

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Витебский государственный
университет имени П.М. Машерова»
Кафедра инженерной физики

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

*Рабочая тетрадь
для выполнения лабораторных работ*

*Витебск
ВГУ имени П.М. Машерова
2021*

УДК [539.19+536.7](076.5)
ББК 22.36я73+22.317.1я73
М75

Печатается по решению научно-методического совета учреждения образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова». Протокол № 1 от 27.10.2021.

Составители: доцент кафедры инженерной физики ВГУ имени П.М. Машерова, кандидат технических наук **Д.А. Антонович**; старший преподаватель кафедры инженерной физики ВГУ имени П.М. Машерова **Т.И. Сапелко**; инженер кафедры инженерной физики ВГУ имени П.М. Машерова **А.Л. Малышев**

Р е ц е н з е н т :
доцент кафедры алгебры и методики преподавания математики
ВГУ имени П.М. Машерова,
кандидат физико-математических наук *А.П. Мехович*

М75 **Молекулярная физика и термодинамика** : рабочая тетрадь для выполнения лабораторных работ / сост.: Д.А. Антонович, Т.И. Сапелко, А.Л. Малышев. – Витебск : ВГУ имени П.М. Машерова, 2021. – 48 с.

Рабочая тетрадь подготовлена в соответствии с учебной программой по дисциплине «Механика и молекулярная физика» для специальности 1-98 01 01-02 Компьютерная безопасность. Содержит теорию, методику выполнения, контрольные вопросы, материалы для самостоятельной работы, справочные материалы и список литературы. Издание предназначено для студентов физических специальностей.

УДК [539.19+536.7](076.5)
ББК 22.36я73+22.317.1я73

© ВГУ имени П.М. Машерова, 2021

**Сводная таблица
учета выполнения и защиты лабораторных работ**

студента _____ группы ____ курса _____ факультета

(Ф. И. О. студента)

№ л/р	Название лабораторной работы	Дата выполнения	Роспись преподавателя о выполнении и оформлении л/р	Оценка и роспись преподавателя о защите л/р
1	Изучение основных газовых законов			
2	Определение молярной газовой постоянной и средней квадратичной скорости молекул воздуха			
3	Исследование барометрической формулы и распределения частиц в поле силы тяжести			
4	Определение отношения молярных теплоемкостей воздуха C_p/C_v методом Рухардта			
5	Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса			
6	Изучение температурной зависимости коэффициента вязкости жидкости с помощью капиллярного вискозиметра			
7	Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости			
8	Определение коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) металлов			

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Лабораторная работа № 1 ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГАЗОВЫХ ЗАКОНОВ	7
Лабораторная работа № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЯРНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ И СРЕДНЕЙ КВАДРАТИЧНОЙ СКОРОСТИ МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА	11
Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ БАРОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМУЛЫ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ	15
Лабораторная работа № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА C_p/C_v МЕТОДОМ РУХАРДТА	20
Лабораторная работа № 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА	25
Лабораторная работа № 6 ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ КАПИЛЯРНОГО ВИСКОЗИМЕТРА	30
Лабораторная работа № 7 ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ	34
Лабораторная работа № 8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ (КЛТР) МЕТАЛЛОВ ..	38
ПРИЛОЖЕНИЕ	42
ЛИТЕРАТУРА	47

ВВЕДЕНИЕ

Обработка результатов измерений

1. Подсчитать среднее арифметическое $\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
2. Определить случайные отклонения $\Delta x = x_i - \langle x \rangle$.
3. Подсчитать случайную погрешность $\Delta x_{сл}$ (при $P = 0,95$):

$$\Delta x_{сл} = t_{n,P} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2},$$

где $t_{n,P}$ – коэффициент Стьюдента (табл. 12 приложения).

4. Определить приборную погрешность $\Delta x_{пр}$ по формулам:

$$\Delta x_{пр} = \frac{\lambda_P}{3,0} \delta = \frac{\lambda_P}{3,0} k x_{\max}$$

где δ – предельная абсолютная погрешность прибора (табл. 13 приложения), k – класс точности прибора, λ_P – коэффициент, который зависит от доверительной вероятности P (табл. 12 приложения). При $P = 0,95$ $\lambda_P = 2,0$.

5. Определить погрешность округления $\Delta x_{окр}$ ($P = 0,95$):

$$\Delta x_{окр} = P \frac{h}{2},$$

где h – интервал округления. Если измерение производится с точностью до целого деления, то интервал округления равен цене деления прибора.

При округлении констант интервал округления приравнивается к последнему разряду константы ($P = 1,0$). Например, если $\pi = 3,14$, то $h = 0,01$, следовательно $\Delta \pi = 0,005$.

6. Определить полную погрешность прямого измерения:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{сл}^2 + \Delta x_{пр}^2 + \Delta x_{окр}^2}.$$

7. Вычислить относительную погрешность прямого измерения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} 100\% = \sqrt{\varepsilon_{сл}^2 + \varepsilon_{пр}^2 + \varepsilon_{окр}^2} 100\%.$$

8. Записать окончательный результат в виде:

$$x = (\langle x \rangle \pm \Delta x); \quad \varepsilon\%.$$

Расчёт по приведенной схеме проводится для каждой физической величины, измеренной прямым методом.

9. Вычислить абсолютную и относительную погрешности косвенных измерений по формулам:

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\frac{1}{y^2} \sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_k} \Delta x_k \right)^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial \ln y}{\partial x_k} \Delta x_k \right)^2}, \quad \Delta y = \varepsilon_y y$$

или

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_k} \Delta x_k \right)^2}, \quad \varepsilon_y = \Delta y / y.$$

10. Окончательный результат записать в виде:

$$y = (y_{изм} \pm \Delta y); \quad \varepsilon_y\%.$$

ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ

1. Графики строят с помощью пакетов прикладных программ для построения графиков. Размер бумаги определяется интервалом измеряемых величин и выбранным для них масштабом.

2. На оси ординат откладывают значение функции, по оси абсцисс – значение аргумента.

3. На каждой из осей приводят только тот интервал изменения соответствующей физической величины, в котором велось исследование.

4. Масштаб графика выбирают не произвольно. Он определяется абсолютными погрешностями тех величин, которые откладываются по осям. Масштабы на каждой из осей выбирают независимо друг от друга.

5. Шкалы на осях, как правило, наносят в виде равноотстоящих чисел.

6. На осях указывают обозначения и единицы измерения соответствующих физических величин.

7. На координатных осях численные значения величин не указывают, а только проводят пунктирные линии до пересечения.

8. Точки на графике наносят и обводят кружком (треугольником и т.д.).

9. Кривую по нанесённым точкам проводят карандашом плавно, без изломов и перегибов, так, чтобы она располагалась возможно ближе ко всем точкам, и по обе стороны оказывалось приблизительно равное их количество. Если на одном графике строят несколько кривых, то используют различные линии: сплошные, штриховые и т.д.

10. Каждый график подписывают; в подписи отражается его основное содержание, объясняются все приведённые кривые.

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТОВ

В отчётах лабораторных работ указывают:

1. номер и название работы;

2. цель работы;

3. схематический рисунок установки, схемы, чертежи с обозначениями отдельных элементов и приборов, пояснения этих обозначений. Для электроизмерительных приборов указывают название, систему, класс точности, предельное значение измеряемой величины, цену деления шкалы;

4. расчётные формулы (для искомых величин и погрешностей) с пояснениями обозначений;

5. таблицы с данными, полученными в эксперименте. В таблицах указывают обозначение и единицу измерения каждой физической величины. В случае отсутствия каких-либо данных ставят прочерк. Если числовые значения какой-либо физической величины имеют общий множитель, например, вида $10^{\pm n}$, то в таблицу удобно записывать не саму величину, а уменьшенную или увеличенную в $10^{\pm n}$ раз. Показания измерительных приборов часто удобно сначала записывать в делениях шкалы, а в соседнем столбце – в единицах измеряемой величины.

6. расчёт искомой величины по средним значениям прямых измерений величин, входящих в расчётную формулу;

7. расчёт погрешностей;

8. графики;

9. окончательный результат измерений;

10. выводы и замечания.

Лабораторная работа №1

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГАЗОВЫХ ЗАКОНОВ

Цель работы: изучить основные газовые законы, построить графики зависимости $p = f(T)$ и $pV = f(T)$ для воздуха и проанализировать эти графики.

Оборудование: колба с газом (воздухом), трубка-манометр с закрытым концом, водяной манометр, термостат, контактный и контрольный термометры, барометр.

Теория работы и описание установки.

Состояние определенной массы газа принято характеризовать физическими параметрами: давлением p , объемом V и температурой T . Изменение состояния газа, которое сопровождается изменением всех или нескольких из этих параметров, называется газовым процессом. Поведение газов в этих процессах подчиняется определенным газовым законам.

Для данной массы идеального газа:

при изотермическом процессе ($T = \text{const}$) $pV = \text{const}$;

при изохорном процессе ($V = \text{const}$) $\frac{p}{T} = \text{const}$;

при изобарном процессе ($p = \text{const}$) $\frac{V}{T} = \text{const}$.

В равных объемах любого газа при одинаковых давлениях и температурах содержится одинаковое количество молекул (закон Авогадро), а при нормальных условиях оно равно $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений ее компонентов (закон Дальтона):

$$p = \sum p_i.$$

Если одновременно изменяются все три параметра газа, то при постоянной массе газа ($m = \text{const}$)

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (\text{уравнение Клапейрона})$$

Для произвольной массы газа:

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (\text{уравнение Клапейрона-Менделеева})$$

где m – масса газа, M – его молярная масса, R – универсальная газовая постоянная.

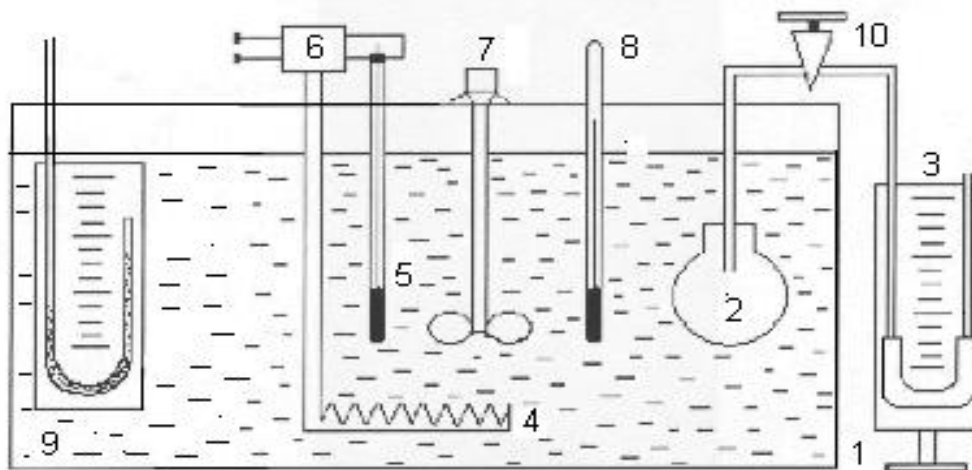


Рис. 1

В данной работе предлагается лабораторным путем построить графики зависимости $p = f(T)$ при $V = \text{const}$ и $pV = f(T)$, т.е. экспериментально проверить уравнение изохорного процесса и уравнение Клапейрона-Менделеева.

В работе используется установка (рис. 1), которая состоит из термостата 1, внутри которого находится стеклянная колба 2 с воздухом и трубка-манометр с закрытым концом 9. Системой трубок колба с воздухом 2 соединена с водяным манометром 3. Вода в термостате нагревается с помощью электрического нагревателя 4. Для этого термостат включается в электрическую сеть с напряжением 220 В. Для установления

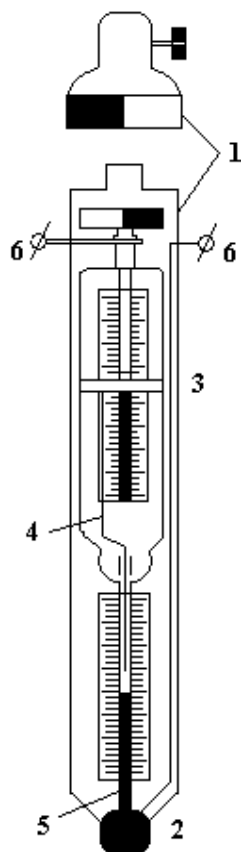


Рис. 2

необходимой температуры в термостате используется контактный термометр 5, который соединен с электромагнитным реле 6.

