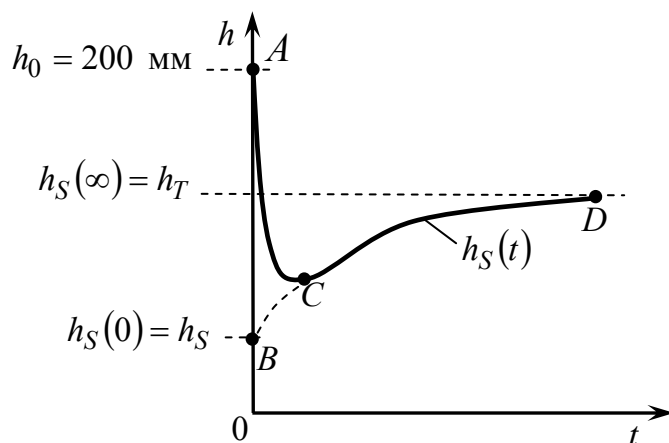


Рис. 3. Изменение уровня жидкости в левом колене манометра

6. Вынуть пробку, открыть створки и подождать 2...3 мин до начала следующего опыта, чтобы температура газа в баллоне выровнялась с температурой среды.

7. Указанные в пп. 4 – 6 операции повторить еще два раза.

8. По окончании работы обязательно раскрыть створки, сжимающие грушу.

Таблица 2

$t, \text{ с}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$h_S, \text{ мм}$	200														
	200														
	200														
$\bar{h}_S, \text{ мм}$															
$\Delta \bar{h}, \text{ мм}$															
$\ln(\Delta \bar{h})$															
$h_T = \dots$															

Внимание! Результаты измерений нужно подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

Обработка результатов измерений

1. По результатам трех опытов определить для каждого момента времени среднее значение уровня $\bar{h}_S(t)$, в том числе и $h_T = \bar{h}_S(\infty)$; результаты расчета записать в табл. 2.

2. Рассчитать для каждого момента времени изменение высоты столба жидкости в левом колене манометра

$$\Delta \bar{h} = h_T - \bar{h}_S(t)$$

и его натуральный логарифм $\ln(\Delta \bar{h})$. Результаты расчетов занести в соответствующие строки табл. 2.

3. Построить график зависимости $\ln(\Delta \bar{h}) = f(t)$.

Примерный вид графика показан на рис. 4.

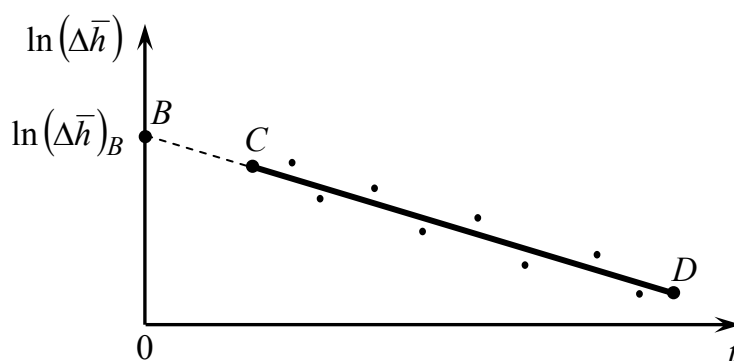


Рис. 4. График зависимости $\ln(\Delta \bar{h})$ от времени

График представляет собой прямую линию (см. прил. 2*), которую следует экстраполировать (продолжить) до оси ординат ($t = 0$). Пересечение графика с осью ординат позволит найти в точке B значение $K = \ln(\Delta \bar{h})_B$

$$K = \ln [h_T - \bar{h}_S(0)] = \ln (h_T - h_S),$$

по которому вычислить искомое значение

$$h_S = h_S(0) = h_T - e^K, \tag{7}$$

где e – основание натурального логарифма, $e \approx 2,72$.

4. Рассчитать значение величин Δh_S и Δh_T

$$\Delta h_S = h_0 - h_S, \quad \Delta h_T = h_0 - h_T,$$

по полученным данным рассчитать удельные теплоемкости $c_{v\text{уд}}$, $c_{p\text{уд}}$ и коэффициент Пуассона γ с помощью формул (4) – (6).

Результатом работы являются:

1. График функции $\ln(\Delta\bar{h}) = f(t)$ на миллиметровой бумаге с указанием точки B .
2. Значение K .
3. Значение h_S , Δh_S , Δh_T .
4. Значения удельных теплоемкостей $c_{v\text{уд}}$, $c_{p\text{уд}}$ и коэффициента Пуассона γ .

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные таблицы 1, 2.
2. Рисунки 1, 3.
3. График функции $\ln(\Delta\bar{h}) = f(t)$ на миллиметровой бумаге с указанием точки B .
4. Расчет h_S по формуле (7), а также Δh_S , Δh_T .
5. Расчеты удельных теплоемкостей $c_{v\text{уд}}$, $c_{p\text{уд}}$ и коэффициента Пуассона γ с помощью формул (4) – (6).
6. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку. Он должен содержать результаты измерений, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие теплоты и работы. Сходство и различие между ними.
Литература: [1, п. 2.2]; [2, § 51, 52].
2. Внутренняя энергия системы, ее составляющие. Внутренняя энергия идеального газа.

Литература: [1, п. 2.1]; [2, § 50] .

3. Первое начало термодинамики. Дифференциальная и интегральная формы записи первого начала.

Литература: [1, п. 2.3]; [2, § 51].

4. Энтальпия системы.

Литература: [1, п. 6.1]; [2, § 63].

5. Теорема Больцмана о равнораспределении энергии по степеням свободы. Степени свободы движения молекулы. Средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул. Внутренняя энергия идеального газа.

Литература: [1, п. 1.8]; [2, § 50] .

6. Определение теплоемкости вещества. Удельная и молярная теплоемкости, связь между ними.

Литература: [1, п. 2.4]; [2, § 53].

7. Зависимость теплоемкости от характера процесса. Изохорная и изобарная теплоемкости.

Литература: [1, п. 2.5]; [2, § 53].

8. Адиабатный процесс. Уравнения, описывающие его. Коэффициент Пуассона, его значения для одноатомных, двухатомных и многоатомных газов.

Литература: [1, п. 2.6]; [2, § 55].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 2. Молекулярная физика и термодинамика: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 278 с.

2. **Трофимова Т.И.** Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Академия, 2005. – 542 с.

3. **Савельев, И.В.** Курс общей физики. В 3 тт. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. 12-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2016. – 436 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71760>

4. **Курепин В.В., Баранов И.В.** Обработка экспериментальных данных: Учеб.-метод. пособие – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.

Приложение 1*

ВЫВОД РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ ДЛЯ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ $c_{v \text{ уд}}$ И $c_{p \text{ уд}}$

Для обоснования формул (1) – (3) воспользуемся известными уравнениями для внутренней энергии $U(S, V)$, энтальпии $H(S, p)$

$$dU = TdS - pdV, \quad TdS = \delta Q, \quad (1^*)$$

$$dH = TdS + Vdp, \quad TdS = \delta Q, \quad (2^*)$$

а также уравнением состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{\mu} RT. \quad (3^*)$$

Из уравнений (1*), (2*) следует, что

$$C_v = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V, \quad C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p. \quad (4^*)$$

При этом учтем, что у идеальных газов (воздух при нормальных условиях обладает свойствами идеального газа) внутренняя энергия и энтальпия являются функциями только температуры:

$$U(T) = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT, \quad H(T) = \frac{i+2}{2} \frac{m}{\mu} RT, \quad (5^*)$$

поэтому соотношения (4*) упрощаются (становятся полными производными)

$$C_v = \frac{dU}{dT}, \quad C_p = \frac{dH}{dT}. \quad (6^*)$$

Это означает, что в адиабатном процессе ($S = \text{const}$) из уравнений (1*), (2*) при их дифференцировании по температуре получаем важные исходные выражения для C_v и C_p :

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_S = \frac{dU}{dT} = -p \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_S; \quad (7^*)$$

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_S = \frac{dH}{dT} = V \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_S. \quad (8^*)$$

Получим аналогичные соотношения для произвольных процессов идеального газа. С этой целью обратимся к уравнению состояния идеального газа (3*) и продифференцируем поочередно по объему и давлению. Имеем

$$\frac{d}{dV}(pV) = p + V \frac{dp}{dV} = \frac{m}{\mu} R \frac{dT}{dV}, \quad (9^*)$$

$$\frac{d}{dp}(pV) = V + p \frac{dV}{dp} = \frac{m}{\mu} R \frac{dT}{dp}. \quad (10^*)$$

В случае изотермического процесса ($dT = 0$) правые части в (9*) и (10*) равны нулю и соотношения (9*) и (10*) приобретают вид:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T = -\frac{p}{V}; \quad \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T = -\frac{V}{p}. \quad (11^*)$$

А в случае адиабатного процесса ($dS = 0$) они приобретают вид:

$$p + V \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_S = \frac{m}{\mu} R \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S, \quad (12^*)$$

$$V + p \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_S = \frac{m}{\mu} R \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S. \quad (13^*)$$

Соотношения (7*), (8*) и (11*) – (13*) содержат всю необходимую первичную информацию для обоснования расчетных формул (1) – (3).

Для изохорной теплоемкости из соотношений (7*), (11*) и (12*) получаем выражение:

$$C_v = -p \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_S = \frac{m}{\mu} R \frac{1}{1 + \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_S \frac{V}{p}} = \frac{m}{\mu} R \frac{1}{1 - \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_S \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T}. \quad (14^*)$$

В свою очередь, для изобарной теплоемкости из соотношений (8*) и (11*) и (13*) получается формула:

$$C_p = V \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_S = \frac{m}{\mu} R \frac{1}{1 + \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_S \frac{p}{V}} = \frac{m}{\mu} R \frac{1}{1 - \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_S \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T}. \quad (15^*)$$

Так как в лабораторной работе адиабатный и изотермический процессы осуществляются при малых изменениях объема V , давления p и температуры T , т. е. в условиях

$$\left| \frac{\Delta V}{V} \right| < 0,01; \quad \left| \frac{\Delta p}{p} \right| < 0,01; \quad \text{и} \quad \left| \frac{\Delta T}{T} \right| < 0,01, \quad (16^*)$$

причем в обоих процессах изменение объема ΔV остается одинаковым ($\Delta V_S = \Delta V_T$), выражения (14*), (15*) приобретают рабочую форму ($c_{v \text{ уд}} = C_v/m$; $c_{p \text{ уд}} = C_p/m$):

$$c_{v \text{ уд}} = \frac{R}{\mu} \frac{\Delta p_T}{\Delta p_S - \Delta p_T} = \frac{R}{\mu} \frac{\Delta h_T}{\Delta h_S - \Delta h_T}, \quad (17^*)$$

$$c_{p \text{ уд}} = \frac{R}{\mu} \frac{\Delta p_S}{\Delta p_S - \Delta p_T} = \frac{R}{\mu} \frac{\Delta h_S}{\Delta h_S - \Delta h_T}. \quad (18^*)$$

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ НАЧАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В АДИАБАТНОМ ПРОЦЕССЕ

Процесс сжатия груши является кратковременным ($\Delta t < 1$ с), поэтому может считаться адиабатным, так как за это время сжимаемый в стеклянном баллоне воздух не успевает обменяться теплотой с его стенками. При быстром (практически мгновенном) адиабатном сжатии воздух успевает повысить свою температуру на величину ΔT_S , а давление – на Δp_S (рис. 2), что соответствует точке с координатами $h = h_S$ и $t = 0$ на графике (рис. 3). Однако в этой точке (рис. 3) воздух внутри баллона оказывается перегретым относительно стенок баллона (и окружающей среды), поэтому внутри баллона возникает изохорный процесс охлаждения воздуха. Этот процесс протекает относительно медленно (минуты) и завершается, когда воздух снизит свою температуру на ΔT_S и снова приобретет температуру стенок баллона (т. е. внешней среды), но при этом сохранит избыточное давление Δp_T (рис. 2), или уровень h_T на рис. 3, соответствующий изотермическому сжатию воздуха на ΔV (объем воздуха, содержащийся в груше до ее сжатия).

Нестационарный теплообмен между воздухом и стенками баллона является инерционным, поэтому процесс изохорного охлаждения воздуха оказывается растянутым во времени и, как всякие инерционные процессы, происходит по экспоненциальному закону.

К сожалению, кривая $ABCD$ на рис. 3 является идеализированной. В лабораторной работе для регистрации давления воздуха в баллоне используется водяной U -образный дифференциальный манометр, а находящаяся в нем вода, обладая значительной массой (в сравнении с массой воздуха в баллоне), в нестационарных условиях проявляет механическую инерционность. Поэтому на адиабатном участке опыта показания манометра заметно отстают от быстро меняющегося давления воздуха в баллоне. И только на участке CD проявлением механической инерционности манометра удастся пренебречь.

По физическим соображениям основной причиной того, что на участке CD идет процесс изменения избыточной температуры $\Delta T(t) = T(t) - T_B$, избыточного давления $\Delta p(t) = \Delta p_S(t) - \Delta p_T$ и, соот-

ветственно, высоты столба жидкости в левом колене манометра $\Delta h(t) = h_T - h_S(t)$, является тепловая инерционность воздуха в баллоне. Такие процессы всегда носят экспоненциальный характер и описываются функцией вида

$$\Delta h(t) = (h_T - h_S) e^{-t/\tau}, \quad (19^*)$$

где τ – показатель тепловой инерционности системы «воздух – баллон».

Из уравнения (19*) имеем

$$\ln[\Delta h(t)] = \ln(h_T - h_S) - \frac{1}{\tau} t. \quad (20^*)$$

Эта линейная зависимость от времени показана на графике (рис. 1*).

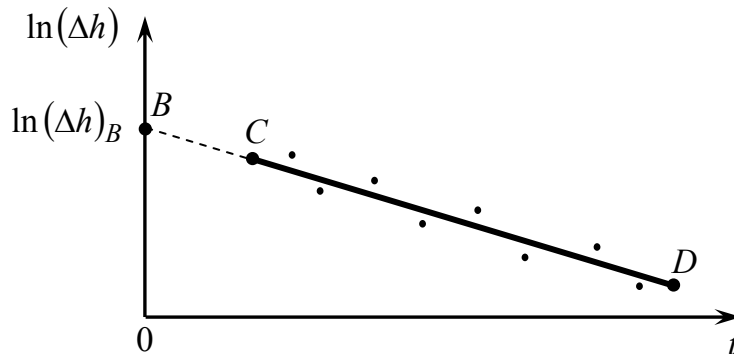


Рис. 1*. Зависимость $\ln(\Delta h)$ от времени

Пересечение графика с осью ординат ($t = 0$) позволит найти в точке B значение $K = \ln(\Delta h)_B$

$$K = \ln(h_T - h_S(0)) = \ln(h_T - h_S),$$

и с помощью него вычислить изменение давления ($\Delta p_S - \Delta p_T$) в момент окончания адиабатного сжатия газа.

Инерционность – это фундаментальное свойство материи, всех происходящих в ней нестационарных процессов. Ее частными проявлениями являются механическая и тепловая инерционности. Первая связана с массой тел, а вторая – с их теплоемкостью.

Если любая система выводится принудительно из состояния термодинамического равновесия со стационарной внешней средой, то она возвращается к нему по экспоненциальному закону:

$$y(t) = y_0 e^{-t/\tau},$$

где y_0 , $y(t)$ – параметры системы в начальный и произвольный моменты времени; τ – показатель инерционности системы.

В лабораторной работе мы встречаемся с тремя инерционными процессами:

1. Механическая инерционность воздуха в баллоне с грушей. Ввиду малой массы воздуха в баллоне она пренебрежимо мала ($\tau \ll 1$ с).

2. Тепловая инерционность воздуха в баллоне – основная составляющая ($\tau \approx 1$ мин).

3. Механическая инерционность водяного дифманометра составляет $\tau \approx 10$ с, она через 20...30 с исчезает, а остается только тепловая инерционность.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА И ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА ЕГО МОЛЕКУЛЫ ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Измерить вязкость воздуха «методом капилляра».
 2. Рассчитать эффективный диаметр молекулы воздуха.
- На выполнение работы отводится два учебных часа.

Перечень используемого оборудования и средств измерений

Работа выполняется на универсальном стенде (рис. 1).

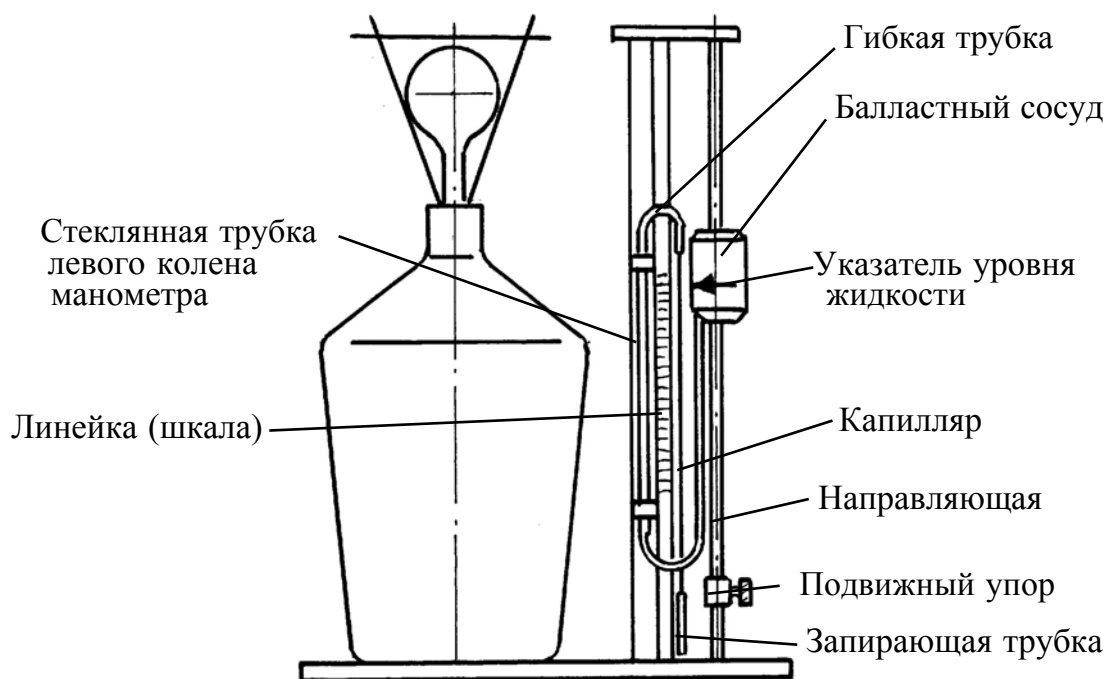


Рис. 1. Универсальный стенд

Капилляр (тонкая металлическая трубка внутренним диаметром 0,30 мм и длиной 500 мм) соединяется с левым коленом водяного манометра, выполненным в виде стеклянной трубки, которая гибкой трубкой соединяется с балластным сосудом. Балластный сосуд имеет диаметр много больше, чем стеклянная трубка левого колено-

метра, и может перемещаться по вертикальной направляющей. Нижний уровень балластного сосуда задается положением подвижного упора.

Уровень жидкости в стеклянной трубке манометра измеряется по линейке (шкале), время – механическим секундомером.

Характеристики средств измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность $\Delta_{и}$
Линейка	300 мм	1 мм/дел.	–	1 мм
Секундомер	30 мин	0,01 с.	–	0,01 с
Термометр	(0...50) °С	1 °С/дел.	–	1 °С
Барометр	(80...106) кПа	0,1 кПа/дел.	–	0,1 кПа
Капилляр: длина $L = 500$ мм; внутренний диаметр $a = 0,31$ мм				

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Состояние системы называется равновесным, если все ее области имеют одинаковые значения температуры, давления и плотности. У равновесных смесей должны сохраняться одинаковыми еще и концентрации компонентов.

Если система выведена из состояния равновесия, то внутри неё всегда возникают явления, стремящиеся вернуть систему в прежнее или новое состояние равновесия. К таким явлениям относятся диффузия, теплопроводность и внутреннее трение (вязкость).

В основе этих трех физических явлений лежит один и тот же молекулярный механизм – хаотическое движение молекул.

Все три явления переноса (диффузия, теплопроводность и вязкость) имеют много общего. Во всех трех случаях происходит выравнивание параметров вещества (концентрации компонентов, температуры, скорости течения), если они по какой-либо причине оказались различными в разных областях вещества. При этом в случае диффузии возникает направленный перенос частиц вещества различных компонентов смеси, в случае теплопроводности – направленный перенос внутренней энергии, а в случае вязкости – перенос импульса

направленного движения. Поэтому все эти явления объединены одним названием – явления переноса.

Общность физической основы процессов переноса определяет одинаковую структуру эмпирических законов переноса: Фика, Ньютона и Фурье. Коэффициенты диффузии D , вязкости η и теплопроводности λ газов получены в молекулярно-кинетической теории явлений переноса

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle, \quad \eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle \rho, \quad \lambda = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle \rho c_{v \text{ уд}}, \quad (1)$$

где $\langle v \rangle$ – средняя скорость молекул; $\langle l \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул; ρ – плотность газа; $c_{v \text{ уд}}$ – удельная теплоемкость при постоянном объеме.

Сопоставляя между собой выражения для коэффициентов переноса, можно установить связь между ними

$$\eta = D\rho, \quad \lambda = \eta c_{v \text{ уд}}.$$

В данной работе по измеренному коэффициенту вязкости рассчитывают коэффициент диффузии

$$D = \frac{\eta}{\rho}. \quad (2)$$

В случае газа, состоящего из многоатомных молекул, существенный вклад в теплопроводность вносят внутренние степени свободы молекул, учитывающие возможное вращение их частей и относительные колебания атомов внутри молекулы. Поэтому для коэффициента теплопроводности используется формула

$$\lambda = \eta c_{v \text{ уд}} \frac{(9\gamma - 5)}{4}, \quad (3)$$

где γ – коэффициент Пуассона, $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$; $c_{v \text{ уд}}$ – удельная теплоем-

кость при постоянном объеме, $c_{v \text{ уд}} = \frac{iR}{2\mu}$ Дж/(кг·К).

Для воздуха число степеней свободы $i = 5$, молярная масса $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Таким образом, для воздуха имеем

$$\gamma = \frac{i+2}{i} = 1,4, \quad \lambda = \eta c_{v\text{уд}} \frac{(9 \cdot 1,4 - 5)}{4} = 1,9 \eta c_{v\text{уд}}. \quad (4)$$

В качестве примера в прил. 6 табл. П.10 приведены данные по свойствам некоторых газов при нормальных условиях.

Исследования явлений переноса в газах позволяют определить эффективный диаметр $d_{\text{эф}}$ молекул.

Эффективный диаметр молекул – это статистическая величина, которая связана с другими величинами, такими как средняя скорость и средняя длина свободного пробега. Опыт показывает, что подобная связь величин справедлива и для смеси газов, какой является воздух.

Из формулы для средней длины свободного пробега молекулы имеем

$$d_{\text{эф}} = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2\pi n \langle l \rangle}}}, \quad (5)$$

где n – концентрация молекул.

Концентрацию n в формуле (5) выразим через плотность ρ и молярную массу μ воздуха

$$n = \frac{\rho}{m_0} = \frac{\rho N_A}{\mu}, \quad (6)$$

где m_0 – масса одной молекулы; N_A – число Авогадро.

Подставим выражение (6) в формулу (5)

$$d_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{\mu}{\sqrt{2\pi\rho N_A \langle l \rangle}}}. \quad (7)$$

С другой стороны, из формулы (1) для коэффициента вязкости η следует, что

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

где средняя скорость молекул

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

Подставляя выражения (8) и (9) в формулу (7), получаем

$$d_{\text{эф}} = 4 \sqrt{\frac{4\mu RT}{9\pi^3 N_A^2 \eta^2}} \quad (10)$$

Вязкость воздуха η в работе находят “методом капилляра”.

В прил. 1* рассмотрено ламинарное течение газа в капилляре и получена формула для объема газа dV , вытекающего за время $d\tau$ при постоянном перепаде давления на концах капилляра

$$dV = \frac{\pi \Delta p a^4}{8 L \eta} d\tau, \quad (11)$$

где Δp – перепад давления на концах капилляра, a, L – внутренний диаметр и длина капилляра, η – вязкость газа.

В данной лабораторной работе измерение вязкости воздуха проводится на универсальном стенде (рис. 1) при переменном перепаде давления на концах капилляра.

Для пояснения особенностей метода измерения рассмотрим принципиальную схему установки, приведенную на рис. 2.

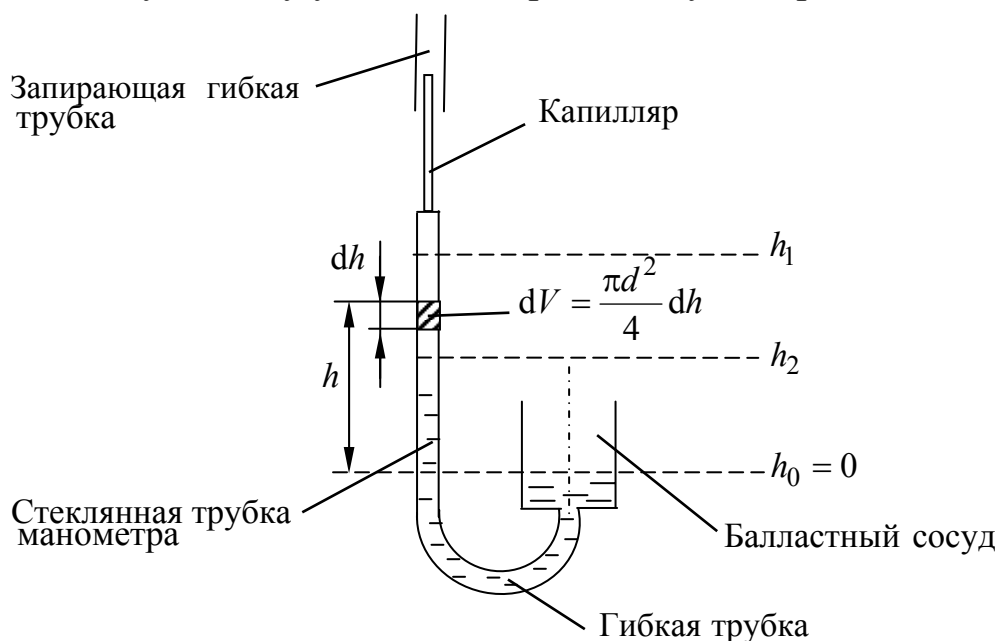


Рис. 2. Схема установки для измерения вязкости

Жидкостный дифференциальный манометр состоит из стеклянной трубки левого колена манометра и правого колена в виде балластного сосуда. Поскольку диаметр балластного сосуда много больше диаметра стеклянной трубки, то перелив жидкости из левого колена в

правое практически не изменяет уровень жидкости в балластном сосуде. Поэтому давление, создаваемое столбом жидкости в левом колене, определяется только высотой столба h относительно постоянного уровня жидкости h_0 в балластном сосуде.

Опыт можно проводить, выдавливая воздух из стеклянной трубки или всасывая его из атмосферы в трубку. Из соображений безопасности был выбран второй вариант, так как в нем исключается попадание жидкости в капилляр.

Перемещая балластный сосуд вверх, устанавливаем уровни жидкости в коленях манометра на уровне h_1 и закрываем конец капилляра.

Затем опускаем балластный сосуд на уровень $h_0 = 0$ и, таким образом, создаем внутри капилляра разрежение

$$p_k = p_{\text{атм}} - \rho_{\text{воды}}g(h_1 - h_0) = p_{\text{атм}} - \rho_{\text{воды}}gh_1,$$

где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление; $\rho_{\text{воды}}$ – плотность воды; g – ускорение свободного падения.

В момент открытия конца капилляра на нем устанавливается перепад давлений

$$\Delta p = p_{\text{атм}} - p_k = \rho_{\text{воды}}gh_1.$$

По мере заполнения стеклянной трубки входящим через капилляр воздухом уровень воды в нем будет плавно опускаться, перепад давлений на капилляре соответственно будет уменьшаться.

Тогда для произвольного момента времени τ , отсчитываемого от момента открытия капилляра, высота столба жидкости в левом колене $h(\tau)$, а соответственно и разность давлений

$$\Delta p = \rho_{\text{воды}}gh \tag{12}$$

будет изменяться во времени.