Контактный термометр (рис. 2) состоит из магнитной головки 1, термометра 2, ползунка 3, который может скользить по винтовому стержню, контакта 4 в виде тонкого проводка, соединенного с ползунком, и контакта 5, которым является столбик ртути термометра.

Выводы 6 этих контактов находятся в головке термометра. Если контакт 4 не дотрагивается до столбика ртути, то контактное реле, с которым соединена спираль нагревателя, находится в таком положении, при котором нагреватель включен, и температура жидкости в сосуде повышается. Если столбик ртути поднимается выше и дотрагивается до контакта 4, реле отключает нагреватель. Для того, чтобы провести нагревание дальше, необходимо поворотом магнитной головки 1 по часовой стрелке поднять ползунок 3, а вместе с ним и контакт 4 так, чтобы он не дотрагивался до столбика ртути. Реле снова включает нагреватель, температура повышается, столбик ртути поднимается до соприкосновения с контактом 4, и нагреватель снова отключается. Таким образом, при помощи контактного термометра можно регулировать и поддерживать постоянную температуру жидкости в термостате.

Вода в термостате (рис. 1) перемешивается при помощи электрической мешалки 7. Температура контролируется контрольным термометром 8. При нагревании воздуха в колбе 2 его объем и давление будут меняться. Но если перемещать подвижное правое колено манометра 3, можно добиться такого положения, когда уровень жидкости в неподвижном левом колене манометра будет при разных температурах на одном и том же делении шкалы, т.е. объем воздуха в колбе 2 можно поддерживать одинаковым при разных температурах. Давление в колбе 2 можно определить по формуле:

$$p_k = p_0 + \rho gH,$$

где H – разность уровней жидкости в трубках открытого манометра, p_0 – атмосферное давление, ρ – плотность жидкости.

Таким образом, получив в колбе несколько значений давления p_k при разных значениях температуры T воздуха в ней, можно построить график зависимости $p_k = f(T)$ и сравнить его с теоретическим.

Для экспериментальной проверки уравнения Клапейрона-Менделеева в работе используется манометрическая стеклянная трубка 9, один конец которой закрыт, и в нем над жидкостью находится столбик воздуха. При нагревании воды в термостате нагревается и воздух в трубке 9, что приводит к изменению разности уровней жидкости

в закрытом манометре. Давление, под которым находится воздух в закрытом колене манометра, будет равно:

$$p_m = p_0 \pm \rho gh,$$

где h – разность уровней жидкости в манометрической трубке.

Получив несколько значений давления воздуха в манометрической трубке при разных температурах, можно построить график $pV = f(T)$, где V – объем воздуха в манометрической трубке, и сравнить его с теоретическим:

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (1)$$

Объем воздуха в закрытом колене манометрической трубки можно определить по формуле:

$$V = Sl,$$

где l – длина столбика воздуха, S – площадь поперечного сечения трубки.

Если учесть, что площадь поперечного сечения трубки S меняется незначительно, то уравнение (1) можно представить следующим образом:

$$p_m l = \frac{mRT}{MS}$$

и построить график $p_m l = f(T)$. Очевидно, что этот график будет иметь такой же вид, как и график $p_m V = f(T)$, который отображает уравнение Клапейрона-Менделеева.

Порядок выполнения работы

1. Определить по барометру атмосферное давление p_0 .
2. Открыть кран 10 так, чтобы давление в колбе 2 и в манометре 3 было одинаковым и равнялось атмосферному давлению.
3. Путем перемещения трубки подвижного колена манометра установить уровень жидкости в неподвижном колене на нулевую отметку.
4. Измерить длину воздушного столба l в манометрической трубке 9 и разность уровней жидкости h .
5. Измерить начальную температуру на термометре T_1 .
6. Включить термостат и снять необходимые показания l , h , H , при разных температурах (не менее 5 измерений).
7. Результаты измерений записать в таблицу (плотность воды в зависимости от температуры указана в приложении):

№ п/п	p_0 , Па	T , К	ρ , кг/м ³	p_k , Па	H , м	h , м	l , м	p_m , Па	$p_m l$, Па·м
1									
2									
3									
4									
5									

8. Рассчитать давление воздуха в колбе по формуле $p_k = p_0 + \rho gH$ и в манометрической трубке по формуле $p_m = p_0 + \rho gh$.

Вычисления:

$$p_{к1} =$$

$$p_{м1} =$$

$$p_{к2} =$$

$$p_{м2} =$$

$$p_{к3} =$$

$$p_{м3} =$$

$$p_{к4} =$$

$$p_{м4} =$$

$$p_{к5} =$$

$$p_{м5} =$$

9. Построить графики зависимости $p_k = f(T)$ при $V = \text{const}$ (рис.1) и $p_m l = f(T)$ (рис.2), проанализировать их.

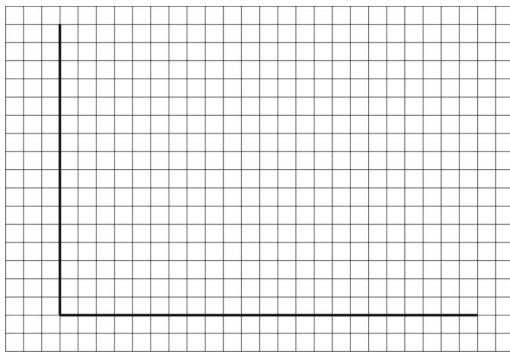


Рис. 1

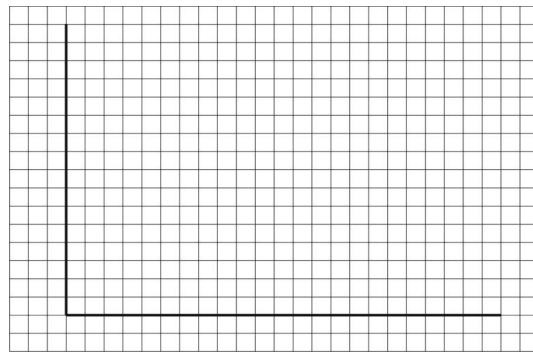


Рис. 2

Анализ зависимостей $p_k = f(T)$ и $p_m l = f(T)$:

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. Какой газ называется идеальным?
2. Какой процесс называется изопроцессом?
3. В каком состоянии реальные газы можно принять за идеальные газы?
4. Сформулировать основные законы идеального газа.
5. Изобразить графически основные газовые законы в разных координатных осях (pV , pT , VT).

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЯРНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ И СРЕДНЕЙ КВАДРАТИЧНОЙ СКОРОСТИ МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

Цель работы: определить молярную газовую постоянную и среднюю квадратичную скорость молекул воздуха.

Оборудование: стеклянный шар для взвешивания воздуха, резиновая трубка, винтовой зажим, металлический манометр, насос, технические весы, термометр, разновесы, мензурка.

Теория работы и описание установки

Молярную газовую постоянную можно определить путем сравнения двух различных состояний воздуха, который находится в стеклянном шаре. Пусть в шаре объемом V при давлении p_1 и температуре T содержится воздух массой m_1 . Тогда состояние газа можно описать уравнением Клапейрона-Менделеева:

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} RT, \quad (1)$$

где M – молярная масса воздуха, R – молярная газовая постоянная.

Путем откачивания воздуха из шара без изменения его температуры можно получить второе состояние газа, которое характеризуется параметрами m_2 , p_2 , V и T . Уравнение Клапейрона-Менделеева для этого случая будет таким:

$$p_2 V = \frac{m_2}{M} RT. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) получаем, что

$$(p_2 - p_1)V = \frac{(m_2 - m_1)}{M} RT,$$

отсюда молярная газовая постоянная:

$$R = \frac{MV(p_2 - p_1)}{T(m_2 - m_1)} = \frac{MV\Delta p}{T\Delta m}. \quad (3)$$

В уравнении (3) $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, объем шара $V = 1,27 \cdot 10^{-3}$ м³. Температура воздуха определяется термометром, а давление воздуха в шаре – манометром.

Для определения разности масс Δm необходимо определить массу шара с воздухом для первого и второго состояний и найти их разность.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из стеклянного шара А, который резиновой трубкой соединяется с манометром М. На резиновую трубку надевается винтовой зажим В. Манометр резиновой трубкой соединяется также с насосом К.

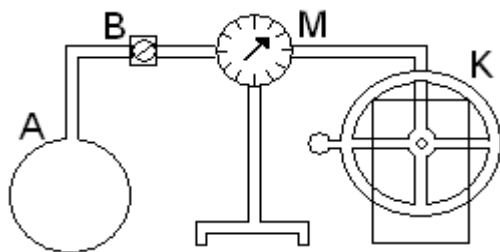


Рис. 1

Средняя квадратичная скорость молекул газа определяется по формуле:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (4)$$

Подставим (3) в (4). Получим

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3\Delta p V}{\Delta m}} \quad (5)$$

Зная объем колбы V , массу откачанного воздуха Δm и уменьшение давления Δp , по формуле (5) можно определить среднюю квадратичную скорость молекул воздуха.

Порядок выполнения лабораторной работы Определение молярной газовой постоянной

1. С помощью технических весов определить массу стеклянного шара вместе с резиновой трубкой, винтовым зажимом и воздухом, который находится внутри шара.
2. Присоединить стеклянный шар к манометру, как это показано на рис. 1, и поставить на нем краны в положение «открыто».
3. Насосом откачать воздух из шара приблизительно до $(0,4-0,5) \cdot 10^5$ Па. Определить разность давлений Δp .
4. Закрыть краны манометра и зажать резиновую трубку винтовым зажимом так, чтобы в шар не поступал воздух.
5. С помощью технических весов определить массу шара после откачки из него части воздуха.
6. Определить массу откачанного воздуха Δm .
7. Повторить опыт при различных значениях понижения давления Δp в шаре. Данные измерений занести в таблицу.

Таблица 1

№ п/п	Δp , Па	Δm , кг	R , Дж/(моль·К)
1			
2			
3			
ср	-----	-----	

8. Выслить по формуле (3) универсальную газовую постоянную R и найти ее среднее значение $\langle R \rangle$. Результаты вычислений занести в таблицу 1.

9. Рассчитать погрешности для одного из измерений.

Вычисления:

$$M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}, \quad V = 1,27 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

$$T =$$

$$R_1 =$$

$$R_2 =$$

$$R_3 =$$

$$\langle R \rangle =$$

Расчет погрешности измерений

Записать окончательный результат:

$$R = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \%$$

Определение средней квадратичной скорости молекул воздуха

1. Насосом откачать воздух из шара приблизительно до $(0,4-0,5) \cdot 10^5$ Па. Определить разность давлений Δp .
2. С помощью технических весов определить массу шара с воздухом, резиновой трубкой, винтовым зажимом.
3. Откачать с помощью насоса часть воздуха из шара и еще раз определить массу шара с резиновой трубкой и винтовым зажимом.
4. Определить массу Δm откачанного из шара воздуха.
5. Опустить конец резиновой трубки в сосуд с водой и ослабить винтовой зажим. Вода заполнит объем шара, который занимал откачанный воздух.
6. Определить объем воды V в шаре с помощью мерного сосуда (мензурки).
7. Опыт (пп 1-5) повторить несколько раз. Данные измерений занести в таблицу 2.
8. По формуле (5) вычислить величину $\langle v_{\text{кв}} \rangle$. Определить ее среднее значение. Данные вычислений занести в таблицу 2.
9. Рассчитать погрешности для одного из измерений.

Таблица 2

№ п/п	Δp , Па	V , м ³	Δm , кг	$\langle v_{\text{кв}} \rangle$, м/с
1				
2				
3				
ср	-----	-----	-----	

Вычисления:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle_1 =$$

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle_2 =$$

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle =$$

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle_3 =$$

Расчет погрешности измерений

Записать окончательный результат:

$$\langle V_{\text{кв}} \rangle = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \%$$

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. Записать уравнение Клапейрона-Менделеева и объяснить его.
2. Каков физический смысл молярной газовой постоянной?
3. При каких условиях воздух считают идеальным газом?
4. Сформулировать основные законы идеального газа.
5. От каких параметров газа зависит средняя квадратичная скорость его молекул?
6. Получить расчетную формулу для определения R .

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ БАРОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМУЛЫ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Цель работы: исследовать зависимость атмосферного давления от высоты и распределение частиц по высоте в поле силы тяжести Земли.

Оборудование: барометр, термометр, ПЭВМ.

Теория работы и описание установки

Барометрическая формула – это уравнение, которое выражает зависимость атмосферного давления от высоты h над поверхностью Земли:

$$p = p_0 \exp\left[\frac{-m_0 gh}{kT}\right] \quad \text{или} \quad p = p_0 \exp\left[\frac{-Mgh}{RT}\right],$$

где p_0 – атмосферное давление на высоте $h = 0$, m_0 – масса молекулы, M – молярная масса воздуха, R – молярная газовая постоянная. Эта формула является приближенной, поскольку предполагается, что температура T по всей высоте воздушного столба одинаковая и ускорение свободного падения g изменяется незначительно в пределах рассматриваемых высот.

Из барометрической формулы видно, что значение атмосферного давления p зависит как от высоты h , так и от температуры T столба воздуха. В лабораторной работе нужно исследовать зависимость атмосферного давления от этих величин.

При проведении исследований необходимо проделать большое количество вычислений, построить соответствующие графики. Поэтому вычисления проводятся на ПЭВМ. В ЭВМ вводится специальная программа. На экране монитора результаты исследований имеют вид таблиц, графиков. Их необходимо проанализировать и сделать выводы.

ЭВМ работает в диалоговом режиме. Внимательно познакомьтесь с текстами, которые будут появляться на экране. Затем выполняйте те операции и действия, которые требует машина. При появлении команды «Ввести любой символ» необходимо набрать на клавиатуре любую букву или цифру, или любую комбинацию букв или цифр. Потом необходимо нажать клавишу «ввод». Чтобы избежать сбоя в работе ЭВМ при вводе значений физических величин (давления p , температуры T и т.д.), необходимо набирать на клавиатуре только численные значения этих величин, в соответствии с их размерностью. Наименования набирать не нужно. При наборе цифр с дробной частью необходимо помнить, что дробная часть отделяется от целой точкой, а не запятой, как это принято обычно. Например, набирать нужно 9.81; 0.032, к тому же при желании ноль целых можно не набирать. Тогда цифры, которые набираются, могут иметь вид .002; .028 и т.д.

При наборе значений высот необходимо иметь в виду следующее. Минимальная высота h_{\min} может быть любой, но лучше начать исследования с $h_{\min} = 0$. Максимальную высоту лучше взять в пределах 20–40 км (подумайте, почему?). Для построения графиков зависимости атмосферного давления p от высоты h достаточно иметь 10-15 точек. Поэтому шаг изменения высоты dh следует взять в пределах 2-4 км. Можно взять и меньшее значение шага, но в этом случае получается много рабочих точек, таблицы значений будут длинными, что усложняет обработку результатов исследований.

Концентрация молекул газа n на высоте h над поверхностью Земли равна

$$n = n_0 \exp\left[-\frac{m_0 g h}{kT}\right] \quad \text{или} \quad n = n_0 \exp\left[-\frac{Mgh}{RT}\right],$$

где n_0 – концентрация молекул газа на высоте $h = 0$, n – концентрация молекул газа на высоте h . Мы видим, что число молекул газа n в единице объема в поле силы тяжести Земли зависит как от высоты h , так и от молярной массы M газа и его температуры T .

Исследование распределения молекул газа по высоте состоит из двух частей. Сначала необходимо выяснить, как влияет значение молярной массы газа M на распределение молекул при $T = \text{const}$, а затем исследовать влияние температуры.

Для упрощения будет рассчитываться не концентрация молекул n на данной высоте h , а часть молекул $z = n/n_0$, которая находится на этой высоте.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Исследование барометрической формулы

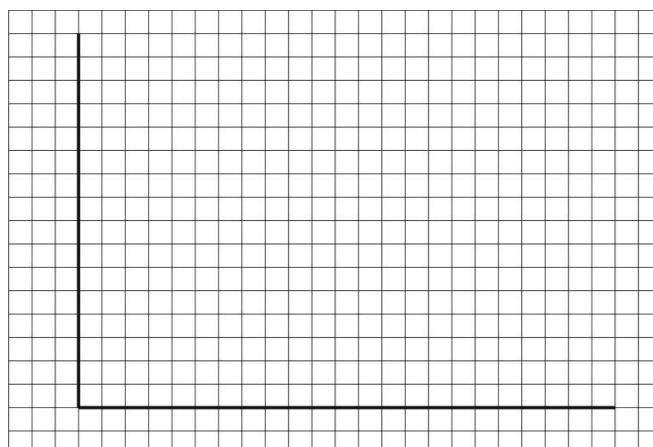
1. Определить по барометру атмосферное давление p_0 (в паскалях).
2. Выбрать минимальную h_{\min} и максимальную h_{\max} высоту (в метрах) над уровнем Земли и шаг изменения высоты dh .
3. Измерить комнатную температуру и перевести ее в кельвины.
4. Получить на экране монитора таблицу значений атмосферных давлений p на различных высотах h . Переписать полученные данные в таблицу 1.

Таблица 1

№	h , м	p , Па		
		$T_{11} =$	$T_{12} =$	$T_{13} =$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				

5. Провести аналогичные исследования для температур выше и ниже комнатной. Для того, чтобы графики зависимости атмосферного давления p от высоты заметно отличались от графика, полученного для комнатной температуры, температуры должны быть на 50–70 К больше или меньше комнатной. Полученные данные занести в таблицу 1.

6. Перечертить полученные графики зависимости атмосферного давления p от высоты h , проанализировать их и сделать выводы.



Вывод:

Упражнение 2. Исследование распределения по высоте молекул газа в поле силы тяжести Земли

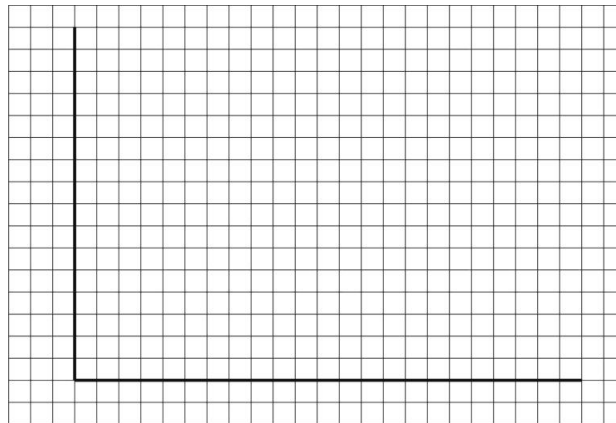
1. Запустить программу по исследованию распределения молекул по высоте.
2. Выбрать минимальную h_{\min} и максимальную h_{\max} высоту (в метрах) над уровнем Земли и шаг изменения высоты dh .
3. Измерить комнатную температуру T .
4. Выбрать газ, распределение молекул которого необходимо исследовать, определить его молярную массу по таблице приложения.
5. Получить и переписать (в таблицу 2) значения части молекул $z = n/n_0$, которые находятся на высоте h .
6. Провести аналогичные исследования распределения молекул для других газов, которые имеют молярную массу M меньшую и большую, чем у первого газа. Чтобы графики зависимости части молекул z от высоты h значительно отличались друг от друга, выбрать газы, у которых молярные массы существенно разнятся. Полученные результаты вписать в таблицу 2.

T, K	
--------	--

Таблица 2

№	h, m	Z		
		$M_{11} =$	$M_{12} =$	$M_{13} =$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				

7. Перечертить полученные графики.



Вывод:

8. Снова выбрать газ, распределение молекул которого нужно исследовать. Определить его молярную массу M .

$$M = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кг/моль.}$$

9. Выбрать минимальную h_{\min} и максимальную h_{\max} высоту (в метрах) над уровнем Земли и шаг изменения высоты dh .

$$h_{\min} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ м; } \quad h_{\max} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ м; } \quad dh = \underline{\hspace{2cm}} \text{ м.}$$

10. Получить на экране монитора таблицу значений части молекул $z = n/n_0$ на высоте h для комнатной температуры T . Переписать данные в таблицу 3.

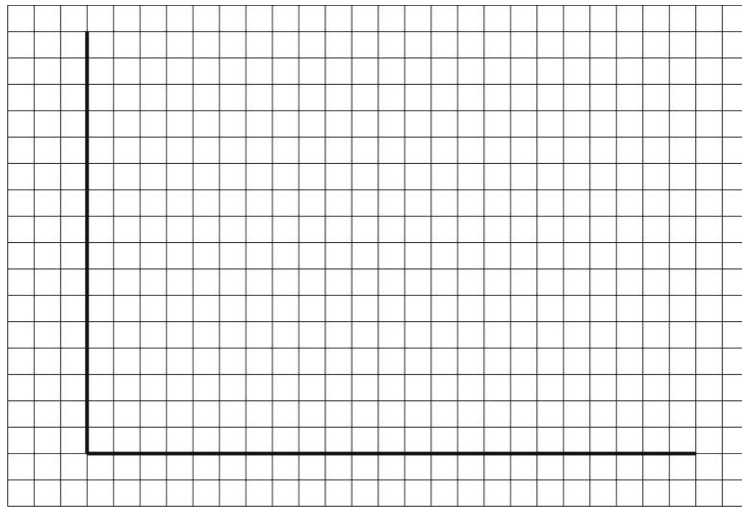
11. Провести исследование для температур выше и ниже комнатной. Чтобы полученные графики заметно отличались друг от друга, температуры должны отличаться от комнатной на 50-70 К. Полученные результаты вписать в таблицу 3.

M , кг/моль	
---------------	--

Таблица 3

№	h , м	z		
		$T_1 =$	$T_2 =$	$T_3 =$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				

12. Перечертить полученные графики, проанализировать их и сделать выводы.



Вывод:

Общий вывод:

Контрольные вопросы:

1. Какова природа атмосферного давления?
2. Как зависит атмосферное давление от высоты? Почему?
3. Записать барометрическую формулу. Объяснить ее.
4. Какими приборами измеряется атмосферное давление?
5. Как изменяется концентрация молекул с высотой в поле силы тяжести Земли?
6. Записать формулу распределения Больцмана.
7. Как влияет на распределение молекул действие силы тяжести и их тепловое движение?
8. Из каких газов, в основном, состоят верхние слои атмосферы?

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА C_p/C_v МЕТОДОМ РУХАРДТА

Цель работы: измерить показатель адиабаты, т.е. отношение молярных теплоемкостей при постоянном давлении и при постоянном объеме $\gamma = C_p/C_v$ воздуха и проверить формулу для γ , следующую из классической теории теплоемкости газов:

$$\gamma = (i + 2)/i, \quad (1)$$

где i – число степеней свободы у молекул газа, по методике, впервые предложенной Рухардтом.

Оборудование: сосуд с исследуемым газом (воздухом), секундомер (таймер), барометр, воздуходувка, блок питания, шланги, зажимы. Задача снабжена программой обработки экспериментальных данных на персональном компьютере.

Теория работы и описание установки

Если взять прецизионно изготовленную стеклянную трубку, расположить ее вертикально, закрыть нижний конец и бросить в нее сверху стальной шарик, диаметр которого на несколько сотых долей миллиметра меньше диаметра трубки, то шарик, прежде чем упасть на дно трубки, совершит несколько быстрых колебаний, при которых роль упругого элемента играет газ в трубке под шариком.