При этом за время dt высота столба жидкости уменьшится на dh и соответственно объем воздуха в трубке увеличится на величину

$$dV = -\frac{\pi d^2}{4}dh, \tag{13}$$

где d – диаметр стеклянной трубки левого колена манометра. Подставляя в формулу (11) выражения (12) и (13), получим

$$-\frac{\pi d^2}{4} dh = \frac{\pi \rho_{\text{ВОДЫ}} g h a^4}{8L\eta} d\tau,$$

откуда

$$d\tau = -\frac{2Ld^2\eta}{a^4\rho_{\text{ВОДЫ}}g} \frac{dh}{h}. \quad (14)$$

После интегрирования выражения (14) в пределах от 0 до τ и от h_1 до h_2 удастся найти время, за которое высота столба жидкости изменяется от h_1 до h_2

$$\tau = \frac{2Ld^2\eta}{a^4\rho_{\text{ВОДЫ}}g} \ln \frac{h_1}{h_2},$$

откуда искомая расчетная формула для вязкости приобретает вид

$$\eta = \frac{a^4\rho_{\text{ВОДЫ}}g}{2Ld^2} K, \quad \text{где } K = \frac{\tau}{\ln \frac{h_1}{h_2}}. \quad (15)$$

С целью повышения точности измерения вязкости постоянную K в формуле (15) целесообразно получить из графика зависимости $\tau = K \ln \frac{h_{\text{нач}}}{h}$, проводя опыт от начального значения $h_{\text{нач}}$ до нескольких различных значений h .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка стенда к работе

1. Подсоединить с помощью гибкой трубки капилляр к стеклянной трубке левого колена манометра (см. рис. 1).
2. Перемещая балластный сосуд по направляющей, установить уровень жидкости в стеклянной трубке на нуль шкалы $h_0 = 0$.
3. Подвижный упор подвести к балластному сосуду и закрепить его винтом.

4. Поскольку левое и правое колена манометра являются сообщающимися сосудами, то в балластном сосуде уровень жидкости будет также равен $h_0 = 0$. На этот уровень установить указатель уровня жидкости балластного сосуда.

Выполнение измерений

1. Измерить температуру и давление воздуха в лаборатории и записать результаты измерений

$$p_{\text{атм}} = \dots \text{кПа}; \quad t = \dots ^\circ\text{C}; \quad T = 273 + t = \dots \text{К}. \quad (16)$$

2. Перемещая балластный сосуд вверх, совместить указатель уровня жидкости с отметкой шкалы $h_{\text{нач}} = 300$ мм (отсчет ведется по левой стороне линейке с нулем в нижней части) и дождаться, когда на этой отметке установится уровень жидкости в стеклянной трубке (см. рис. 3, а).

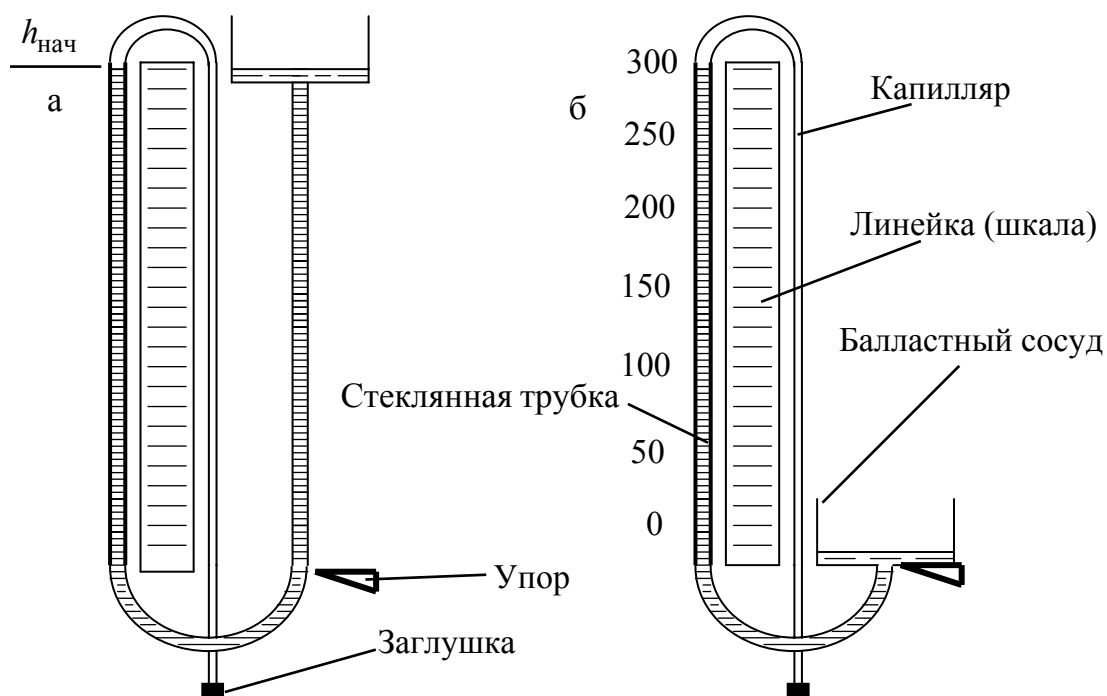


Рис. 3. Этапы проведения опыта:

- а – установка начального уровня жидкости в стеклянной трубке;
 б – создание начального разрежения в капилляре

3. Зажать пальцами резиновую трубку на конце капилляра и опустить балластный сосуд до подвижного упора (см. рис. 3, б). При

этом в капилляре задается начальное разрежение, соответствующее столбу воды $h_{\text{нач}} = 300$ мм.

4. Разжать резиновую трубку и одновременно включить секундомер. Когда уровень воды в стеклянной трубке достигнет отметки $h_1 = 150$ мм, выключить секундомер и результат измерения занести в табл. 2.

Таблица 2

h , мм	150	125	100	75	50
τ , с					
$\ln(h_{\text{нач}}/h)$	0,693	0,876	1,10	1,39	1,79

5. Повторить пп. 2 – 4 последовательно для всех h , указанных в табл. 2.

Внимание! Результаты измерений нужно подписать у преподавателя, ведущего занятие в лаборатории.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать плотность воздуха по формуле

$$\rho = \frac{p_{\text{атм}}\mu}{RT},$$

где $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; давление $p_{\text{атм}}$ и температуру T взять из экспериментальных данных (16).

2. Построить график зависимости $\tau = f\left(\ln \frac{h_{\text{нач}}}{h}\right)$. Примерный вид графика показан на рис. 4.

3. С помощью графика $\tau = f\left(\ln \frac{h_{\text{нач}}}{h}\right)$ рассчитать значение постоянной K по следующей формуле

$$K = \frac{\Delta\tau}{\Delta[\ln(h_{\text{нач}}/h)]}. \quad (17)$$

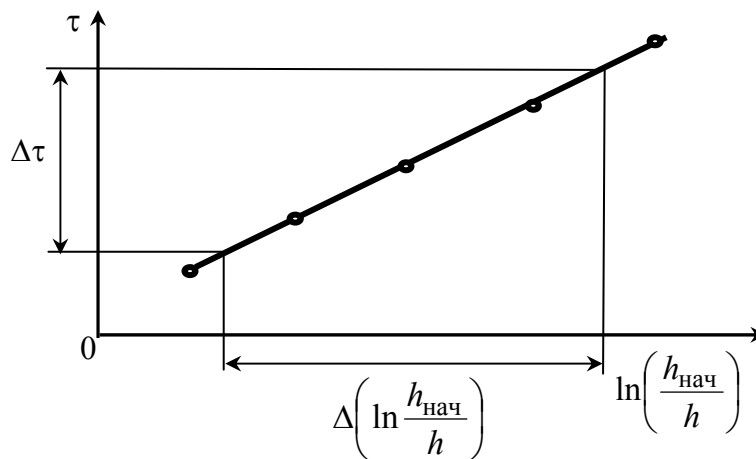


Рис. 4. График зависимости $\tau = f\left(\ln \frac{h_{\text{нач}}}{h}\right)$

4. Используя формулы (17), (15), (2), (4), (10), рассчитать коэффициенты вязкости, диффузии, теплопроводности воздуха и эффективный диаметр его молекулы.

Результатом работы являются:

1. График зависимости $\tau = f\left(\ln \frac{h_{\text{нач}}}{h}\right)$ на миллиметровой бумаге.
2. Значение плотности воздуха.
3. Значение вязкости воздуха.
4. Значение коэффициента диффузии воздуха.
5. Значение теплопроводности воздуха.
6. Значение эффективного диаметра молекул воздуха.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные таблицы 1, 2.
2. Расчет плотности воздуха.
3. График зависимости $\tau = f\left(\ln \frac{h_{\text{нач}}}{h}\right)$ на миллиметровой бумаге.
4. Расчет коэффициента K с помощью графика.

5. Расчеты значений физических величин по формулам (15), (2), (4), (10).

6. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку. Он должен содержать результаты измерений, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Явления переноса. Условия возникновения явлений переноса.

Литература: [1, п. 4.1]; [2, § 48].

2. Расчетные соотношения для коэффициентов переноса и средней длины свободного пробега в газах.

Литература: [1, п. 4.3, 3.6]; [2, § 48, 46].

3. Диффузия. Закон Фика. Дайте определение коэффициента диффузии и его размерность.

Литература: [1, п. 4.1, 4.2]; [2, § 48].

4. Вязкость. Закон Ньютона. Дайте определение коэффициента вязкости и его размерность.

Литература: [1, п. 4.1, 4.2]; [2, § 48].

5. Теплопроводность. Закон Фурье. Дайте определение коэффициента теплопроводности и его размерность.

Литература: [1, п. 4.1, 4.2]; [2, § 48].

6. Опишите основные отличия рассмотренного метода измерения вязкости воздуха от классического варианта измерений.

7. Что такое плотность потока массы, импульса, теплоты?

Литература: [1, п. 4.1, 4.2]; [2, § 48].

8. Что такое время релаксации?

Литература: [1, п. 4.1, 4.2]; [2, § 48].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 2. Молекулярная физика и термодинамика: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 278 с.
2. **Трофимова Т.И.** Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Академия, 2005. – 542 с.
3. **Савельев, И.В.** Курс общей физики. В 3 тт. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. 12-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2016. – 436 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71760>
4. **Курепин В.В., Баранов И.В.** Обработка экспериментальных данных: Учеб.-метод. пособие – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ГАЗА «МЕТОДОМ КАПИЛЛЯРА»

Рассмотрим течение газа по длинной цилиндрической трубке радиусом a и длиной L , представленной на рис. 1*.

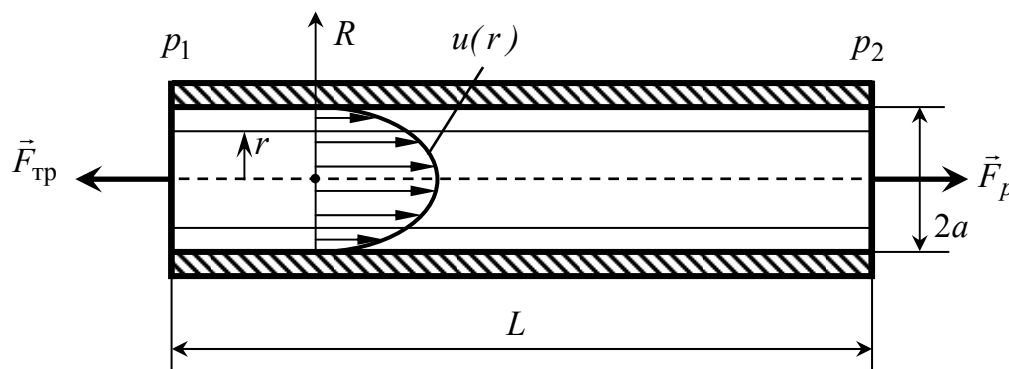


Рис. 1*. Течение газа в цилиндрической трубке

Давления p_1 и p_2 , поддерживаемые на концах трубки, различны, газ течет по трубке под влиянием перепада давлений $\Delta p = |p_2 - p_1|$.

При выводе формулы будем использовать модуль перепада давления $\Delta p = |p_2 - p_1|$, поэтому в окончательной формуле необходимо будет поменять знак, чтобы связать направление скорости течения газа с градиентом давления. Более строгий вывод формулы приводится в литературе [1].

Скорость течения u направлена везде вдоль оси трубки, а значение скорости меняется вдоль радиуса r (отсчитываемого от оси трубки). Сила трения, действующая на некоторую перпендикулярную радиусу трубки, поверхность площадью S , мысленно выделенную в потоке газа (см. рис. 2*), в соответствии с законом Ньютона определяется следующим образом:

$$F_{\text{тр}} = \eta \frac{du}{dr} S,$$

где η – коэффициент трения; $\frac{du}{dr}$ – градиент скорости вдоль радиуса трубки.

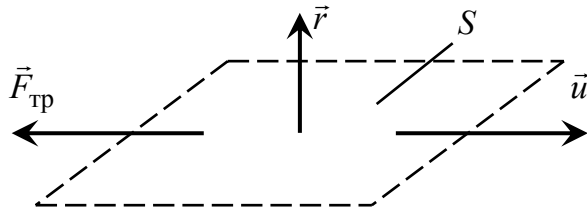


Рис. 2*. Сила действующая на площадку при течение жидкости в трубке

В качестве элементарной поверхности выберем цилиндрическую поверхность некоторого радиуса r , коаксиальную с рассматриваемой трубкой. Площадь этой поверхности $S = 2\pi rL$ (см. рис. 1*). Сила трения, действующая на объем газа, ограниченный выбранной цилиндрической поверхностью, со стороны остального газа, направлена против скорости течения газа

$$F_{\text{тр}} = 2\pi rL\eta \frac{du}{dr}.$$

Сила трения компенсируется силой перепада давления, создающей течение газа по капилляру

$$F_p = \pi r^2 \Delta p.$$

В случае равномерного течения газа

$$\vec{F}_{\text{тр}} + \vec{F}_p = 0. \quad (1^*)$$

Проекция уравнения (1*) на направление скорости течения равна

$$F_p - F_{\text{тр}} = 0.$$

Приравнивая модули сил F_p и $F_{\text{тр}}$, получим дифференциальное уравнение

$$\frac{du}{dr} = \frac{r}{2L\eta} \Delta p,$$

откуда

$$u = -\frac{r^2}{4L\eta} \Delta p + \text{const}.$$

Постоянная интегрирования определяется из очевидного условия равенства нулю скорости течения на границе с внутренней по-

верхностью трубки, т. е. при $r = a$. С учетом граничных условий и заменой знака получаем

$$u(r) = \frac{\Delta p}{4L\eta} (a^2 - r^2), \quad (2^*)$$

т. е. текущий по трубке газ имеет параболический профиль скорости.

Определим количество газа, вытекающего из трубки за время $d\tau$. Выберем в поперечном сечении трубки кольцо радиусом r и шириной dr и, следовательно, имеющее площадь $dS = 2\pi r dr$ (см. рис. 3*).