Рухардт впервые предложил использовать это явление для измерения показателя адиабаты γ . Он заметил, что газ в трубке не находится в чисто адиабатических условиях, поскольку нельзя пренебречь его теплообменом с окружающей средой. Для уменьшения теплообмена целесообразно увеличить объем, присоединив трубку к большому сосуду с газом, например, вставив ее нижний конец через пробку в горлышко какой-либо бутылки. Это позволит считать процесс изменения состояния газа в бутылки при колебаниях шарика в трубке адиабатическим и сильно упростит теорию опыта.

Рухардт, кроме того, предложил пренебречь утечкой газа через зазор между стенкой трубки и шариком и не учитывать трение, поскольку затухание невелико – шарик до остановки успевает совершить порядка десяти колебаний. Если шарик массы m находится в трубке в равновесии, то давление в ее нижней части определяется по формуле:

$$p = p_0 = mg/S, \quad (2)$$

где p_0 – атмосферное давление, S – площадь поперечного сечения шарика (и трубки), mg – его вес. Если шарик смещен относительно положения равновесия на расстояние x , то на него действует возвращающая сила Sdp , где dp – приращение давления, возникающее из-за изменения объема газа, заключенного под шариком в бутылки и трубке, на величину $dV = Sx$. Так как процесс можно считать адиабатическим, а газ – идеальным, то давление и объем связаны между собой уравнением адиабаты:

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (3)$$

а связь между их приращениями находится дифференцированием:

$$dp = -\gamma p \frac{dV}{V} = -\gamma p \frac{Sx}{V}. \quad (4)$$

Тогда уравнение движения шарика имеет вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = Sdp = -\gamma p \frac{S^2 x}{V}, \quad (5)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\gamma p S^2}{mV} x = 0 \quad (6)$$

или

Это уравнение гармонического осциллятора. Квадрат частоты его собственных колебаний:

$$\omega_0^2 = \frac{\gamma p S^2}{mV}, \quad (7)$$

период колебаний:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \left(\frac{mV}{S^2 p \gamma} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Поскольку $S = \pi d^2/4$, где d – диаметр шарика, для показателя адиабаты γ из (8) имеем:

$$\gamma = \frac{64mV}{d^4 p T_0^2}. \quad (9)$$

Это соотношение является основной расчетной формулой метода Рухардта. Из нее видно, что показатель адиабаты пропорционален отношению V/T_0^2 , так что увеличение объема приводит к росту периода колебаний и повышает точность измерений, поскольку большие периоды можно измерять с большей точностью.

Формула (9) является приближенной, поскольку при ее выводе не учитывались трение и утечка газа из бутылки. Реальное число колебаний, как уже отмечалось, редко превышает десять, что накладывает неустранимые ограничения на точность измерения периода и точность определения γ .

Позднее Фламмерсфельдом была предложена модификация метода, позволяющая резко увеличить его точность. Если компенсировать утечку газа путем поддува его в бутылку через небольшое отверстие, то в некоторых случаях удается получить незатухающие автоколебания шарика в трубке. Такой режим, очевидно, возможен, когда энергия, теряемая системой за один период колебаний из-за наличия трения, компенсируется поступлением энергии за счет работы насоса, осуществляющего подачу газа, причем поступление энергии регулируется самой системой. Режим незатухающих установившихся колебаний позволяет наблюдать любое желаемое число колебаний и значительно повышает точность измерения периода. Шарик был заменен на цилиндр, на боковой поверхности которого сделан ряд проточек. Они служат для выравнивания давления по периметру цилиндра и улучшают его центровку в трубке. Вместо прецизионных цилиндрических трубок использовались конические, диаметр которых в верхней части на несколько десятых долей миллиметра больше, чем в нижней, или трубки с маленьким пропилом (площадью около 1 мм^2) в средней части, сделанным для отвода газа. Наличие пропила облегчает установление автоколебательного режима, а его место играет роль положения равновесия цилиндра в трубке.

Рассмотрим механизм, приводящий к возникновению автоколебаний. Наличие пропила в середине трубки или конусообразности самой трубки приводит к тому, что скорость утечки газа зависит от положения цилиндра. Когда цилиндр находится ниже пропила, скорость утечки газа меньше скорости притока от насоса, а когда выше – больше. В среднем за период установившихся колебаний утекает столько же газа, сколько притекает, но при этом появляются дополнительные силы давления, работа которых и компенсирует потери энергии на трение. При движении цилиндра снизу вверх

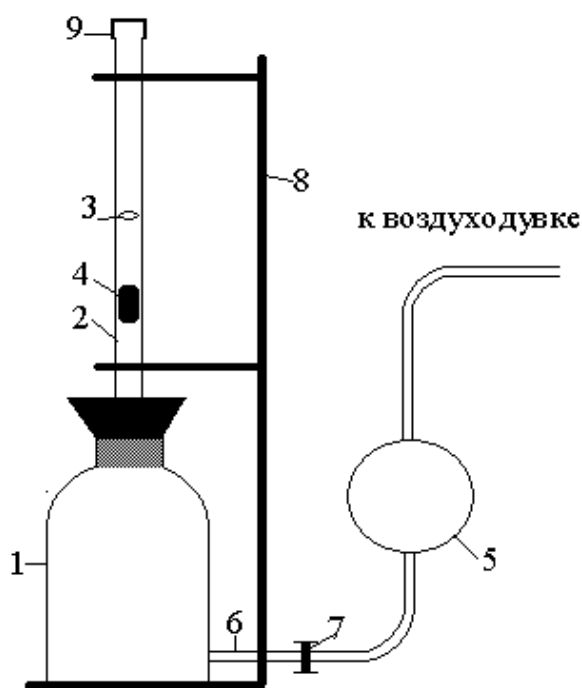


Рис. 1

от наинизшего положения количество газа в бутылке за счет большей скорости его притока будет больше, чем в приборе Рухардта при отсутствии утечки и притока газа. Дополнительная сила давления этого газа направлена вверх и компенсирует силу трения, направленную вниз. После достижения наивысшего положения при движении цилиндра вниз за счет большей скорости оттока количество газа в бутылке будет меньше, чем в приборе Рухардта, и дополнительная сила давления будет направлена вниз, опять-таки компенсируя силу трения, направленную против движения, т.е. вверх. Таким образом, система сама регулирует подачу энергии, меняя скорость притока и оттока газа, и возможно установление автоколебаний, частота и амплитуда которых определяются параметрами системы. Амплитуда за счет нелинейных процессов в системе устанавливается такой, при которой работа дополнительных

сил за период колебаний по величине точно равна работе сил трения (предельный цикл колебаний), а частота при малых потерях на трение, должна быть близка к частоте собственных незатухающих колебаний, определяемой формулой (7).

В работе используется установка, общий вид которой изображен на рис. 1: 1 – бутылка с исследуемым газом; 2 – коническая трубка; 3 – пропил; 4 – цилиндр; 5 – фильтр; 6 – впускная трубка; 7 – регулировочный зажим; 8 – стойка с держателями; 9 – наконечник трубки с отверстиями.

Сверху трубка 2 прикреплена к стойке специальным наконечником с отверстиями для выпуска газа, этот наконечник предотвращает выброс цилиндра из трубки в случае резкого повышения давления в бутылке и при смещении вниз может закрывать трубку. К прибору прилагаются шланги, регулировочный зажим, секундомер для измерения периода колебаний и барометр для измерения атмосферного давления. В качестве источника воздуха используется сеть со сжатым воздухом. Прибор устанавливается на столе таким образом, чтобы трубка находилась в вертикальном положении, и соединяется шлангом с источником газа. На шланг вблизи впускного отверстия бутылки ставится регулировочный зажим.

Порядок выполнения работы

1. Перед началом измерений убедиться в том, что отверстия для выхода газа из наконечника трубки открыты, затем включить воздуходувку. Рабочий расход газа невелик, так что пускать газ следует очень осторожно, почти перекрыв шланг регулировочным зажимом.

2. Меняя подачу газа регулировочным зажимом, добиться подъема цилиндра со дна трубки примерно до ее середины и возникновения его устойчивых колебаний вокруг середины трубки или того места, где сделан пропил. Регулировочное кольцо на трубке с пропилом установить так, чтобы амплитуда колебаний была не слишком велика, а поток газа из отверстия пропила был как можно меньше, но колебания оставались устойчивыми. Отклонения цилиндра вверх и вниз от положения равновесия должны быть одинаковыми в течение всего процесса измерений; для контроля на трубке на равных расстояниях от этого места снаружи наклеены кольца. При колебаниях цилиндр не должен ударяться о пробку бутылки и наконечник трубки, колебания должны быть практически бесшумными, без заметного дребезга и трения о стенки трубки.

3. После получения установившихся колебаний приступить к измерениям их периода. Для этого при помощи секундомера измерить время, в течение которого цилиндр совершает достаточно большое целое число циклов колебаний, например, 100 или 200. Измерения этого времени повторить не менее пяти раз. Затем рассчитать среднее арифметическое значение периода колебаний.

Параметры установки – V , d , и m , а также их стандартные отклонения указаны на подставке прибора и должны быть приведены в отчете. В массу цилиндра должна быть внесена поправка, учитывающая присоединенную массу газа в трубке, который совершает колебания вместе с цилиндром. В формулу (9) вместо m надо подставлять величину $m + \Delta m$, где $\Delta m = \rho l S$ (ρ – плотность газа, l – длина трубки, которую можно измерить линейкой).

4. Атмосферное давление измерить барометром.

Вычисления:

$$m + \Delta m =$$

$$\gamma_1 = \frac{\quad}{\quad} =$$

$$\gamma_4 = \frac{\quad}{\quad} =$$

$$\gamma_2 = \frac{\quad}{\quad} =$$

$$\gamma_5 = \frac{\quad}{\quad} =$$

$$\gamma_3 = \frac{\quad}{\quad} =$$

$$\langle \gamma \rangle = \frac{\quad}{5} =$$

5. После вычисления величины γ рассчитать ошибку ее определения с учетом погрешностей всех величин, входящих в формулу (9). Полученные данные и параметры установки занести в таблицы:

p , Па	m , кг	V , м ³	d , м

№	t , с	T_0 , с	γ
1			
2			
3			
4			
5			
ср			

6. Провести обработку результатов эксперимента на персональном компьютере. При этом компьютер будет запрашивать все параметры установки и их стандартные отклонения в удобных единицах, без перевода в систему СИ. Поправка к массе цилиндра будет также автоматически учтена после ввода длины трубки. В компьютер вводится число измеряемых периодов и массив полученных времен, а расчет среднего значения периода и его погрешности осуществляется компьютером перед вычислением γ . В конце обработки выдается значение γ , найденное по формуле (9), и его стандартное отклонение. Записать выданный результат и сравнить его с рассчитанным в п.5.

Расчет погрешности измерений

Записать окончательные результаты:
 $\gamma = (\quad \pm \quad)$; $\varepsilon = \quad \%$ – экспериментально;
 $\gamma = (\quad \pm \quad)$; $\varepsilon = \quad \%$ – по компьютерной модели.

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. Что такое теплоемкость газа? Какова размерность этой физической величины?
2. Какова связь между C_p , C_V и числом i степеней свободы у молекул газа?
3. Как изменяется качественно теплоемкость двухатомного газа, например, H_2 , от температуры.
4. У какого из газов – H_2 , He, CH_4 , $\gamma = C_p/C_V$ имеет наибольшее значение?
- 5 Назвать условия возникновения автоколебаний. От чего зависит амплитуда колебаний в автоколебательном процессе?

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы: измерить вязкость машинного масла.

Оборудование: штатив, стеклянная трубка с машинным маслом, пипетка, стакан, секундомер, линейка.

Теория работы и описание установки

Для жидкостей характерна достаточно плотная упаковка молекул (об этом свидетельствует их малая сжимаемость). Поэтому каждая молекула, постоянно сталкиваясь с соседними молекулами, в течение некоторого времени колеблется около определенного положения равновесия. Время от времени молекула, получив от соседних молекул достаточную энергию, скачком переходит в новое положение равновесия. Дальность этого скачка δ примерно равна размеру молекул (10^{-10} м). Среднее время $\langle \tau \rangle$, в течение которого молекула колеблется около данного положения равновесия, называется временем оседлой жизни молекулы. Расчеты показывают, что

$$\langle \tau \rangle = \langle \tau_0 \rangle \exp\left[\frac{\Delta E}{kT}\right], \quad (1)$$

где $\langle \tau_0 \rangle$ – средний период колебания молекулы; ΔE – минимальная энергия, которую нужно сообщить молекуле жидкости, чтобы она могла перейти из одного положения равновесия в другое ($\Delta E \sim 10^{-20}$ Дж); k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура жидкости. Для воды при комнатной температуре $\langle \tau_0 \rangle \sim 10^{-13}$ с, а $\langle \tau \rangle \sim 10^{-11}$ с. С повышением температуры подвижность молекул возрастает, время оседлой жизни уменьшается.

При движении жидкости (или газа) между слоями, перемещающимися с различной скоростью, возникают силы внутреннего трения (вязкости). Эти силы направлены так, что ускоряют медленно движущиеся слои и замедляют быстро движущиеся.

Рассмотрим ламинарный поток жидкости в направлении оси Y (рис.1). Слои жидкости движутся с разными скоростями. Скорости двух слоев, отстоящих друг от

друга на расстояние dx , отличаются на dv . Величина $\frac{dv}{dx} \vec{n}$ – градиент скорости – показывает, как быстро изменяется скорость слоев вдоль оси X . Здесь \vec{n} – единичный вектор в направлении максимального возрастания скорости (в нашем случае в отрицательном направлении оси X).

Ньютон установил, что модуль силы внутреннего трения между слоями:

$$F = -\eta \frac{dv}{dx} S_n, \quad (2)$$

где η – коэффициент пропорциональности, называемый вязкостью (коэффициентом вязкости) жидкости; площадку S_n ориентирована перпендикулярно к градиенту скорости. Между слоями жидкости будет происходить передача импульса. По второму закону Ньютона $\frac{dp}{dt} = F$.

С учетом (2) имеем:

$$dp = -\eta \frac{dv}{dx} S_n dt, \quad (3)$$

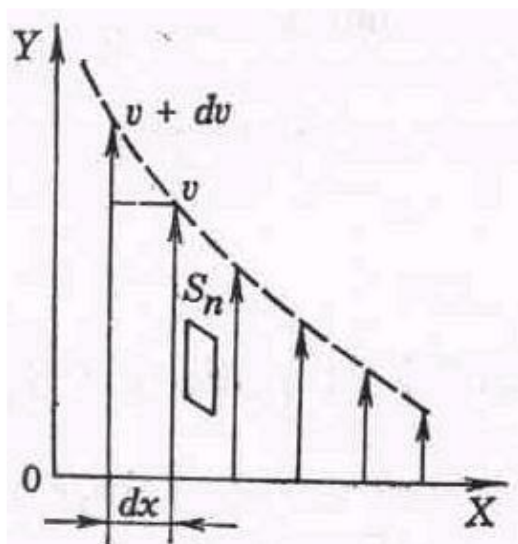


Рис. 1

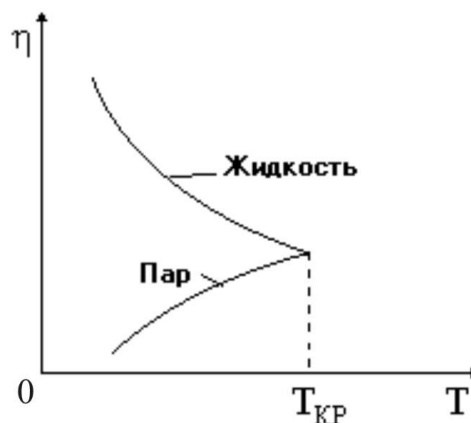


Рис. 2

где dp – величина импульса, переносимого за время dt от слоя к слою через поверхность S_n , перпендикулярную к направлению переноса импульса. Знак минус указывает, что импульс переносится от слоев, движущихся с большей скоростью, к слоям, движущимся с меньшей скоростью (в нашем случае вдоль оси X).

Импульс, переносимый через единичную площадку, расположенную перпендикулярно к переносимому потоку импульса за единицу времени, называется плотностью потока импульса \vec{L}_p :

$$L_p = \frac{dp}{S_n dt} = -\eta \frac{dv}{dx} \quad (4)$$

Соотношения (2), (3), (4) являются различными формами записи основного закона вязкости – **закона Ньютона**. Физический смысл коэффициента вязкости η можно определить из этих соотношений. Например, из (4) следует, что коэффициент вязкости η определяется плотностью потока импульса при градиенте скорости, равном единице.

Коэффициент вязкости жидкости зависит от ее химического состава, примесей и температуры. С повышением температуры T коэффициент вязкости жидкости уменьшается по закону:

$$\eta = A \exp\left[-\frac{\Delta E}{kT}\right] \quad (5)$$

Здесь коэффициент A для каждой конкретной жидкости можно приближенно считать постоянным.

Коэффициент вязкости газов (паров) в отличие от жидкостей с повышением температуры медленно увеличивается ($\sim \sqrt{T}$), при критической температуре $T_{кр}$ коэффициент вязкости жидкости и ее пара уравниваются (рис.2). Разный характер температурной зависимости коэффициента вязкости жидкостей и газов указывает на различие механизмов внутреннего трения в них. В газах перенос импульса осуществляется при переходе молекул из слоя в слой благодаря тепловому движению. В жидкостях большую часть времени молекулы колеблются около положения равновесия, скачкообразные переходы редки. Так как молекулы жидкости находятся близко друг к другу, силы молекулярного сцепления между ними значительны. Поэтому одни слои жидкости

увлекают (тормозят) соседние слои в основном за счет сил притяжения. Перенос импульса вследствие скачкообразных переходов молекул не играет решающей роли. С повышением температуры расстояния между молекулами увеличиваются, а силы притяжения уменьшаются и, как следствие, уменьшается вязкость.

Приборы для измерения коэффициента вязкости называются вискозиметрами. Существует несколько методов определения коэффициента вязкости: метод Стокса, основанный на измерении скорости падения шарика в исследуемой жидкости; метод Пуазейля, в основе которого лежит измерение объема жидкости (газа), протекающей через капиллярную трубку; метод затухающих колебаний тела, подвешенного на упругой нити в исследуемой среде, и другие. Мы воспользуемся методом Стокса.

Стокс установил, что сила внутреннего трения, действующая на шарик радиусом r , движущийся со скоростью v в жидкости, определяется по формуле:

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

Пусть плотность материала шарика ρ , а плотность исследуемой жидкости $\rho_0 < \rho$. Тогда на шарик, погруженный в жидкость, действует направленная вниз сила $F_1 = F_{\text{тяж}} - F_A$:

$$F_1 = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0)g \quad (7)$$

Если шарик отпустить, то под действием силы F_1 он начнет падать. Его скорость вначале возрастает и, следовательно, возрастает сила внутреннего трения. Затем наступает такой момент, когда суммарная сила, действующая на шарик, станет равна нулю. После этого шарик падает с некоторой постоянной (установившейся) скоростью v . При равномерном падении

$$\frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0) \cdot g - 6\pi\eta r v = 0 \quad (8)$$

отсюда скорость

$$v = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho - \rho_0}{\eta} \quad (9)$$

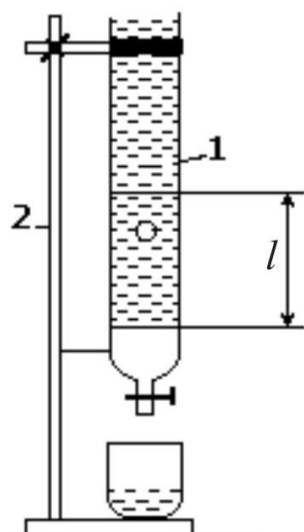


Рис. 3

Соотношение (9), строго говоря, справедливо лишь тогда, когда шарик падает в безграничной среде. Если шарик падает вдоль оси трубки радиусом R , в (9) необходимо ввести поправку, учитывающую наличие стенок трубки. У стенок исследуемая жидкость покоится, а пограничный слой жидкости около шарика движется вместе с ним. Это приводит к увеличению градиента скорости, и, следовательно, скорость равномерного падения шарика в трубке будет меньше, чем в безграничной среде. Учет этого обстоятельства приводит к следующему выражению:

$$v = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho - \rho_0}{\eta(1 + 2,4r/R)} \quad (10)$$

Формула (10) применима к недеформирующимся шарикам.

Для случая падения капель жидкости, как показывает теория, коэффициент $2/9$ надо заменить на $1/3$. Тогда вязкость

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{gr^2(\rho - \rho_0) \cdot t}{(1 + 2,4r/R) \cdot l} \quad (11)$$

где $l = vt$ – расстояние, проходимое каплей за время t

В работе используется установка, изображенная на рис. 3.

В стеклянной трубке 1, закрепленной на штативе 2, находится исследуемая жидкость (машинное масло).

Порядок выполнения работы

1. Определить путем взвешивания массу пустого стакана (m_1).
2. Накапать в него 50-100 капель воды из пипетки.
3. Определить массу стакана с водой (m_2) и найти массу воды $m_0 = m_2 - m_1$.
4. Рассчитать радиус капли

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 m_0}{4 \pi \rho n}}$$

5. Измерить расстояние l между метками на трубке.
6. Из пипетки капнуть одну каплю воды в трубку.
7. Определить время t прохождения каплей этого расстояния l .
8. Повторить измерение времени прохождения расстояния l каждой из 5-ти капель. Вычислить среднее значение времени.
9. По формуле (11) рассчитать коэффициент вязкости масла, взяв среднее значение времени, вычисленное в п. 8 Сравнить полученный результат с табличным (см. приложение).
10. Данные опыта занести в таблицы.

№	1	2	3	4	5	ср
t, c						

$m_1, кг$	$m_2, кг$	$m_0, кг$	$r, м$	$R, м$	$l, м$	$\eta, кг/м \cdot c$
				0,015		

11. Рассчитать погрешности измерений.

Вычисления:

$$r =$$

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{m_0 g}{4 \pi R l} =$$

Расчет погрешностей

Записать окончательный результат:
 $\eta = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \%$

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. В чем различие механизмов вязкости в жидкостях и в газах?
2. Каков физический смысл коэффициента вязкости η ?
3. Как зависит коэффициент вязкости жидкостей от температуры?

Лабораторная работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ КАПИЛЯРНОГО ВИСКОЗИМЕТРА

Цель работы: изучить зависимость коэффициента вязкости жидкости от температуры и определить энергию активации; научиться определять вязкость жидкости; изучить капиллярный метод определения вязкости жидкости; найти и проанализировать зависимость коэффициента вязкости жидкости от температуры.

Оборудование: цилиндрический сосуд, капиллярный вискозиметр, резиновая груша, секундомер, нагреватель, ЛАТР, термометр.

Теория работы и описание установки

При движении с различными скоростями слоев жидкости или газа между ними возникает трение, названное внутренним трением или вязкостью. В дополнение к этому между слоями молекул, смещающихся друг относительно друга, существуют силы взаимодействия. Сила внутреннего трения определяется из **уравнения Ньютона**:

$$F_{mp} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} S, \quad (1)$$

где η (греч. «этта») - коэффициент внутреннего трения или вязкости; $\Delta v/\Delta x$ - градиент скорости; S - площадь соприкасающихся слоев.

Сила внутреннего трения *прямо пропорциональна градиенту скорости и площади соприкасающихся слоев.*

Если выразить из (1) коэффициент вязкости η , то получим:

$$\eta = \frac{F_{mp}}{\frac{\Delta v}{\Delta x} S}, \quad (2)$$

т.е. коэффициент вязкости численно равен силе трения между слоями жидкости при единице площади их соприкосновения, если градиент скорости равен единице.