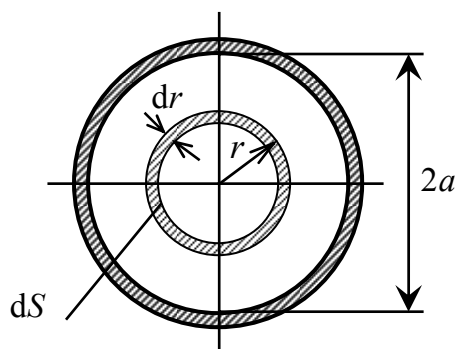


Рис. 3*. Элементарный кольцевой слой газа в трубке

Объем газа, который проходит через выделенное кольцо за время $d\tau$

$$d^2V = u(r)dSd\tau, \quad (3^*)$$

где $u(r)$ – скорость течения газа на расстоянии r от оси трубки. Подставляя выражение (2*) в формулу (3*), находим

$$d^2V = \frac{\Delta p}{4L\eta} (a^2 - r^2) 2\pi r dr d\tau.$$

Интегрируя последнее выражение в пределах от $r = 0$ до $r = a$, найдем объем газа dV , вытекающего из трубки за время $d\tau$

$$dV = \frac{\pi \Delta p}{8 L \eta} a^4 d\tau. \quad (4^*)$$

Традиционно “метод капилляра” реализуется при постоянном перепаде давления на капилляре, и полный объем газа, протекающего через какое-либо поперечное сечение трубки за время τ

$$V_{\Pi} = \frac{\pi \Delta p}{8 L \eta} a^4 \tau.$$

Таким образом, зная размеры капилляра a и L , поддерживая на его концах разность давлений Δp , измеряя в опыте время τ и объем вытесненной за это время жидкости V_{Π} , определяют коэффициент динамической вязкости по формуле

$$\eta = \frac{\pi a^4 \Delta p \tau}{8 L V_{\Pi}}.$$

Однако, в данной лабораторной работе условия проведения опыта отличаются от традиционных и вывод расчетной формулы для этого случая приведен в тексте на с. 31-33 (см. формулы (11) – (15)).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ «МЕТОДОМ ОТРЫВА КОЛЬЦА»

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Измерить коэффициент поверхностного натяжения воды «методом отрыва кольца».

На выполнение работы отводится два учебных часа.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Наличие сил притяжения между молекулами в жидкости приводит к возникновению силы поверхностного натяжения. Сила направлена по касательной к поверхности жидкости, перпендикулярно к участку контура, на который она действует. Величина силы поверхностного натяжения пропорциональна длине контура l

$$F_{\text{пов}} = \alpha l, \quad (1)$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м или Дж/м².

В качестве примера в прил. 7 табл. 1 приведены значения коэффициентов поверхностного натяжения для ряда жидкостей.

Коэффициент поверхностного натяжения в данной работе определяется «методом отрыва кольца». Схема установки представлена на рис. 1.

Кольцо, подвешенное на пружине, нижней кромкой опущено в жидкость, налитую в сосуд. Предполагается, что происходит полное смачивание жидкостью материала кольца.

Если перемещать вверх точку подвеса пружины, то пружина начнет растягиваться, за счет чего возникает сила упругости, действующая на кольцо и направленная вверх. В результате кольцо начнет подниматься, вытягивая за собой смачивающую его жидкость. Поверхность пленки жидкости, прилипшей к кольцу, все больше приближается к вертикальной ориентации, и соответственно растет проекция силы поверхностного натяжения на вертикальную ось x .

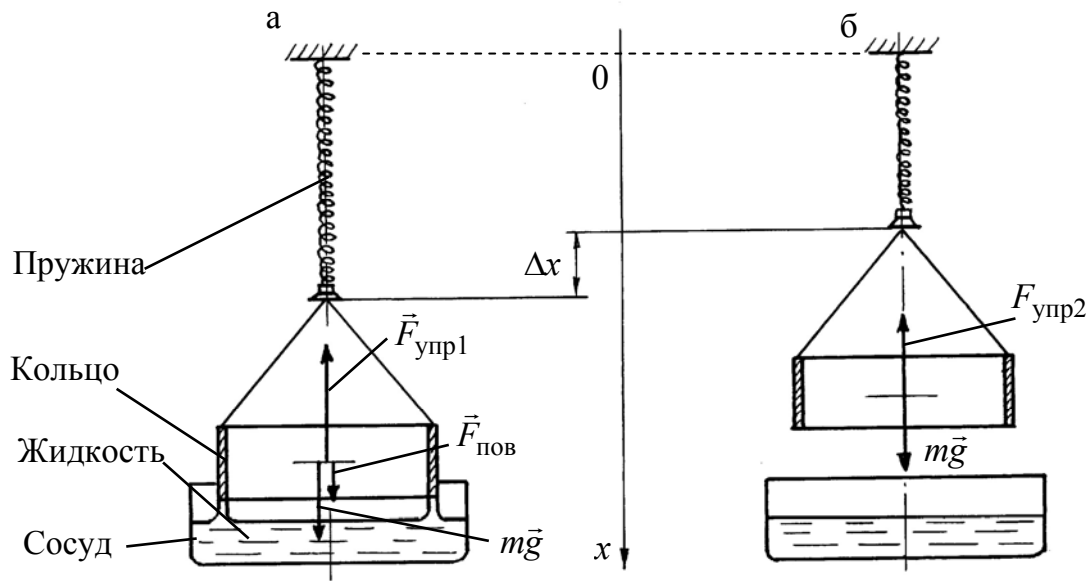


Рис. 1. Особенности стадий проведения опыта:
 а – форма пленки жидкости перед моментом отрыва кольца;
 б – кольцо после отрыва от жидкости

Перед самым отрывом кольца сила поверхностного натяжения достигает наибольшей величины и направлена вертикально вниз. После отрыва кольца от жидкости оно поднимается на величину Δx относительно положения его перед самым отрывом.

В момент отрыва кольца от поверхности жидкости на него действуют три силы: сила упругости $\vec{F}_{\text{упр1}}$, сила тяжести кольца $m\vec{g}$ и сила поверхностного натяжения $\vec{F}_{\text{пов}}$

$$\vec{F}_{\text{упр1}} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{пов}} = 0. \quad (2)$$

После отрыва кольца на него действуют две силы: сила упругости $\vec{F}_{\text{упр2}}$ (эта сила меньше силы $\vec{F}_{\text{упр1}}$, так как пружина сжалась) и сила тяжести $m\vec{g}$

$$\vec{F}_{\text{упр2}} + m\vec{g} = 0. \quad (3)$$

Проекции уравнений (2) и (3) на ось x (на рис. 1 ось x направлена наверху вниз)

$$\begin{aligned} -F_{\text{упр1}} + mg + F_{\text{пов}} &= 0, \\ -F_{\text{упр2}} + mg &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Отсюда можно найти силу поверхностного натяжения

$$F_{\text{пов}} = F_{\text{упр1}} - F_{\text{упр2}} = \Delta F_{\text{упр}} = k\Delta x, \quad (5)$$

где k – коэффициент жесткости пружины, Н/м.

Из формул (1) и (5) получаем искомое выражение для коэффициента поверхностного натяжения в данном методе измерения

$$\alpha = \frac{k\Delta x}{l}, \quad (6)$$

где l – длина линии, вдоль которой происходит отрыв пленки жидкости.

В случае с кольцом отрыв происходит по двум линиям – внутренней и внешней окружностям кольца, имеющим соответственно диаметры D_1 и D_2 . Поэтому для кольца рабочая расчетная формула принимает вид:

$$\alpha = \frac{k\Delta x}{\pi D_1 + \pi D_2} = \frac{k\Delta x}{\pi(D_1 + D_2)}.$$

В лабораторной установке внутри кольца вдоль диаметра дополнительно впаяна пластинка, на которой также происходит отрыв пленки жидкости. Поскольку толщина кольца и пластинки много меньше его диаметра ($D_1 \approx D_2 = D$), то окончательная расчетная формула для коэффициента поверхностного натяжения принимает вид

$$\alpha = \frac{k\Delta x}{2\pi D + 2D} = \frac{k\Delta x}{2D(\pi + 1)}. \quad (7)$$

Перечень используемого оборудования и средств измерений

Работа выполняется на универсальном стенде. Используемые в работе элементы стенда показаны на рис. 2.

На двух стойках 1, закрепленных на основании 2, смонтирована подвижная рамка 3 со стеклянной трубкой, внутри которой подвешена пружина 4. На трубке установлена шкала 5 для измерения удлинения пружины. К нижнему концу пружины через тонкий стержень на трех нитях крепится кольцо 6, которое при измерениях погружается в исследуемую жидкость, находящуюся в сосуде 7.

Грубые перемещения рамки 3 вдоль направляющих 1 осуществляются перестановкой опорной втулки 8 со стопорным винтом, а точные – путем вращения гайки 9 на опорной втулке 8. На нижней поперечине рамки 3 установлена резьбовая втулка 10, на которую навинчены четыре груза 11, используемые для определения коэффициента упругости пружины k (так называемой градуировки пружины). На основании 2 имеются три регулировочных винта 12, для центрирования вертикального стержня с кольцом внутри резьбовой втулки 10.

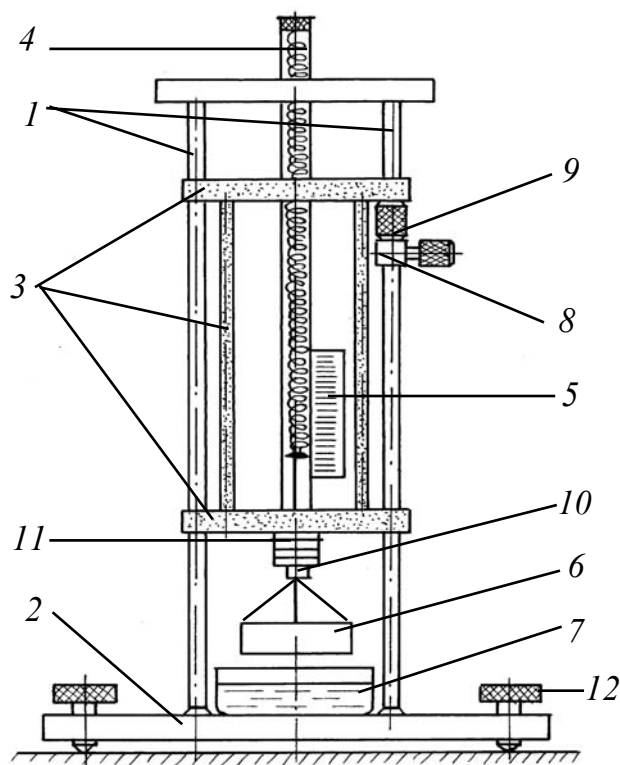


Рис. 2. Установка для измерения поверхностного натяжения:
 1 – стойки; 2 – основание; 3 – подвижная рамка; 4 – пружина; 5 – шкала;
 6 – кольцо; 7 – сосуд; 8 – опорная втулка; 9 – гайка; 10 – резьбовая втулка;
 11 – грузы; 12 – винты регулировочные.

Измерение удлинения пружины производится по шкале 5. Грузы, применяемые для градуировки пружины, могут различаться массами на разных установках. Поэтому значения масс грузов указаны на самих установках.

Характеристики средств измерения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность $\Delta_{и}$
Шкала	100 мм	1 мм/дел.	–	0,5 мм
Груз для градуировки	$m_0 = \dots$ г	–	–	0,1 г

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Лабораторная работа состоит из двух частей: в первой части производится градуировка пружины, а во второй – измеряется коэффициент поверхностного натяжения воды.

Подготовка стенда к работе

Вращая регулировочные винты *12*, следует добиться такого положения стенда, при котором тонкий стержень, закрепленный на нижнем конце пружины, будет располагаться в центре проходного отверстия резьбовой втулки *10*. При правильной установке пружина должна свободно (без трения) перемещаться внутри стеклянной трубки, а кольцо – совершать слабо затухающие колебания.

Часть 1. Градуировка пружины.

1. Навинтить гайку *9* на опорную втулку *8* и, ослабив стопорный винт, переместить опорную втулку *8* вместе с рамкой *3* в верхнее положение и завинтить стопорный винт.

2. Грузы *11* навинтить на втулку *10*.

3. Убрать из-под кольца сосуд с жидкостью.

4. Переместить шкалу *5* так, чтобы указатель пружины оказался в пределах 10 ... 20 мм шкалы; измерить координату $x_0^Г$ указателя пружины; результат измерения записать во второй столбец табл. 2.

5. Свинтить с резьбовой втулки *10* один груз *11* и опустить его на кольцо; по шкале *5* измерить координату $x_1^Г$ и записать в табл. 2.

6. Затем повторить измерения с двумя, тремя и четырьмя грузами на кольце, результаты занести в табл. 2.

7. Грузы снять с кольца и навинтить на втулку *10*.

Таблица 2

Величина	Количество грузов на кольцо, n				
	0	1	2	3	4
$F_{\text{упр}}$, мН					
x_i^{Γ} , мм					

Часть 2. Измерение коэффициента поверхностного натяжения воды.

1. Ослабить стопорный винт опорной втулки 8 и рукой переместить рамку 3 вниз до упора. Совместить центры сосуда 7 и кольца 6.

2. Нажимая на кольцо рукой, сцепить его с поверхностью жидкости.

3. Перемещая шкалу 5, совместить указатель положения пружины с делением шкалы 80 мм.

4. Вращением гайки 9 медленно поднимать рамку и при этом одновременно следить за указателем положения пружины. В момент отрыва кольца измерить по шкале 5 координату начального положения указателя пружины $x_{1Н}$, а затем после прекращения колебаний, измерить координату конечного положения указателя пружины $x_{1К}$. Результаты измерений занести во второй столбец табл. 3.

5. Гайку 9 навинтить на опорную втулку 8.

6. Операции, указанные в п.п. 3 ... 5, повторить 4 раза. Результаты измерений занести в последующие столбцы табл. 3.

Таблица 3

Отчет по шкале	Номера опытов				
	1	2	3	4	5
$x_{iН}$ мм					
$x_{iК}$ мм					
Δx_i мм					

Внимание! Результаты измерений (табл. 2 и 3) нужно подписать у преподавателя, ведущего занятие.

Обработка результатов измерений

Часть 1. Обработка данных табл. 2.

1. Используя значение массы груза m_0 (указано непосредственно на стенде), рассчитать и занести во вторую строку табл. 2 значения сил упругости

$$F_{\text{упр}} = n m_0 g ,$$

где n – число грузов, помещенных на кольцо.