В системе СИ единица измерения вязкости - Па·с (Па - паскаль):

$$[\eta] = \frac{[F]}{\left[\frac{\Delta v}{\Delta x}\right] \cdot [S]} = \frac{\text{Н} \times \text{м}}{\frac{\text{м}}{\text{с}} \times \text{м}^2} = \frac{\text{Н} \times \text{с}}{\text{м}^2} = \text{Па} \times \text{с}$$

При небольшой скорости течения жидкость как бы разделяется на слои, которые скользят один относительно другого, не перемешиваясь. Такое слоистое течение называется **ламинарным**.

В данной работе изучается метод измерения коэффициента вязкости жидкости по времени вытекания ее определенного объема через трубку известной длины и диаметра (**капиллярный вискозиметр**).

Определение коэффициента динамической вязкости капиллярным методом

Капиллярный метод определения коэффициента вязкости основан на использовании формулы Пуазейля для объема протекающей жидкости V по трубе известного радиуса r :

$$V = \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{\pi r^4}{8\eta} t, \quad (3)$$

где $\frac{\Delta p}{\Delta x}$ - градиент давления в жидкости, t - время протекания жидкости.

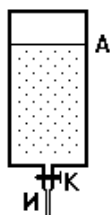


Рис. 1

В вертикально расположенный сосуд (Рис.1) наливают поочередно до одинакового уровня А жидкости с известным η_0 и неизвестным η_x коэффициентом вязкости. Открывая кран К, измеряют время вытекания жидкостей через капилляр – иглу И. Тогда выражение (3) для вытекающего объема V_0 известной жидкости:

$$V_0 = \frac{\Delta P_0 \cdot \pi \cdot r^4}{\Delta x \cdot 8 \cdot \eta_0} \cdot t_0, \quad (4)$$

где t_0 – время вытекания жидкости с известным коэффициентом вязкости. Аналогично, для объема V_x вытекающей жидкости с неизвестным коэффициентом вязкости:

$$V_x = \frac{\Delta P_x \cdot \pi \cdot r^4}{\Delta x \cdot 8 \cdot \eta_x} \cdot t_x, \quad (5)$$

где t_x – время вытекания жидкости с неизвестной вязкостью.

Для жидкости, налитой в вертикальный сосуд, изменение давления будет равно гидростатическому давлению столба жидкости $\Delta P = \rho g h$. Т.к. жидкости наливаются до одинакового уровня, то объемы их равны: $V_0 = V_x$ и соответственно равна высота столба жидкости $h_0 = h_x = h$. Тогда для известной жидкости $\Delta P_0 = \rho_0 g h$, для неизвестной жидкости $\Delta P_x = \rho_x g h$.

Приравнявая выражения (4) и (5) и, учитывая выражения для ΔP , получим:

$$\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h_0 \cdot \pi \cdot r^4}{\Delta x \cdot 8 \cdot \eta_0} \cdot t_0 = \frac{\rho_x \cdot g \cdot h_x \cdot \pi \cdot r^4}{\Delta x \cdot 8 \cdot \eta_x} \cdot t_x.$$

Сокращая на одинаковые величины, получим:

$$\frac{\rho_0 \cdot t_0}{\eta_0} = \frac{\rho_x \cdot t_x}{\eta_x},$$

откуда выражаем коэффициент вязкости неизвестной жидкости:

$$\eta_x = \eta_0 \cdot \frac{\rho_x \cdot t_x}{\rho_0 \cdot t_0}. \quad (6)$$

Т.е., для нахождения коэффициента вязкости неизвестной жидкости необходимо знать коэффициент вязкости стандартной жидкости, ее плотность, время протекания стандартной жидкости, плотность неизвестной жидкости и ее время протекания.

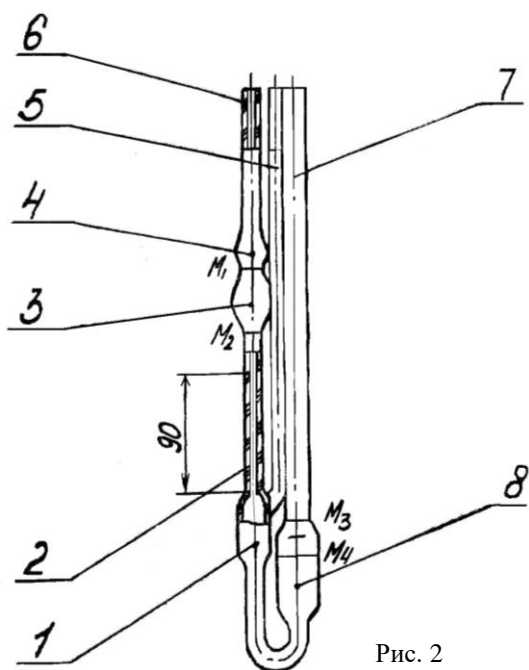
Порядок выполнения работы

В работе используется промышленный капиллярный вискозиметр ВПЖ–1. Этот вискозиметр был градуирован в заводских условиях, т.е. уже определены: плотность, вязкость и время протекания стандартной жидкости. Тогда выражение (6) примет вид:

$$\eta_x = K \cdot \rho_x \cdot t_x, \quad (7)$$

где η_x – коэффициент вязкости жидкости; $K = \frac{\eta_0}{\rho_0 t_0} = \dots$ м²/с² – константа вискозиметра; t_x - время истечения жидкости в секундах; ρ_x - плотность исследуемой жидкости в кг/м³;

Вискозиметр капиллярный (Рис. 2) состоит из измерительного резервуара (3), ограниченного двумя кольцевыми отметками М₁ и М₂, резервуар переходит в капилляр (2) и резервуар (1), который соединен с изогнутой трубкой (5) и трубкой (7). Последняя имеет резервуар (8) с двумя отметками М₃ и М₄, указывающими пределы наполнения вискозиметра жидкостью. Жидкость из резервуара (3) по капилляру (2) стекает в резервуар (1) по стенкам последнего, образуя у нижнего конца капилляра «висячий уровень». Измерение вязкости при помощи капиллярного вискозиметра основано на



определении времени истечения через капилляр определенного объема жидкости из измерительного резервуара.

1. Испытуемую жидкость залить в чистый вискозиметр через трубку (7) так, чтобы ее уровень установился между отметками M_3 и M_4 .
2. На конец трубки (5) надеть резиновую трубку с краном и резиновой грушей.
3. На конец трубки (6) надеть резиновую трубку с краном.
4. Вискозиметр установить в жидкостный термостат.
5. При температуре измерения выдержать прибор не менее 5 минут.
6. Закрыть кран, соединяющий трубки (5) и (6).
7. При открытых кранах на трубках (5) и (6) выдавить воздух из резиновой груши и, удерживая ее в сжатом состоянии, закрыть кран на трубке (6).
8. После этого, засосать грушей жидкость выше отметки M_1 примерно до половины резервуара (4).
9. Закрыть кран на трубке (5).
10. Открыв кран на тройнике, соединяющий трубки (5) и (6), включить секундомер и измерить время понижения уровня жидкости в трубке (5) от отметки M_1 до отметки M_2 .
11. Провести аналогичные измерения вязкости для жидкости ещё при двух значениях температуры с шагом $10\text{ }^\circ\text{C}$.
12. Определить по справочной таблице значение плотности жидкости при данной температуре. Записать ее в таблицу.
13. Вычислить вязкость жидкости по формуле (7).
14. Найти среднее значение вязкости и оценить погрешности.
15. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

Справочная таблица зависимости плотности воды от температуры

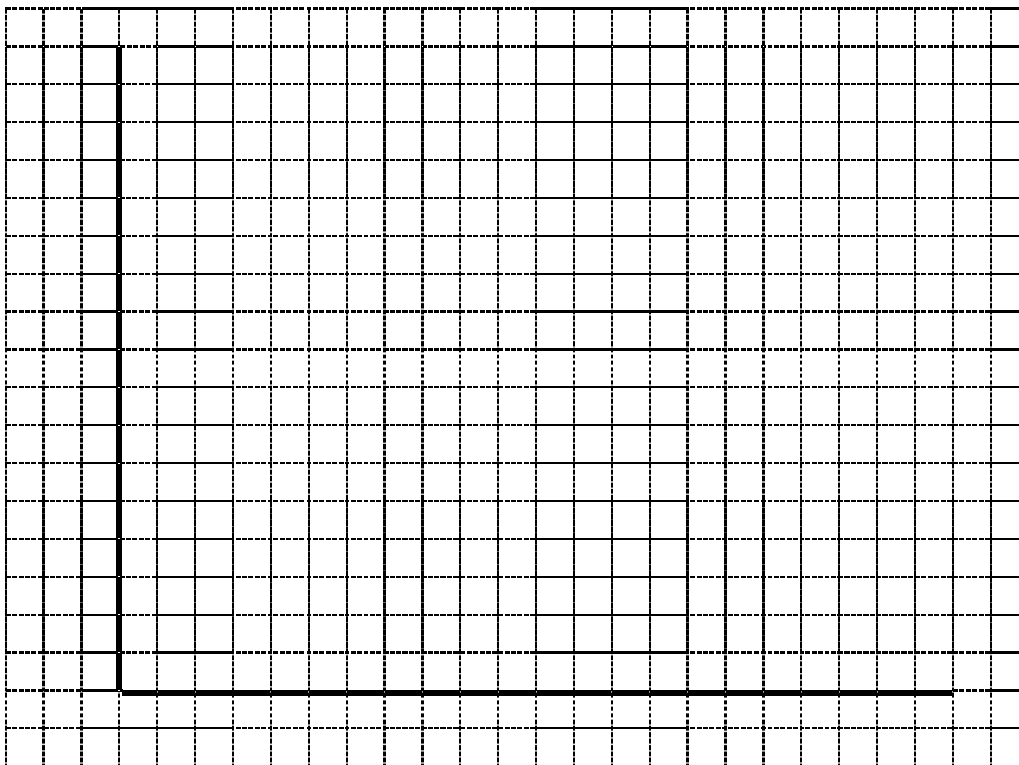
$T, \text{ }^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\rho_x, \text{ кг/м}^3$	999,7	998,2	995,6	992,2	988,0	983,2	977,7	971,8	965,3

№	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_x, \text{ кг/м}^3$	$t_x, \text{ с}$	$\eta_x, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\langle \eta_x \rangle, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\Delta\eta_x, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\langle \Delta\eta_x \rangle, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\frac{\langle \Delta\eta_x \rangle}{\langle \eta_x \rangle} \cdot 100\%$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								

16. Построить график зависимости коэффициента вязкости от температуры $\eta_x = \eta_x(T, ^\circ\text{C})$.
17. Сделать вывод о зависимости коэффициента вязкости жидкости от температуры.

Вычисления:

График зависимости $\eta_x = \eta_x(T, ^\circ\text{C})$



Вывод:

Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. Запишите и дайте определение формулы Ньютона для силы трения между слоями жидкости или газа.
2. Запишите и дайте определение коэффициента вязкости.
3. Выведите формулу (6) для нахождения коэффициента вязкости капиллярным методом.
4. Объясните, как из формулы (6) получена практическая формула (7).

Лабораторная работа № 7

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Цель работы: измерить коэффициент поверхностного натяжения воды методом отрыва кольца.

Оборудование: сосуд, стакан, пружина, кольцо, штатив универсальный, весы с разновесами.

Теория работы и описание установки

Силы притяжения между молекулами жидкости быстро убывают с увеличением расстояния. Они практически обращаются в нуль уже на расстоянии порядка 10^{-9} м. Поэтому результат воздействия на каждую молекулу определяется только ближайшими ее соседями. Он существенно зависит от того, где находится рассматриваемая молекула. Если последняя расположена внутри жидкости (на расстоянии, большем, чем 10^{-9} м от границы жидкости), то силы взаимодействия со всеми окружающими ее молекулами в среднем уравниваются. В отличие от этого, среднее значение силы, действующей на молекулу поверхностного слоя жидкости толщиной порядка 10^{-9} м, не равно нулю; это обуславливается тем, что молекула, расположенная на поверхности жидкости, частично граничит с молекулами той же жидкости, а частично – с молекулами другой среды, например, воздуха и пара или стенки сосуда. Вследствие разных плотностей и природы молекул, сила, действующая на выделенную молекулу жидкости со стороны другой среды, отличается от силы ее взаимодействия с молекулами жидкости. В итоге результирующая сила, действующая на каждую молекулу поверхностного слоя, направлена либо внутрь жидкости, либо в сторону граничащей с ней среды. Поэтому при перемещении молекул из поверхностного слоя вглубь жидкости или, наоборот, из глубины жидкости на поверхность совершается работа. Эта работа тем больше, чем больше различие между силами взаимодействия молекул поверхностного слоя с молекулами жидкости и молекулами граничащей среды.