2. По данным табл. 2 построить график зависимости $F_{\text{упр}} = f(x^\Gamma)$. Примерный вид графика показан на рис. 3. В соответствии с законом Гука он представляет собой прямую линию.

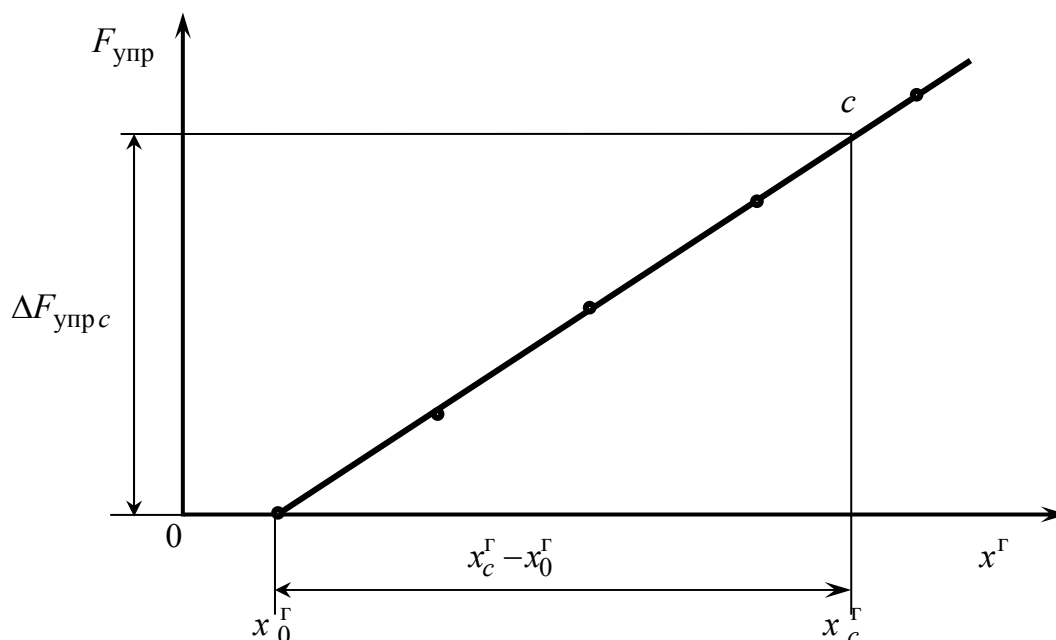


Рис. 3. График зависимости силы упругости от удлинения

3. Выбрать на прямой в конце диапазона измерения x^Γ точку c , определить с учетом масштаба шкал значения величин x_0^Γ , x_c^Γ , $\Delta F_{\text{упр}c}$ и рассчитать по ним коэффициент жесткости пружины

$$k = \frac{\Delta F_{\text{упр}c}}{x_c^\Gamma - x_0^\Gamma}. \quad (8)$$

Часть 2. Обработка данных табл. 3.

1. По измеренным в опытах координатам начального $x_{iН}$ и конечного $x_{iК}$ положения указателя пружины вычислить удлинения пружины

$$\Delta x_i = x_{iН} - x_{iК} \quad (9)$$

и записать их в пятую строку табл. 3.

2. Рассчитать среднее значение удлинения

$$\bar{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum \Delta x_i = \frac{1}{5} (\Delta x_1 + \dots + \Delta x_5). \quad (10)$$

3. По формуле (7) рассчитать коэффициент поверхностного натяжения для $\Delta x = \bar{\Delta x}$.

Результатом работы являются:

1. График функции $F_{\text{упр}} = f(x^\Gamma)$ на миллиметровой бумаге с построением точки c .
2. Значение коэффициента жесткости пружины.
3. Значение коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Заполненные таблицы 2 и 3.
2. Расчет сил упругости.
3. График функции $F_{\text{упр}} = f(x^\Gamma)$ на миллиметровой бумаге с построением точки c .
4. Расчет коэффициента жесткости k по формуле (8).
5. Расчет среднее значение удлинения пружины.
6. Расчет коэффициента поверхностного натяжения жидкости по формуле (7).
7. Результат работы.

Отчет по лабораторной работе оформляется на двойном листе (или, при необходимости, нескольких листах) из тетради в клетку. Он

должен содержать результаты измерений, подписанные преподавателем, проводившим занятие в лаборатории.

Рекомендуемое расположение материалов в отчете смотрите в прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поверхностный слой жидкости и силы, действующие в нем; возникновение сил поверхностного натяжения.

Литература: [1, п. 8.5, 8.6]; [2, § 66, 67].

2. Каков физический смысл коэффициента поверхностного натяжения и в каких единицах он измеряется? От каких факторов зависит коэффициент поверхностного натяжения?

Литература: [1, п. 8.5, 8.6]; [2, § 66, 67].

3. Выведите рабочую формулу для определения коэффициента поверхностного натяжения α , если рамка имеет поперечное сечение вида \triangle , \square , \boxtimes , \boxplus со стороной, равной a .

4. Как проводится градуировка пружины?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Платунов Е.С.** Физика. Т. 2. Молекулярная физика и термодинамика: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 278 с.

2. **Трофимова Т.И.** Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Академия, 2005. – 542 с.

3. **Савельев, И.В.** Курс общей физики. В 3 тт. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. 12-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2016. – 436 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71760>

4. **Курепин В.В., Баранов И.В.** Обработка экспериментальных данных: Учеб.-метод. пособие – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012.

ОФОРМЛЕНИЕ ПРОТОКОЛА И ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Протокол проведения лабораторной работы оформляется на двойном листе из тетради в клетку.

1-я страница

РАБОЧИЙ ПРОТОКОЛ И ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № (название работы) Номер варианта задания Группа Студент Фамилия И.О. Преподаватель Фамилия И.О

2-я и 3-я страницы

Цель работы:	Таблицы с экспериментальными данными
Рисунок:	
Расчетные формулы:	
	Расчеты (начало):

4-я страница

Расчеты (продолжение): Результаты работы:
--

ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ

Графики необходимы для наглядного представления экспериментальных и расчетных данных.

Графики должны легко читаться и быть понятными. Заголовки, поясняющие надписи, числовые значения рекомендуется выполнять шрифтом высотой не менее 4 мм. Графики выполняют карандашом на бумаге с координатной миллиметровой сеткой (миллиметровая бумага) форматом не менее чем А5. Готовые графики вкладываются в отчет по лабораторной работе.

Координатная сетка

В простейшей двумерной прямоугольной системе координат независимую переменную (аргумент функции) принято откладывать на горизонтальной оси (оси абсцисс), а зависимую переменную (функцию) – на вертикальной оси (оси ординат).

На координатных осях должны быть указаны: обозначения откладываемых величин, единицы их измерения, шкала числовых значений величин.

Оси координат могут быть со шкалами и без шкал. В обоих случаях оси координат рекомендуется заканчивать стрелками. Оси координат, следует выполнять сплошной линией толщиной 0,8 до 1,0 мм.

Масштабы

Масштаб изображения может быть как линейным, так и неллинейным (например, логарифмическим).

Масштаб изображения может быть разным для каждой оси, например: по одной оси 1; 2; 3; 4; 5; ..., а по другой – 5; 10; 15; 20; или по одной оси линейный, а по другой – логарифмический. В некоторых случаях масштабы положительного и отрицательного направлений оси могут быть разными.

Масштаб выбирают таким образом, чтобы:

- а)* график занимал максимально возможную площадь чертежа;
- б)* линия графика была равномерно растянута вдоль обеих осей (если график представляет собой прямую, то рекомендуется, чтобы угол ее наклона к осям не сильно отличался от $\pm 45^\circ$);

в) координаты любой точки можно было определить легко и быстро по шкалам на осях.

Масштаб является удобным для чтения графика, если в одном сантиметре содержится одна единица величины (или две, пять, десять, двадцать, пятьдесят и т. д.). Примеры шкал: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; ..., или 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 0,10, ..., или 1; 2; 3; 4; 5; ..., или 2; 4; 6; 8; 10, ..., или 5; 10; 15; 20; ...

Масштаб, при котором чтение графика затруднено, считается неприемлемым.

Следует избегать неудобного, (к сожалению, нередко используемого начинающими обучение студентами) масштаба: три сантиметра на единицу величины или в одном сантиметре три единицы (например, 1; 3; 6; 9; ...). Такой неудачный выбор привёл бы к крайне неудобному чтению координат точек на оси.

Шкалы

Шкалы имеют основные и промежуточные деления. На миллиметровой бумаге основные деления должны совпадать с толстыми линиями.

Основные деления снабжают числами. Частоту нанесения числовых значений делений шкал следует выбирать с учетом удобства определения координат. Числа у шкал следует размещать вне поля графика и располагать горизонтально, наносить равномерно по всей оси и без пропусков.

Начало координат, если это не оговорено особо, может не совпадать с нулевыми значениями шкалы. Его выбирают таким образом, чтобы график занимал максимально возможную площадь чертежа.

Обозначение величин

Нанесение единиц измерения

Обозначения величин следует размещать в конце шкалы вместе с единицей измерения через запятую, например: p , Па; T , К; t , °С; h , м.

Множитель 10^n (n – целое число) предпочтительно располагается рядом с единицей измерения, например: p , 10^6 Па; или p , МПа; h , 10^{-3} м; или h , мм.

Изображение точек

Точки на графике, полученные путем измерений или расчетов должны изображаться четко и крупно: в виде крестиков треугольников, ромбиков и т. п. (размер символа должен быть в 2–3 раза больше толщины линии). Рекомендуется использовать следующие символы: \times , $+$, Δ , \blacktriangle , \diamond , \blacklozenge , \square , \blacksquare , \circ , \bullet и т.п. Если на одном графике построено несколько зависимостей, то для разных зависимостей следует использовать различные символы.

При построении теоретической линии на графике не показывают точки, через которые проводят линию.

Координаты точек, полученных путем измерений или расчетов, на осях не указывают. Пунктирные линии, определяющие координаты таких точек, не проводят.

Линии

Линия графика должна быть плавной. При выборе формы усредняющей кривой для каждого графика следует руководствоваться следующими правилами. Если известно теоретическое уравнение, описывающее эту зависимость, то нужно построить кривую, соответствующую этому уравнению. Если теоретическое уравнение неизвестно, то проводят наиболее простую и плавную линию (прямую или кривую), проходящую через массив экспериментальных точек, усредняя их разброс.

Линию следует проводить так, чтобы количество точек по обе стороны от нее было приблизительно одинаковым и как можно ближе к точкам, но, не обязательно пересекая их. Не следует соединять точки ломаной линией.

При проведении линии следует заранее выяснить: должна ли она, согласно теории, проходить через какую-либо конкретную точку, например через начало координат (0; 0).

Пример. Пусть требуется построить график зависимости пути S от времени t при равномерном движении тела. Экспериментальные данные приведены в табл. П.1.

Таблица П.1

$t, \text{с}$	10	12	14	15	16	18	19	22
$S, \text{м}$	20	23	30	31	34	34	38	43

На рис. П.1 показан график $S(t)$ с наиболее типичными ошибками.



Рис. П.1

При построении графика сделаны следующие ошибки:

– неправильно выбраны направления осей координат. Время t является независимой переменной (аргументом) и должно быть отложено по оси абсцисс (горизонтальной), а путь S является зависимой переменной (функцией) и должен быть отложен по оси ординат (вертикальной);

– на оси ординат не указана отложенная величина (время t) и единицы ее измерения (с);

– на оси абсцисс не указана единица измерения пути S , м;

– некоторые числовые значения шкалы расположены на поле графика;

– масштабные деления на оси времени нанесены неравномерно. Если есть деления 0 и 5, то следующим должно быть 10 и т. д.;

– площадь чертежа использована не полностью. Поскольку из условия примера не следует, что оси координат должны начинаться с нулевых значений, то начало координат можно сместить и за счет этого увеличить масштаб графика;

- график сжат по оси абсцисс из-за двух ошибок: неправильно выбранного начала координат и неудачного (слишком мелкого) масштаба;
- выбран крайне неудобный масштаб по оси времени, поэтому чтение графика затруднено;
- не выделены символами экспериментальные точки;
- на оси пути нет масштабных делений;
- на оси пути нанесены координаты экспериментальных точек;
- проведены лишние пунктирные линии;
- неправильно соединены экспериментальные точки: зависимость пути от времени при равномерном движении заведомо линейна, и график должен представлять собой прямую линию, а не ломаную.

Правильно оформленный график представлен на рис. П.2.

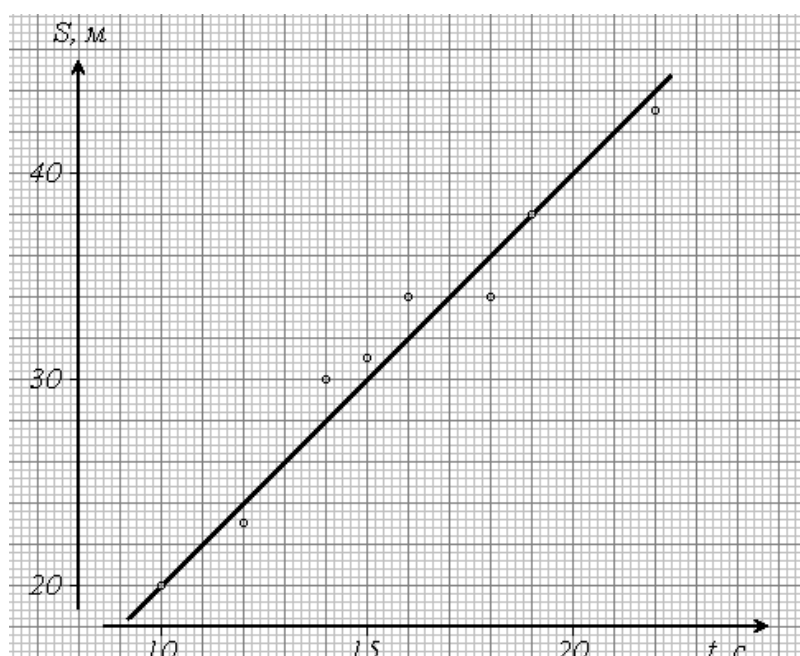


Рис. П.2

Допускается выполнение графиков с помощью компьютерных программ (например, Excel), но и в этом случае графики должны соответствовать всем изложенным здесь требованиям (в частности, иметь мелкую координатную, например, миллиметровую сетку). Чтобы мелкая сетка не мешала восприятию экспериментальных точек на графике и точному определению их координат, сетку можно задать в виде тонких штриховых линий в серых полутонах, соответствующих промежуточным делениям шкалы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАКЛОНА ПРЯМОЙ НА ГРАФИКЕ

Во многих случаях необходимо определить по графику наклон прямой, который равен коэффициенту a в уравнении линейной зависимости

$$y = a x + b.$$

Для этого нужно выбрать две точки на прямой, отстоящие достаточно далеко друг от друга и определить их координаты (x_1, y_1) и (x_2, y_2) . Тогда коэффициент a вычисляется по формуле:

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

Пример. На рисунке П.3 изображена зависимость пройденного пути от времени.

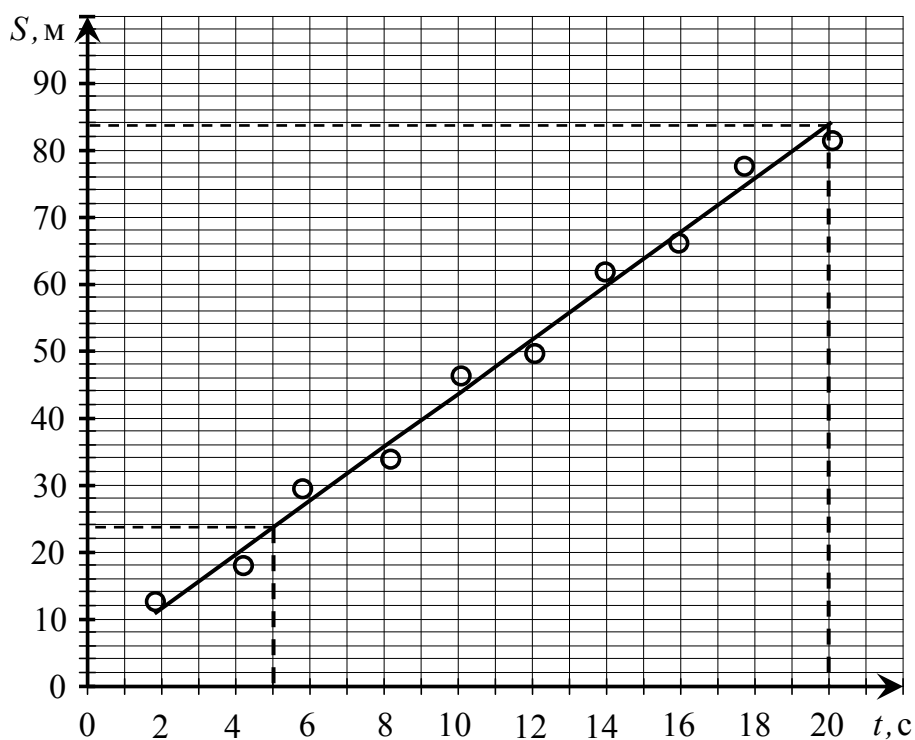


Рис. П.3

Наклон прямой на этом графике получается так:

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} = \frac{83,3 - 25,4}{20 - 5} = \frac{57,9}{15} \approx 3,86 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Выбирать точки на прямой удобнее всего так, чтобы знаменатель (разность $x_2 - x_1$) принимал значение, позволяющее результат деления легко вычислить устно, чтобы избежать возможной ошибки расчёта.

Например, на рисунке П.3 можно было бы выбрать вторую точку $t_2 = 15$ с вместо $t_2 = 20$ с. Она находится еще достаточно далеко от первой точки, но знаменатель дроби будет равен 10 с, и это существенно облегчает деление.

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} = \frac{64,0 - 25,4}{15 - 5} = \frac{38,6}{10} \approx 3,86 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Всякое число состоит из цифр, определяющих количество единиц в различных разрядах числа. Например, в числе 1726,34 имеется шесть цифр. Число содержит 1 тысячу, 7 сотен, 2 десятка, 6 единиц, 3 десятых, 4 сотых. Старший разряд в числе – тысячи (1 тысяча), младший – сотые (4 сотых).

Цифры в числе могут быть значащими и незначащими. *Значащими цифрами числа являются все цифры данного числа, кроме нулей, стоящих слева.* Нули, стоящие в середине или в конце числа (справа) являются значащими цифрами, так как обозначают отсутствие единиц в соответствующем разряде. При этом цифры множителя 10^n не учитываются. Примеры определения количества значащих цифр в числах представлены в табл. 1.

Таблица 1

Примеры определения количества значащих цифр

Число	Количество значащих цифр
12	2
12,0	3
12,4	3
120	3
124	3
1,24·10⁻³	3
0,1240	4
0,1046	4
0,526·10⁶	3
0,206·10⁻³	3
0,200·10⁻³	3
0,020·10⁻³	2

В процессе измерений получают измеренное значение величины \bar{x} , его абсолютную Δ_x и относительную ϵ_x погрешности. Математический анализ показывает, что изложенные в данном пособии методы обработки результатов дают значение погрешности с ошибкой 30 %. Поэтому, чтобы не создавать ложного впечатления о точности прове-

денных измерений, в погрешностях Δ_x и ϵ_x следует ограничивать число значащих цифр.

Погрешности измерения должны содержать не более двух (т. е. одну или две) значащих цифр. Для этого следует использовать следующие правила и порядок ограничения числа значащих цифр.

1. Если первая значащая цифра в абсолютной погрешности Δ_x **1, 2, 3**, то в погрешности оставляем две значащие цифры. Если первая значащая цифра в погрешности **4, 5, 6, 7, 8, 9**, то в погрешности оставляем одну значащую цифру (см. табл. 2).

2. Измеренное значение \bar{x} должно заканчиваться тем же младшим разрядом, что и абсолютная погрешность Δ_x . Например, если в абсолютной погрешности Δ_x оставлен младший разряд – единицы, то и в измеренном значении должен быть оставлен младший разряд – единицы (см. табл. 3).

3. В относительной погрешности число значащих цифр ограничиваем по тем же правилам, что и в абсолютной погрешности (см. табл. 2).

При ограничении числа значащих цифр используем операцию округления. Округление числа представляет собой отбрасывание значащих цифр справа после определенного разряда с возможным изменением цифры этого разряда.

Существуют следующие правила округления.

1. Если первая из отбрасываемых цифр меньше чем **5**, то цифра предыдущего разряда не изменяется.

2. Если первая из отбрасываемых цифр больше чем **5**, то цифра предыдущего разряда увеличивается на единицу.

3. Если отбрасываются несколько цифр и первая из отбрасываемых цифр **5**, то цифра предыдущего разряда увеличивается на единицу.

4. Если отбрасывается только одна цифра **5**, а за ней нет цифр, то округление производится до ближайшего четного числа, т. е. цифра предыдущего разряда остается неизменной, если она четная, и увеличивается на единицу, если она нечетная.

5. Округление следует выполнять сразу до желаемого числа значащих цифр, а не по этапам, что может привести к ошибкам.

Примеры ограничения числа значащих цифр в погрешности и в измеренном значении представлены в табл. 2 и 3.

**Примеры ограничения числа значащих цифр
и округления погрешности**

Пример	Пояснения
$0,154 \approx 0,15$ $1,967 \approx 2,0$ $19,37 \approx 19$ $144,1 \approx 0,14 \cdot 10^3$	Первая значащая цифра погрешности 1 , поэтому оставляем две значащие цифры. Замечание. При необходимости число записывают с множителем 10^n , где n – показатель степени.
$0,394 \approx 0,39$ $3,94 \approx 3,9$	Первая значащая цифра погрешности 3 , поэтому оставляем две значащие цифры.
$0,397 \approx 0,4$ $3,97 \approx 4$	Первая значащая цифра погрешности 3 , поэтому оставляем две значащие цифры, но так как при округлении цифра 3 превращается в цифру 4 , то оставляем только одну значащую цифру.
$0,461 \approx 0,5$ $4,78 \approx 5$ $41,1 \approx 4 \cdot 10$ $4123 \approx 4 \cdot 10^3$	Первая значащая цифра погрешности 4 , поэтому оставляем одну значащую цифру.
$0,917 \approx 0,9$ $9,17 \approx 9$ $91,7 \approx 9 \cdot 10$ $9123 \approx 9 \cdot 10^3$	Первая значащая цифра погрешности 9 , поэтому оставляем одну значащую цифру.
$0,0977 \approx 0,10$ $0,956 \approx 1,0$ $956 \approx 1,0 \cdot 10^3$	Первая значащая цифра погрешности 9 , поэтому оставляем одну значащую цифру, но так как при округлении цифра 9 превращается в число 10 , т.е. первая значащая цифра 1 , то оставляем две значащие цифры.
$2,45 \approx 2,4$ $2,35 \approx 2,4$	Первая значащая цифра погрешности 2 , поэтому оставляем две значащие цифры. Отбрасывается только одна цифра 5 , а за ней нет значащих цифр, поэтому округление производим до ближайшего четного числа.
$2,451 \approx 2,5$ $2,351 \approx 2,4$	Первая значащая цифра погрешности 2 , поэтому оставляем две значащие цифры. Первая из отбрасываемых цифр 5 , но отбрасываются две цифры, поэтому предыдущий разряд числа увеличиваем на единицу.

**Примеры ограничения количества значащих цифр
в измеренном значении и его погрешности**

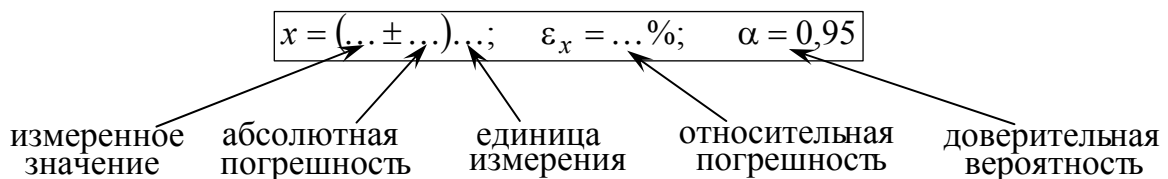
Пример	Пояснения
$43,234 \pm 0,0417 \approx 43,23 \pm 0,04$ $32,3754 \pm 0,0917 \approx 32,38 \pm 0,09$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру, младший разряд – сотые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – сотые.</p>
$4,3234 \pm 0,0397 \approx 4,32 \pm 0,04$ $43,2364 \pm 0,0522 \approx 43,24 \pm 0,05$ $432,37 \pm 0,0917 \approx 432,37 \pm 0,09$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру, младший разряд – сотые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – сотые.</p>
$432,37 \pm 0,956 \approx 432,4 \pm 1,0$ $432,3477 \pm 2,45 \approx 432,3 \pm 2,4$ $432,134 \pm 2,86 \approx 432,1 \pm 2,9$ $43,234 \pm 3,94 \approx 43,2 \pm 3,9$	<p>В погрешности оставляем две значащие цифры, последний разряд – десятые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – десятые.</p>
$43,234 \pm 0,297 \approx 43,2 \pm 3,0$ $432,345 \pm 1,441 \approx 4323,4 \pm 1,4$	<p>В погрешности оставляем две значащие цифры, младший разряд – десятые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – десятые.</p>
$43,234 \pm 3,97 \approx 43 \pm 4$ $432,364 \pm 5,55 \approx 432 \pm 6$ $432,34 \pm 39,4 \approx 432 \pm 39$ $432,34 \pm 19,37 \approx 432 \pm 19$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру, младший разряд – единицы.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – единицы.</p>
$432,34 \pm 49,1 \approx (43 \pm 5) \cdot 10$ $426,34 \pm 41,1 \approx (43 \pm 4) \cdot 10$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру. Так как за скобки выносим общий множитель 10, то младший разряд – единицы.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – единицы.</p>

Пример	Пояснения
$432,34 \pm 39,7 \approx (4,3 \pm 0,4) \cdot 10^2$ $437,34 \pm 59,7 \approx (4,4 \pm 0,6) \cdot 10^2$	<p>В погрешности оставляем одну значащую цифру. Так как за скобки выносим общий множитель 10^2, то младший разряд – десятые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – десятые.</p>
$4326,4 \pm 211 \approx (4,33 \pm 0,21) \cdot 10^3$ $4323,4 \pm 219 \approx (4,32 \pm 0,22) \cdot 10^3$	<p>В погрешности оставляем две значащие цифры. Так как за скобки выносим общий множитель 10^3, то младший разряд – сотые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – сотые.</p>
$0,0004623 \pm 0,00017 \approx$ $\approx (4,6 \pm 1,7) \cdot 10^{-4}$	<p>В погрешности оставляем две значащих цифры. Так как за скобки выносим общий множитель 10^{-4}, то младший разряд – десятые.</p> <p>В измеренном значении оставляем также младший разряд – десятые.</p>

Если табличные или экспериментальные данные приводятся без указания погрешности, то обычно считается, что эта погрешность составляет $\pm 0,5$ последней значащей цифры.

ФОРМА ЗАПИСИ КОНЕЧНОГО РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЙ

Конечный результат измерений записывается в виде



СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 1

Единицы СИ

Физическая величина	Единица измерения		
	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
<i>Основные единицы</i>			
Длина	метр	м	m
Масса	килограмм	кг	kg
Время	секунда	с	s
<i>Дополнительные единицы</i>			
Плоский угол	радиан	рад	rad
Телесный угол	стерадиан	ср	sr
<i>Некоторые производные единицы</i>			
Волновое число	метр в минус первой степени	м^{-1}	m^{-1}
Давление	паскаль	Па	Pa
Импульс	килограмм-метр на секунду	кг·м/с	kg·m/s
Импульс силы	ньютон-секунда	Н·с	N·s
Коэффициент затухания	секунда в минус первой степени	с^{-1}	s^{-1}
Коэффициент ослабления	метр в минус первой степени	м^{-1}	m^{-1}
Модуль продольной упругости	паскаль	Па	Pa
Модуль сдвига	паскаль	Па	Pa
Момент импульса	килограмм-метр в квадрате на секунду	кг·м ² /с	kg·m ² /s

Окончание табл. 1

Физическая величина	Единица измерения		
	Наименование	Обозначение	
		русское	междуна- родное
Мощность	ватт	Вт	W
Объем, вместимость	кубический метр	м ³	m ³
Период	секунда	с	s
Плотность	килограмм на кубический метр	кг/м ³	kg/m ³
Площадь	квадратный метр	м ²	m ²
Работа	джоуль	Дж	J
Сила	ньютон	Н	N
Скорость	метр в секунду	м/с	m/s
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/с	rad/s
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	рад/с ²	rad/s ²
Удельный объем	кубический метр на килограмм	м ³ /кг	m ³ /kg
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с ²	m/s ²
Частота вращения	секунда в минус первой степени	с ⁻¹	s ⁻¹
Частота периодического процесса	герц	Гц	Hz
Энергия	джоуль	Дж	J

ДЕСЯТИЧНЫЕ КРАТНЫЕ И ДОЛЬНЫЕ ПРИСТАВКИ И МНОЖИТЕЛИ

Таблица 2

Десятичные кратные приставки и множители

Приставка			Множитель	Пример
Наименование	Обозначение			
	русское	международное		
экса	Э	E	10^{18}	1 Эм = 10^{18} м
пета	П	P	10^{15}	1 Пм = 10^{15} м
тера	Т	T	10^{12}	1 Тм = 10^{12} м
гига	Г	G	10^9	1 Гм = 10^9 м
мега	М	M	10^6	1 Мм = 10^6 м
кило	к	k	10^3	1 км = 10^3 м
гекто	г	h	10^2	1 гм = 10^2 м
дека	да	da	10^1	1 дам = 10^1 м

Таблица 3

Десятичные дольные приставки и множители

Приставка			Множитель	Пример
Наименование	Обозначение			
	русское	международное		
деци	д	d	10^{-1}	1 дм = 10^{-1} м
сантиметры	с	с	10^{-2}	1 см = 10^{-2} м
милли	м	m	10^{-3}	1 мм = 10^{-3} м
микро	мк	μ	10^{-6}	1 мкм = 10^{-6} м
нано	н	n	10^{-9}	1 нм = 10^{-9} м
пико	п	p	10^{-12}	1 пм = 10^{-12} м
фемто	ф	f	10^{-15}	1 фм = 10^{-15} м

Правила образования наименований и обозначений десятичных кратных и дольных единиц СИ

1. Приставку или её обозначение следует писать слитно с наименованием единицы, к которой она присоединяется, или с её обозначением.