Рассмотрим жидкость, граничащую со своим паром (в состоянии, далеко от критического). Концентрация молекул в воздухе и паре намного меньше, чем в жидкости. Поэтому на молекулы поверхностного слоя жидкости действует сила, направленная внутрь жидкости. Предположим теперь, что площадь поверхности жидкости при изотермическом обратимом процессе увеличилась на величину dS . Это значит, что некоторое количество молекул перешло из глубины жидкости в поверхностный слой. Следовательно, внешними силами совершена некоторая работа δA , которая прямо пропорциональна количеству молекул, перешедших в поверхностный слой, а значит, и увеличению площади поверхности жидкости dS :

$$\delta A = \sigma dS, \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Из (1) следует, что коэффициент поверхностного натяжения определяется работой, необходимой для изотермического, обратимого увеличения площади поверхности на единицу.

Поскольку работа при изотермическом, обратимом процессе равна изменению свободной энергии системы ($\delta A = dE$), то избыточная потенциальная энергия поверхности жидкости является ее свободной энергией E . Тогда коэффициент поверхностного натяжения можно определить как свободную энергию единицы площади поверхности жидкости:

$$\sigma = \frac{dE}{dS} \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{E}{S}. \quad (2)$$

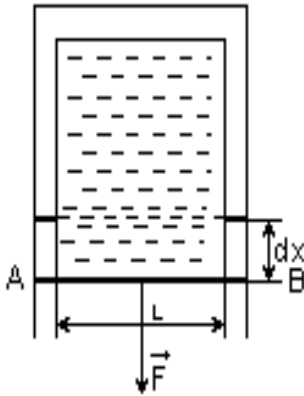


Рис. 1

В состоянии устойчивого равновесия свободная энергия любой системы минимальна. Следовательно, в равновесии жидкость имеет минимальную площадь поверхности. Это значит, что должны существовать силы, стремящиеся сократить поверхность жидкости. Они направлены по касательной к поверхности жидкости.

Если проволочную рамку, одна из сторон AB которой подвижна (рис. 1), поместить в мыльный раствор и затем вынуть из него, то вся рамка затянется пленкой жидкости. Силы поверхностного натяжения принуждают пленку сокращаться и перемещают перемычку AB . Чтобы ее удержать в равновесии, необходимо приложить внешнюю силу F . Так как пленка имеет две поверхности, вдоль каждой из которых действует сила поверхностного натяжения F_n , то

$$F = 2F_n. \quad (3)$$

Предположим, что при постоянной температуре бесконечно медленно перемычка AB перемещается на расстояние dx (см. рис. 1). При этом внешняя сила совершает работу

$$\delta A = 2F_n dx. \quad (4)$$

Эта работа пойдет на увеличение свободной энергии поверхности пленки

$$\delta A = dE = \sigma dS = \sigma \cdot 2Ldx, \quad (5)$$

где L – длина перемычки AB . Тогда из (4) и (5) получим:

$$\sigma = \frac{F_n}{L}. \quad (6)$$

Следовательно, коэффициент поверхностного натяжения можно определить как величину силы поверхностного натяжения, действующей на единицу длины линии раздела поверхности жидкости.

В работе используется установка, схема которой приведена на рис. 2.

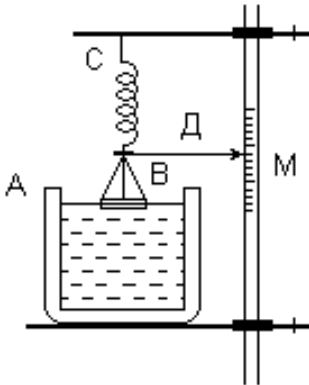


Рис. 2

Исследуемая жидкость находится в сосуде A . Кольцо B , изготовленное из материала, хорошо смачиваемого этой жидкостью, подвешено на пружине C , к нижнему концу которой прикреплена стрелка D . Удлинение пружины и, следовательно, сила ее натяжения определяются по шкале

M , которая нанесена на штативе. При соприкосновении кольца с поверхностью исследуемой жидкости последняя, смачивая кольцо, поднимается по его стенкам и за счет силы поверхностного натяжения несколько втягивает кольцо внутрь жидкости.

По мере опускания поверхности воды пружина будет растягиваться, и в некоторый момент времени кольцо от поверхности оторвется. В этот момент сила поверхностного натяжения F_n , действующая на всю длину линии разрыва поверхности, будет равна упругой силе f , возникшей в растянутой пружине:

$$F_n = f. \quad (7)$$

(действие силы тяжести кольца, стрелки и самой пружины учитывается выбором начала отсчета удлинения пружины).

Поверхность жидкости разрывается по линиям двух окружностей (внешней и внутренней окружности кольца). Длина линии разрыва:

$$L = \pi(d_1 + d_2), \quad (8)$$

где d_1 и d_2 – внешний и внутренний диаметры кольца.

Из (6)–(8) найдем:

$$\sigma = \frac{f}{\pi(d_1 + d_2)}. \quad (9)$$

Порядок выполнения работы

1. Измерить массу кольца m .
2. Подвесив кольцо на пружину, определить коэффициент жесткости пружины k . При равновесии $F_{\text{упр}} = mg$. Тогда, по закону Гука, получим:

$$k\Delta l_1 = mg \quad (10)$$

откуда

$$k = mg/\Delta l_1, \quad (11)$$

где Δl_1 – удлинение пружины, измерить Δl_1 .

3. В сосуд налить исследуемую жидкость (воду) так, чтобы кольцо касалось поверхности жидкости.

4. Медленно опустить сосуд с жидкостью до отрыва кольца. Определить дополнительное удлинение пружины Δl_2 , обусловленное силой поверхностного натяжения.

5. Рассчитать силу поверхностного натяжения пружины:

$$F_{\text{н}} = k\Delta l_2. \quad (12)$$

6. Провести ряд повторных измерений согласно пунктам 1-5 и определить средние значения $\langle \Delta l_1 \rangle$, $\langle \Delta l_2 \rangle$ и $\langle F_{\text{н}} \rangle$.

7. Измерить внешний и внутренний диаметры кольца, найти их средние значения $\langle d_1 \rangle$ и $\langle d_2 \rangle$.

8. По формуле (9) с учетом формулы (7) и найденных средних значений $\langle F_{\text{н}} \rangle$, $\langle d_1 \rangle$ и $\langle d_2 \rangle$ определить коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

9. Рассчитать погрешность измерений.

10. Сравнить полученный результат с табличным.

11. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

$m =$ кг							
№ п.п.	Δl_1 , м	Δl_2 , м	k , Н/м	$F_{\text{н}}$, Н	d_1 , М	d_2 , м	σ , Н/м
1							
2							
3							
4							
5							
среднее							

Вычисления:

Расчет погрешности измерений

Записать окончательный результат:

$$\sigma = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \%$$

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность явления поверхностного натяжения?
2. Что является причиной поднятия жидкости в капиллярах?
3. Что такое краевой угол?
4. Что такое кривизна поверхности жидкости?
5. Каков физический смысл поверхностного натяжения жидкости? От чего зависит эта величина?

Лабораторная работа № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ (КЛТР) МЕТАЛЛОВ

Цель работы: освоить методы определения коэффициента линейного термического расширения металлов. Измерить КЛТР стали и латуни.

Оборудование: прибор с двумя металлическими трубками, индикатор, электроплитка, парообразователь.

Теория работы и описание установки

Твердое кристаллическое тело состоит из частиц (атомов, ионов, молекул), расположенных упорядоченно друг относительно друга и образующих кристаллическую

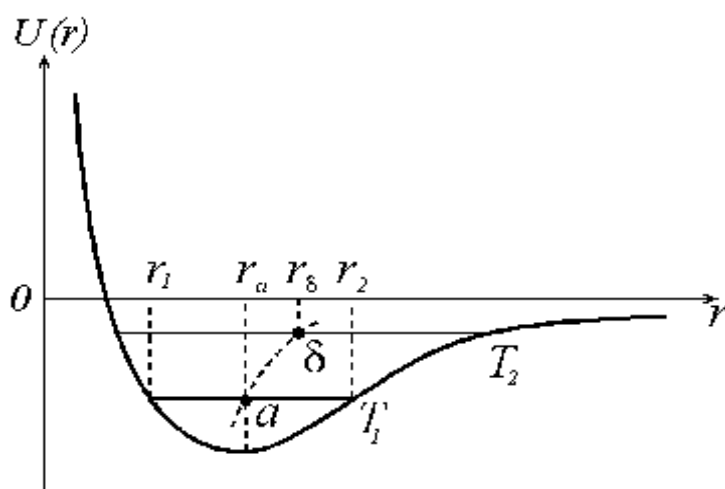


Рис. 1

пространственную решетку. В дальнейшем, для краткости, частицей у нас будет являться атом. Совокупность атомов кристаллической решетки, вследствие их взаимодействия друг с другом, создает потенциальное поле кристалла. Каждый атом этой кристаллической решетки находится в этом поле и колеблется относительно своего положения равновесия. Такой колеблющийся атом называется осциллятором. Кристалл, состоящий из N атомов, представляет собой систему N осцилляторов, взаимодействующих между собой.

На рис.1 приведена кривая полной энергии межатомного взаимодействия. Пусть горизонтальная прямая a изображает уровень энергии рассматриваемого атома в кристаллической решетке при температуре T_1 . Точки r_1 и r_2 определяют крайние положения, которые занимает атом в решетке при своих колебаниях. Середина прямой определяет положение равновесия атома в решетке при данной температуре T_1 . При повышении температуры атом переходит на более высокий энергетический уровень, определяемый прямой δ . Ввиду асимметрии кривой $U(r)$ центр прямой δ смещен относительно центра прямой a вправо. Это означает смещение положения равновесия атома: межатомное расстояние увеличивается, что и обуславливает расширение кристалла при нагревании.

Т.о., причиной увеличения линейных размеров тела при нагревании является не увеличение амплитуды колебаний атомов, а увеличение межатомных расстояний, характеризующих положение равновесия. Поэтому коэффициент линейного термического расширения вдоль оси Ox будет равен:

$$\alpha = \frac{r_{\delta} - r_a}{r_a (T_2 - T_1)}. \quad (1)$$

Вследствие анизотропии кристаллов, коэффициент линейного термического расширения α может быть различным в разных направлениях. Это означает, что если из данного кристалла выточить шар, то после его нагревания он потеряет сферическую форму. В самом общем случае такой шар при нагревании превращается в трехосный эллипсоид, оси которого связаны с кристаллографическими осями кристалла. Коэффициенты линейного термического расширения по трем осям этого эллипсоида называются главными КЛТР кристалла. Если их обозначить соответственно через $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, то коэффициент объемного термического расширения кристалла

$$\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3. \quad (2)$$

Для кристаллов с кубической симметрией, так же как и для изотропных тел

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha \text{ и } \beta = 3\alpha. \quad (3)$$

Коэффициенты линейного и объемного термического расширения практически остаются постоянными, если интервалы температур, в которых они измеряются, малы, а сами температуры высокие. Вообще же, коэффициенты термического расширения зависят от температуры и при том так же, как и теплоемкость. Отношение коэффициента линейного термического расширения к молярной теплоемкости твердого тела для данного вещества, есть величина постоянная, не зависящая от температуры. Это закон Грюнайзена:

$$\alpha/C = \text{const}. \quad (4)$$

Фазовый переход 1-го рода сопровождается скачкообразным изменением объема при температуре перехода.