2. Присоединение двух и более приставок подряд не допускается.

Правильно:

мегапаскаль

МПа

микрометр

мкм

нанофарад

нФ

Неправильно:

килокилопаскаль

ккПа

миллимиллиметр

ммм

миллимикрофарад

ммкФ

3. Если единица образована как произведение или отношение единиц, приставку или ее обозначение присоединяют к наименованию или обозначению первой единицы, входящей в произведение или в отношение.

Правильно:

килопаскаль-секунда на метр

$\frac{\text{кПа} \cdot \text{с}}{\text{м}}$

м

килоньютон на метр

$\frac{\text{кН}}{\text{м}}$

м

Неправильно:

паскаль-килосекунда на метр

$\frac{\text{Па} \cdot \text{кс}}{\text{м}}$

м

ньютон на миллиметр

$\frac{\text{Н}}{\text{мм}}$

мм

Присоединять приставку ко второму множителю произведения или к знаменателю допускается лишь в обоснованных случаях, когда такие единицы широко распространены и переход к единицам, образованным по правилу, связан с трудностями, например: тонна-километр (т·км), вольт на сантиметр (В/см), ампер на квадратный миллиметр (А/мм²).

Рекомендации по выбору десятичных кратных и дольных единиц СИ

Выбор десятичной кратной или дольной единицы СИ определяется удобством ее применения.

Кратные и дольные единицы выбирают таким образом, чтобы числовые значения величины находились в диапазоне от 0,1 до 1000.

Для уменьшения вероятности ошибок при расчётах десятичные кратные и дольные единицы рекомендуется подставлять только в конечный результат, а в процессе вычислений все величины выражать в единицах СИ, заменяя приставки степенями числа 10, т. е. множителями 10^n .

В десятичных единицах СИ нет множителей 10^{-4} , 10^4 , 10^{-5} , 10^5 , 10^{-7} , 10^7 и т. п. Поэтому следует применять только те множители, которые приведены в табл. 1, 2.

В десятичных единицах СИ множители 10^{-2} , 10^{-1} , 10^1 , 10^2 используются очень редко, только в виде исключения, поэтому не следует их применять.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Таблица 4

Основные физические постоянные (округленные значения)

Величина	Обозначение	Значение величины
Скорость света в вакууме	c	$3,00 \cdot 10^8$ м/с
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Электрическая постоянная	ε_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Гравитационная постоянная	γ	$6,67 \cdot 10^{-11}$ Н · м ² /кг ²
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
	\hbar	$1,055 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Элементарный электрический заряд	e	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Комптоновская длина волны электрона	λ_K	$2,43 \cdot 10^{-12}$ м
Постоянная Ридберга	R	$1,097 \cdot 10^7$ м ⁻¹
Число 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
Постоянная Стефана–Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² · К ⁴)
Боровский радиус	a_0	$0,529 \cdot 10^{-10}$ м
Энергия ионизации атома водорода	E_i	$2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж (13,6 эВ)

МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Целью совместных измерений является нахождение зависимости между несколькими прямо или косвенно измеренными величинами.

Надежным и научно обоснованным способом определения коэффициентов экспериментальных зависимостей является *метод наименьших квадратов* (МНК). Суть его заключается в подборе таких значений коэффициентов, при которых сумма квадратов отклонений, измеренных в опытах значений $y_i (i = 1, 2, \dots, n)$ от рассчитанных была бы минимальной. МНК позволяет не только найти коэффициенты функциональной зависимости, но и провести оценку погрешностей найденных коэффициентов.

МНК рассмотрим в варианте, когда приняты следующие допущения:

- между переменными существует зависимость вида $y = a + bx$;
- погрешности величины x малы.

Расчет коэффициентов a и b следует проводить в такой последовательности:

1. Из опыта получить n пар значений аргумента и функции (x_i, y_i) .
2. Найти средние значения всех экспериментальных точек:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i . \quad (1)$$

3. Найти коэффициенты прямой по следующим формулам:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} ; \quad a = \bar{y} - b\bar{x} . \quad (2)$$

4. Рассчитать параметры D, d_i

$$d_i = y_i - (a + bx_i); \quad D = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (3)$$

5. Определить СКО коэффициентов a и b

$$S_b^2 = \frac{1}{D} \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-2}; \quad S_a^2 = \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{D} \right) \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-2}. \quad (4)$$

Расчет коэффициента b и его СКО упрощается, если из теории известно, что прямая проходит через начало координат. Тогда параметр b и его СКО находят по следующим формулам:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}; \quad S_b^2 = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2}. \quad (5)$$

6. Погрешность рассчитанной величины y при произвольном значении аргумента x рассчитывают для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ как погрешность косвенных измерений

$$\Delta_y = \sqrt{(2S_a)^2 + (2S_b x)^2}. \quad (6)$$

Пример. Исследуется зависимость скорости $V(t)$ при равноускоренном движении, которая удовлетворяет уравнению прямой

$$V = V_0 + gt.$$

Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

$t, \text{с}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$V, \text{м/с}$	3,3	3,6	5,1	6,6	6,5	8,2	9,0	9,6	11,6	11,4	13,0

По формулам (1) находим средние значения:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n=11} t_i = \frac{1}{11} (1+2+3+4+5+6+7+8+9+10+11) = 6,00 \text{ с};$$

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n=11} V_i =$$

$$= \frac{1}{11} (3,3+3,6+5,1+6,6+6,5+8,2+9,0+9,6+11,6+11,4+13,0) = 7,99 \text{ м/с}.$$

Затем по формулам (2) рассчитываем значения искомым параметров:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(V_i - \bar{V})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} = \frac{107,69}{110} = 0,979 \text{ м/с}^2;$$

$$a = \bar{V} - b\bar{t} = 7,99 - 0,979 \cdot 6,00 = 2,12 \text{ м/с}.$$

Далее по формулам (3) – (5) находим вспомогательные параметры и СКО коэффициентов:

$$\sum_{i=1}^n d_i^2 = 1,69 \text{ м/с}; \quad D = \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 = 110 \text{ с}^2;$$

$$S_b^2 = \frac{1}{D} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-2} = \frac{1}{110} \frac{1,69}{11-2} = 1,70 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 / \text{с}^4;$$

$$S_b = 41,2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2;$$

$$S_a^2 = \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{D} \right) \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-2} = \left(\frac{1}{11} + \frac{6^2}{110} \right) \frac{1,69}{9} = 78,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 / \text{с}^2;$$

$$S_a = 0,280 \text{ м/с}.$$

Для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ находим границы доверительных интервалов коэффициентов по формуле (6)

$$\Delta_a = 2S_a = 2 \cdot 0,280 = 0,560 \text{ м/с};$$

$$\Delta_b = 2S_b = 2 \cdot 4,12 \cdot 10^{-2} = 82,4 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2.$$

Результат измерения с учетом правил представления результатов измерения (см. прил. 3) записываем в виде

$$V_0 = a = (2,1 \pm 0,6) \text{ м/с}; \quad g = b = (0,98 \pm 0,08) \text{ м/с}^2.$$

Искомое уравнение выглядит следующим образом

$$V = 2,1 + 0,98t.$$

Следует отметить, что из-за сравнительно большого объема вычислений применение метода наименьших квадратов целесообразно проводить с помощью компьютера или калькулятора.

Приложение 7

**СВОЙСТВА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ
ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ
УСЛОВИЯХ**

Обозначения: ρ – плотность, кг/м³; $\langle l \rangle$ – длина свободного пробега, 10⁻⁹ м; $\langle v \rangle$ – средняя скорость молекул, м/с; $c_{v\text{уд}}$ – удельная изохорная теплоемкость, 10³ Дж/(кг·К); D – коэффициент самодиффузии, 10⁻⁶ м²/с; η – коэффициент вязкости, 10⁻⁶ Па·с; λ – коэффициент теплопроводности, 10⁻³ Вт/(м·К).

Таблица 1

Газ	ρ	$\langle l \rangle$	$\langle v \rangle$	$c_{v\text{уд}}$	D	η	λ
	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	нм	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\frac{\text{мкПа}}{\text{с}}$	$\frac{\text{мкВт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Водород Н ₂	0,089	112	1694	10,2	128	8,4	168
Гелий He	0,180	175	1202	3,21	162	18,6	143
Азот N ₂	1,25	59	454	0,72	17,8	16,6	24,0
Кислород O ₂	1,43	53	425	0,65	18,6	19,2	24,5
Оксид углерода CO	1,23	–	454	0,74	19,0	27,0	41,0
Диоксид углерода CO ₂	1,95	39	362	0,66	9,7	25,3	14,6
Хладон 12CF ₂ Cl ₂	5,46	28	212	0,49	2,1	11,7	8,4
Хладон 14CF ₄	3,86	10	256	0,43	8,7	33,6	14,4

Приложение 8

**КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОВЕРХНОСТНОГО
НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ
ТЕМПЕРАТУРЕ 20° С**

Таблица 1

Вещество	Вода	Бензин	Керосин	Масло касторовое	Ртуть
α , Дж/м ²	0,0727	0,022	0,0240	0,060	0,472

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа № 1. Исследование изотермического процесса	4
Лабораторная работа № 2. Определение изобарной, изохорной теплоемкостей и коэффициентов Пуассона воздуха в процессе адиабатного сжатия	13
Лабораторная работа № 3. Измерение вязкости и эффективного диаметра молекулы воздуха	27
Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости «методом отрыва кольца» ..	43
Приложение 1. Оформление отчета по лабораторной работе .	52
Приложение 2. Правила построения графиков.	53
Приложение 3. Определение наклона прямой на графике ..	58
Приложение 4. Правила представления результатов измерений	60
Приложение 5. Справочные материалы	65
Приложение 6. Метод наименьших квадратов.	71
Приложение 7. Свойства индивидуальных идеальных газов при нормальных условиях.	75
Приложение 8. Коэффициенты поверхностного натяжения жидкостей	75

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ФИЗИКИ

Кафедра Физики как общеобразовательная кафедра университета обеспечивает преподавание курса общей физики по двум (стандартной и расширенной) учебным программам в количестве 324 и 500 аудиторных часов для всех дневных факультетов, а также заочного и вечернего отделений. Лекции, практические и лабораторные занятия проводятся в течение 1-4 семестров на 1 и 2 курсах и заканчиваются сдачей зачетов и экзаменов в конце каждого семестра. Также на кафедре физики разработаны и реализуются специализированные дисциплины для студентов старших курсов – физика низких температур, биофизика, специальные и дополнительные главы физики.

Кафедра оснащена учебно-лабораторным оборудованием по всем разделам физики и имеет, помимо традиционных, специализированные компьютеризированные учебные лаборатории по электромагнетизму, колебательным процессам, волновой и квантовой оптике, физике низких температур.

В 2011 г. в соответствии с приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 18.08.2011 г. № 2209 произошло объединение Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) и Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУНиПТ). После реорганизации в структуре Университета ИТМО с 01.01.2012 г. по 31.08.2015 г. функционировали две кафедры физики: 1) физики-1, заведующий д.т.н., профессор Стафеев Сергей Константинович; 2) физики-2, заведующий д.т.н., профессор Баранов Игорь Владимирович. С 01.09.2015 г. с целью оптимизации образовательного процесса вышеуказанные кафедры объединены в единую кафедру Физики.

Учитывая богатую и плодотворную историю педагогической и научной работы кафедр физики Университета ИТМО и СПбГУНиПТ, ниже

представлена краткая историческая справка об их развитии образовательной и научной деятельности.

Кафедра физики Университета ИТМО (1930-2011 гг.).

Преподавание физики как учебной дисциплины велось в Ремесленном училище цесаревича Николая всегда с момента его создания. Механико-оптическое и часовое отделение, а затем — Техникум точной механики и оптики имели в своем составе Физический кабинет. Преподаванию дисциплины Физика для учащихся всегда уделялось большое внимание. В 1930 году при организации вуза — Ленинградского института точной механики и оптики — была организована кафедра Физики как одна из общеобразовательных кафедр.

Организатором и первым заведующим кафедрой Физики явился профессор А.П. Ющенко. Затем в довоенные годы кафедру возглавляли: профессора В.Ф. Трояновский, Л.С. Полак. С 1935 года кафедру возглавил известный специалист в области рентгенометрии профессор И.В. Поройков.

В эвакуации в г. Черепаново Новосибирской области кафедру Физики возглавил известный ученый, сотрудник Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии (ВНИИМ), занимавшийся дозиметрией и метрологией рентгеновских лучей, профессор К.К. Аглинцев.

С 1945 года кафедру Физики возглавил крупный специалист в области рентгенографии и физики твердого тела профессор Д.Б. Гогоберидзе. В 1946 году профессор Д.Б. Гогоберидзе стал первым деканом нового Инженерно-физического факультета.

Во второй половине 1940-ых годов на кафедре работал выдающийся советский физик-теоретик, член-корреспондент Академии наук СССР Я.И. Френкель. Впоследствии кафедру Физики возглавляли: основоположник теплофизической школы ЛИТМО профессор Г.М. Кондратьев, профессор Н.А. Толстой, доцент С.В. Андреев, доцент А.Ф. Бегункова, профессор А.Я. Вяткин и профессор Н.А. Ярышев.

В течение 16 лет с 1957 по 1973 г. под руководством доктора физико-математических наук, профессора А.Я. Вяткина на кафедре было сформулировано научное направление по исследованию физики взаимодействия электронных пучков с веществом.

С 1973 года на кафедре под руководством профессора Н.А. Ярышева получили развитие научные исследования в области теплофизики, в частности, изучение нестационарной теплопроводности и теплотрии.

В 1987 году сотрудником кафедры стал С.А. Козлов (ныне декан факультета фотоники и оптоинформатики), Лауреат премии Ленинского комсомола по науке и технике, в 1998 году им была открыта лаборатория волновых процессов.

С конца XX века на кафедре проводится комплексная работа по совершенствованию всего учебного процесса, включая создание фронтальных компьютеризированных учебных лабораторий, банков контроля и проверки усвоения знаний, подготовку программно-методического обеспечения по дистанционному обучению студентов через компьютерные сети RUNNET и INTERNET. В этих учебно- и научно-методических направлениях деятельности кафедры принимали активное участие ведущие сотрудники кафедры доценты С.К. Стафеев (ныне профессор, декан естественнонаучного факультета), Ю.Л. Колесников (ныне профессор, проректор по учебно-организационной и административной деятельности), А.В. Смирнов, А.А. Королев, Г.Л. Башнина, ст.преподаватель С.А. Курашова.

С 2000 по 2015 годы кафедрой заведовал профессор, декан естественнонаучного факультета С.К. Стафеев. Под его руководством было сформировано научное направление, связанное с оптическими методами неразрушающего контроля, сотрудники кафедры А.А. Зинчик, Я.А. Музыченко подготовили и защитили кандидатские диссертации. С.К. Стафеев является организатором и научным руководителем первой в России интерактивной образовательной экспозиция "Музей оптики", созданной в рамках инновационной образовательной программы Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Расположена экспозиция на стрелке Васильевского острова, на первом этаже бывшего дома купца Елисеева. Знакомит с широким кругом применений оптических и оптико-информационных технологий, стимулирует дальнейшее изучение оптики. Главная цель Музея оптики — не только произвести впечатление, но и помочь в обучении школьникам и студентам профильных вузов. Для этого действуют залы практикумов и демонстраций.

Также С.К. Стафеев является куратором выставки Magic of light (Магия света) проходящей с России в рамках в рамках международного Года света, проводимого в 2015 г. в соответствии с решением Генеральной Ассамблеи ООН.

Кафедра физики СПбГУНиПТ (1931-2011 гг.).

В составе Университета низкотемпературных и пищевых технологий кафедра физики существовала с момента его основания в 1931 г. и обеспечивала фундаментальную общенаучную подготовку инженеров по всем специальностям.

Кафедрой руководили известные в СССР и России ученые, авторы многочисленных научных работ, монографий, учебников и учебных пособий по физике: доцент А.Н. Святозаров (1931 – 1942 гг.), профессор Л.М. Розенфельд (1942-1949 гг.), доцент Е.А. Штрауф (1949-1959 гг.), до-

цент К.В. Струве (1960-1968 гг.), профессор Н.В. Солнцев (1969-1975 гг.), заслуженный деятель науки РФ профессор Е.С. Платунов (1975-2002 гг.), профессор С.Е. Буравой (2002-2010 гг.), профессор И.В. Баранов (2010-2011 гг.).

В 1976-1985 гг. по инициативе заведующего кафедрой Е.С. Платунова коллективом кафедры была осуществлена коренная реконструкция учебно-лабораторной базы. Была переосмыслена логика проведения лабораторных и практических занятий и их связь с лекционной теоретической частью курса. В основу реорганизации была положена идея системного объединения всех видов занятий в логически обоснованную схему фронтального обучения «лекция – практическое занятие – лабораторная работа». Было создано 5 оригинальных учебных лабораторий стендового типа, охватывающих основные разделы курса: 1) Лаборатория физической механики (авторы - профессор Е.С. Платунов, доценты В.В. Курепин, З.В. Сигалова, старший преподаватель Л.В. Соколова); 2) Лаборатория термодинамики и молекулярной физики (Е.С. Платунов, В.В. Курепин, З.В. Сигалова); 3) Лаборатория электромагнетизма (доценты Д.Ю. Иванов, Э.Л. Китанина, А.Ф. Костко, С.М. Бунин); 4) Лаборатория оптики и атомной физики (доценты Л.С. Крайнова, С.Е. Буравой, В.А. Самолетов, преподаватели В.А. Павлов, В.А. Рыков); 5) Лаборатория физики твердого тела (доцент В.И. Соловьев, профессор Н.В. Солнцев, доцент В.М. Козин).

Каждая лаборатория имеет в своем составе 15 стендов, рассчитанных на проведение от 10 до 20 различных лабораторных работ по всем основным темам соответствующего раздела курса. Многие лабораторные работы отличаются оригинальным содержанием и не имеют аналогов в других учебных заведениях. Стенды оснащены современными приборами (цифровыми вольтметрами, лазерами, монохроматорами и т. п.).

Преподавателями кафедры был выполнен большой объем методической работы: составлено и издано около 100 новых оригинальных методических указаний по выполнению лабораторных работ, В.В. Курепиным, И.В. Барановым и В.Е. Куцаковой разработано пособие по оценке погрешностей в лабораторных работах, выдержавшее более 5 изданий.

В 1995-2005 г.г. профессором Е.С. Платуновым подготовлено и дважды издано учебное пособие по курсу общей физики в четырех томах общим объемом около 80 печ. листов.

В 2002 – 2006 гг. для студентов, обучающихся по специальности «Техника и физика низких температур», и магистров всех специальностей создана не имеющая аналогов учебно-исследовательская лаборатория «Физика низких температур» (авторы проф. Е.С. Платунов, проф. И.В. Баранов, проф. В.В. Курепин, доценты В.М. Козин, С.С. Прошкин). Авторским коллективом (Е.С. Платунов, И.В. Баранов, Е.В. Тамбулатова,

А.Е. Платунов) издано учебное пособие для этой лаборатории с аналогичным названием. Лаборатория оснащена 15 автоматизированными стендами каждый из которых позволяет выполнить 13 лабораторных работ по изучению физических свойств веществ в области температур от минус 196 °С до 100 °С.

В 2002 – 2004 гг. преподавателями кафедры С.С. Прошкиным, Н.В. Нименским, В.А. Самолетовым подготовлено и издано учебное пособие «Сборник задач» с методическими указаниями и примерами решения. Сборник содержит около 1700 задач в трех книгах по разделам «Молекулярная физика и термодинамика», «Электродинамика и электромагнитные волны», «Квантовая физика».

Сотрудниками кафедры (проф. Е.С. Платунов, проф. В.А. Самолетов, проф. С.Е. Буравой) подготовлен и дважды издан словарь-справочник «Физика», объемом 40 печ. листов. Доцентом С.С. Прошкиным подготовлено и издано в 2009 году учебное пособие «Физика. История и развитие» объемом около 40 печатных листов для студентов, обучающихся по специальности «Экономика и менеджмент», а также аспирантов и магистров всех специальностей.

На кафедре физики под руководством профессора Е.С. Платунова к началу 80-х годов прошлого столетия сложилась оригинальная самостоятельная научная школа теплофизиков-прибористов, получившая мировое признание и известность.

В 1977 г. при кафедре была открыта Отраслевая научная лаборатория динамических методов теплофизических измерений и приборов. Лаборатория стала базой для научного роста аспирантов и инженеров, формирования нового поколения преподавателей кафедры.

Совместно с ГСКБ теплофизического приборостроения (ГСКБ ТФП) за 15 лет функционирования лаборатории было создано более двадцати различных образцов приборов для изучения теплофизических свойств веществ, охватывающих в совокупности диапазон температур от 4,2 до 1200 К. Некоторые из них были приняты к промышленному производству и выпускались серийно на опытном производстве ГСКБ ТФП и на одном из заводов Казахстана вплоть до распада СССР в 1991 году. По своей методической сути эти разработки значительно превышали уровень таких известных фирм, как «Dynatech» (США), «Feuotron» (ФРГ), «Setaram» (Франция). Созданные приборы обладали большой производительностью, позволяя за один эксперимент изучать температурную зависимость измеряемых параметров (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность). В Советском Союзе основной объем информации о теплофизических свойствах твердых веществ в области от 200 до 700 К был получен на приборах, разработанных научной школой профессора Е.С. Платунова.

Во многих научных и учебных лабораториях стран СНГ эти приборы успешно функционируют и в настоящее время.

По данной научной тематике к 1992 году было опубликовано свыше 150 статей, получено 40 авторских свидетельств на изобретения. Разработаны оригинальные методы исследования теплофизических свойств в области криогенных температур (от 4,2 до 300 К). Созданы средства измерения, не требовавшие специальных криостатирующих устройств, экспрессные по своей сути, что означало значительный прорыв в области техники низкотемпературного теплофизического эксперимента.

Сотрудниками кафедры проведены оригинальные исследования в области создания методов и средств неразрушающего контроля тепловых свойств материалов и изделий. Эти разработки стали основой кандидатских диссертаций Е.А. Белова и Г.Я. Соколова.

В 1976 г. на кафедре развивалась научное направление, связанное с поиском методов построения уравнений состояния и расчетом свойств индивидуальных веществ идеальных газов, имеющих широкое применение в холодильной и криогенной технике. По результатам этих исследований были защищены 4 кандидатских и 2 докторские диссертации, опубликовано более 70 научных статей в отечественных и зарубежных журналах.

С 1992 года ведется поиск новых методов определения тепловых и влажностных характеристик разнообразных групп дисперсных влагосодержащих материалов в условиях их промерзания и размораживания. В настоящее время создан комплекс автоматизированных приборов, позволяющих изучать кинетику изменения энтальпии, дифференциальной теплоты плавления, теплопроводности и влагосодержания пищевых материалов животного и растительного происхождения в области температур от минус 30 °С до 40 °С, в условиях замораживания и размораживания продуктов, разработаны приборы, предназначенных для измерения интенсивности внутренних тепловых источников, непрерывно действующих в пищевых продуктах в условиях их производства и хранения.

При кафедре под руководством профессоров Е.С. Платунова и И.В. Баранова с 2008 г. функционирует научная лаборатория «Теплофизические измерения и приборы». В лаборатории создан комплекс методов автоматизированных приборов для изучения теплопроводности, теплоемкости, теплоты структурных и фазовых переходов в различных веществах, в том числе в процессах замораживания, оттайки, исследуются свойства пищевых продуктов и конструкционных материалов холодильной и криогенной техники.

Коллективом преподавателей кафедры по этому направлению подготовлена к изданию фундаментальная монография «Теплофизические измерения», обобщающая исследования авторов за последние 30 лет.

С конца 60-х годов на кафедре проводятся экспериментальные и теоретические исследования фазовых переходов и критических явлений. Начало этим работам было положено исследованием гравитационного эффекта вблизи критической точки парообразования, проведенным доцентом Д.Ю. Ивановым. В 80-ые годы группой сотрудников кафедры были проведены работы по корреляционной спектроскопии многократно рассеянного света. По результатам этих исследований опубликована серия научных статей, сделано более 10 докладов на конференциях и защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. В 90-х годах совместно с одним из ведущих университетов Франции проводились исследования процессов нуклеации наночастиц в растворах. Совокупные результаты исследований критических явлений легли в основу докторской диссертации доцента Д.Ю. Ивановым (2001 г.) и его монографии «Критическое поведение неидеализированных систем».

Научные исследования в области фазовых переходов, предпереходных явлений и рассеяния света в сложных жидких системах успешно развивает доцент, кандидат физико-математических наук А.Ф. Костко. Во время многолетней стажировки в ведущих университетах США А.Ф. Костко совместно с американскими коллегами методами рассеяния света проводил исследования растворов полимеров, водных растворов электролитов, биогелей и лиотропных хромонических жидких кристаллов в широком диапазоне температур и давлений. Результаты этих исследований, проведенных А.Ф. Костко после 2000 года, опубликованы в 13 статьях в ведущих международных научных журналах по физике и химии, а также доложены на 15 международных конференциях.

На сегодня кафедра Физики – одна из крупнейших в университете – представляет собой динамично развивающийся творческий коллектив, способный решать масштабные задачи развития и подготовки инженерных и научно-педагогических кадров. В связи с реорганизацией и объединением кафедр с 1 сентября 2015 года кафедра Физики находится под руководством доктора технических наук, профессора Игоря Владимировича Баранова.

С 2010 г. Игорь Владимирович является членом докторского диссертационного Совета Д 212.234.01. Им опубликовано 57 научных и 7 учебно-методических работ. За последние 3 года издано: 21 научная работа и 2 учебно-методических работы, в том числе в соавторстве Барановым И.В. в 2010 г. издано учебное пособие “Теплофизические измерения” с грифом УМО по политехническому образованию. Баранов И.В. выступал с докладами на 25 международных и всероссийских научных конференциях. Баранов И.В. является с 2008 г. академиком Международной академии холо-

да. Исполняет обязанности заместителя главного редактора научно-технического журнала "Вестник МАХ".

В настоящее время коллектив кафедры включает в себя 30 преподавателей и 10 учебно-вспомогательного персонала.

Под руководством профессора кафедры физики ИТМО Чирцова А.С. и доцента Демидова В.И. из Университета Западной Вирджинии работает Международная лаборатория «Нелокальная плазма в нанотехнологиях и медицине, которая ведет исследования по следующим направлениям:

- Исследование параметров нелокальной плазмы модифицированного короткого газового разряда постоянного тока с накаливаемым катодом
- Плазмохимическое моделирование разрядов в газах SF₆ и O₂
- Изучение особенностей дрейфа микрочастиц в плазме, обусловленных спецификой функции распределения электронов по энергиям в нелокальной плазме
- Моделирование разряда с использованием аналитических методов

Силами профессора А.С.Чирцова и старшего преподавателя С.А.Курашовой создаются on-line курсы по физике, которые размещены в Lectorium на сайте Университета ИТМО.

Под руководством С.К.Стафеева на кафедре Физики в 2016 году открыта программа подготовки магистров по уникальному в России направлению Science communications.

Платунов Евгений Степанович
Самолетов Владимир Александрович

**ФИЗИКА
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ
И ТЕРМОДИНАМИКЕ**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49**