Поэтому на температурных зависимостях КЛТР при фазовом переходе 1-го рода наблюдается пик, подобный тому, что изображен на рис. 2. Установлена простая эмпирическая связь между КЛТР и температурой плавления:

$$\alpha T_m^n = A, \quad (5)$$

где A и n – постоянные величины, одинаковые для веществ с одинаковыми кристаллической решеткой и типом связи. Из соотношения (6) видно, что чем больше у вещества КЛТР, тем меньше его температура плавления.

В работе используется установка, схема которой приведена на рис. 3.

Прибор (рис. 3) предназначен для лабораторных работ по определению с помощью индикатора КЛТР твердых тел в виде трубок. Он состоит из пластмассовой подставки 1, стойки 2 с зажимным винтом 3, стойки 4 с втулкой 5, в которую вставляется индикатор 6, закрепляемый винтом 7, двух металлических трубок (стальной и латунной) 8, на которых закреплена пластина 9.

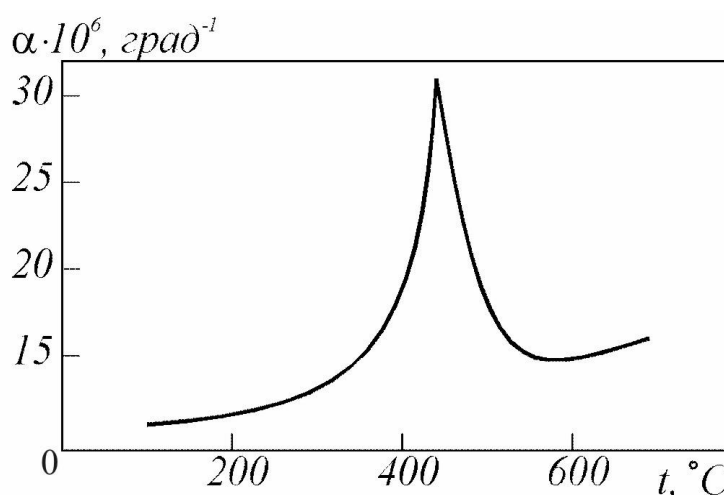


Рис. 2. Зависимость $\alpha = f(t)$ для кобальта.

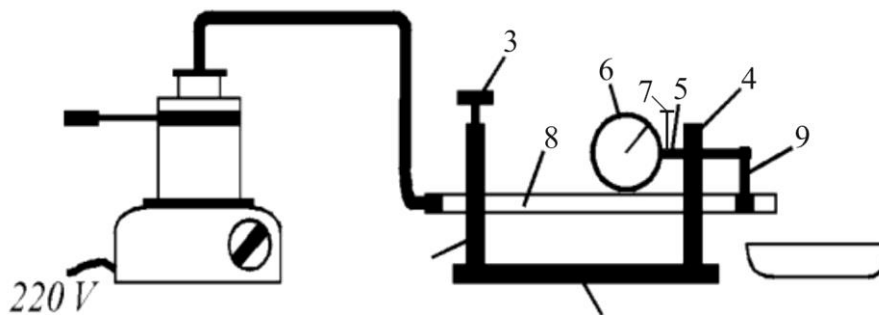


Рис. 3

Порядок выполнения работы

1. Совместить нулевую отметку шкалы индикатора 6 со стрелкой путем поворота кольца индикатора.

2. Измерить линейкой длину рабочего участка трубки L от центра винта 3 до ближайшей к нему стороны пластины 9.

3. Определить комнатную температуру.

4. Еще раз проверив установку индикатора на «0», налить воду в парообразователь и соединить его шлангом с прибором. Поставить парообразователь на электроплитку и включить ее. Пар, образовавшийся при кипении воды в парообразователе, проходя через металлическую трубку, нагревает ее.

5. Производить нагрев трубки до тех пор, пока изменяются показания индикатора. При установившемся показании индикатора записать значение удлинения ΔL рабочей части трубки по красной шкале индикатора (цена одного малого деления 0,01 мм).

6. Провести 3 измерения величины ΔL для каждой трубки и вычислить среднее значение.

Для ускорения работы рекомендуется проводить эксперимент, чередуя различные трубки (одна участвует в опыте, другая тем временем охлаждается).

7. Определить КЛТР стали и латуни из соотношения

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L(T - T_k)}, \quad (6)$$

где ΔL – удлинение рабочей части трубки при нагревании, L – длина рабочей части трубки при комнатной температуре, T – конечная температура, равная 373 К, T_k – начальная комнатная температура.

8. Данные эксперимента занести в таблицу 1.

Таблица 1

Сталь				Латунь			
№ п/п	L , мм	ΔL , мм	α , 10^{-6} K^{-1}	№ п/п	L , мм	ΔL , мм	α , 10^{-6} K^{-1}
1.				1.			
2.				2.			
3.				3.			
ср.	–	–		ср.	–	–	

9. Найти абсолютную и относительную погрешности в определении α .

10. Сопоставить результаты данной работы с данными таблицы 2 для α .

Таблица 2

Вещество	t , °С	$\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹
Алюминий	0-100	23,8
Железо	0-100	11,4
Сталь (1,5 % С)	0-100	10,5
Латунь (62 % Cu, 38 % Zn)	10-16	18,9
Медь	18	16,7

Вычисления:

$T - T_k =$

<p>Сталь:</p> <p>$\alpha_1 =$</p> <p>$\alpha_2 =$</p> <p>$\alpha_3 =$</p> <p>$\langle \alpha \rangle = \frac{\quad}{3} =$</p>	<p>Латунь:</p> <p>$\alpha_1 =$</p> <p>$\alpha_2 =$</p> <p>$\alpha_3 =$</p> <p>$\langle \alpha \rangle = \frac{\quad}{3} =$</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Расчет погрешности измерений

Записать окончательные результаты:

$\alpha = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \% \quad (\text{для стали})$
 $\alpha = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \% \quad (\text{для латуни})$

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. Может ли быть КЛТР отрицательной величиной? Объяснить по кривой $U(r)$ (рис.1).
2. Где в технике необходимо учитывать термическое расширение твердых тел?
3. На каком принципе работает реле, в которое входит биметаллическая пластинка?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Фундаментальные физические постоянные

Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,807 \text{ м/с}^2$
Нормальное атмосферное давление	$P_0 = 101325 \text{ Па}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Объем 1 моля идеального газа при нормальных условиях	$V_0 = 22,414 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Универсальная (молярная) газовая постоянная	$R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль})$
Постоянная Лошмидта	$L = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Скорость света в вакууме	$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$
Элементарный заряд	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Постоянная Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Таблица 2

Физические свойства воды при различных температурах

Температура, °С	Плотность, ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость, c , Дж/(кг·К)	Удельная теплота парообразования, λ , 10 ⁶ Дж/кг	Коэффициент вязкости, η , 10 ⁻³ Па·с	Коэффициент поверхностного натяжения, σ , 10 ⁻³ Н/м
0	999,8	4217	2,50	1,787	75,6
4	1000,0	4204	2,49	1,567	75,0
10	999,7	4192	2,48	1,305	74,1
20	998,2	4182	2,45	1,004	72,6
30	995,6	4178	2,43	0,803	71,0
40	992,2	4178	2,41	0,655	69,4
50	988,0	4180	2,38	0,551	67,8
60	983,2	4184	2,36	0,470	66,0
70	977,7	4189	2,33	0,407	64,3
80	971,8	4196	2,31	0,357	62,5
90	965,3	4205	2,28	0,317	60,7
100	958,3	4216	2,26	0,284	58,8

Таблица 3

Вещество	Плотность, ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость, c , Дж/(кг·К)	Коэффициент объемного расширения, β , 10 ⁻³ К	Коэффициент вязкости, η , 10 ⁻³ Па·с	Коэффициент поверхностного натяжения, σ , 10 ⁻³ Н/м
1	2	3	4	5	6
Ацетон	790	2100	1,49	0,23	23,7
Бензол	880	1705	1,24	0,65	28,9
Уксус	1020	1785	1,11	1,27	27,8
Керосин	800	2085	0,90	1,8	24,0
Глицерин	1260	2430	0,51	1500	63,0
Молоко	1030	3936	0,22	1,79	47,2
Масло касторовое	950	2219	0,72	1200	36,4
Масло машинное	910	2000	0,92	113	33,1
Масло трансформаторное	880	1880	0,60	19,8	31,8
Ртуть	13600	139	0,18	1,59	513,0
Спирт	789	2470	1,10	1,19	22,0
Эфир	714	2340	1,65	0,24	17,0

Таблица 4

Вещество	Температура жидкости, T , °С	Скорость звука в жидкостях, c , м/с	Температурный коэффициент скорости звука, α , м/(с·К)
Анилин	20	1656	-4,6
Ацетон	20	1192	-5,5
Вода	17	1497	2,5
Глицерин	20	1923	-1,8
Ртуть	20	1451	-0,46
Спирт (мет.)	20	1123	-3,3
Спирт (эт.)	20	1180	-3,6

Таблица 5

Удельная теплоемкость меди при различных температурах

Температура, °С	0	100	200	300	400
Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)	381,3	393,9	408,5	422,4	434,9

Таблица 6

Физические свойства газов при нормальном давлении и 20 °С

Вещество	Формула	Молярная масса M , 10^{-3} кг/моль	Плотность, ρ , кг/м ³	Коэффициент вязкости, $\eta, 10^{-3}$ Па·с	Эффективный диаметр, $d, 10^{-9}$ м	Скорость звука, м/с
Азот	N ₂	28	1,251	16,6	0,31	334
Аммиак	NH ₃	17	0,771	9,4	0,30	415
Аргон	Ar	40	1,783	20,8	0,29	1284
Водород	H ₂	2	0,090	8,4	0,23	1286
Водяной пар	H ₂ O	18	0,804	8,8	0,26	494
Окись углерода	CO	28	1,250	16,6	0,32	337
Углекислый газ	CO ₂	44	1,977	13,7	0,33	259
Гелий	He	4	0,179	18,6	0,19	970
Кислород	O ₂	32	1,429	19,1	0,29	316
Воздух		29	1,293	17,1		332

Таблица 7

Теплопроводность λ некоторых сплавов (при $t = 20$ °С)

Сплав	λ	
	Вт/(м·К)	ккал/(м·ч·°С)
Алюмель	32,6	28,1
Латунь (Л-62;Л-68)	106	91
Сплав Вуда	13	11
Сталь углеродистая	45-58	39-50
Хромель	16,0	13,8
Чугун	58	50

Таблица 8

**Теплопроводности λ твердых веществ при температуре 20°С
(если не указана иная температура)**

Вещество	λ	
	Вт/(м·К)	ккал/(м·ч·°С)
Алмаз	133,3	118,8
Бумага	0,140	0,120
Вазелин	0,174	0,150
Лед (при $t = 0$ °С)	2,26	1,94
Лед (при $t = -20$ °С)	2,44	2,10

Таблица 9

Тепловые свойства твердых тел (при 20 °С)

Вещество	Температура плавления, °С	Удельная теплоемкость, c , Дж/(кг·К)	Удельная теплота плавления, λ , 10^5 Дж/кг	Коэффициент линейного расширения, α , 10^{-5} К $^{-1}$	Коэффициент теплопроводности, K , Вт/(К·м)
Алюминий	660	898	3,22	2,4	207
Олово	232	230	0,60	2,7	65
Железо	1535	460	2,72	1,2	75
Латунь	900	386	1,92	1,9	80-180
Медь	1083	384	1,74	1,7	400
Сталь	1300	460	2,94	1,1	40

Таблица 10

Температура кипения воды при различных давлениях
(давление в мм.рт.ст.)

	680	690	700	710	720	730	740	750	760	770	780	790
0	69,2	73,2	77,1	81,1	84,9	88,8	92,6	96,3	100,00	3,70	7,30	10,9
1	69,6	73,6	77,5	81,4	85,3	89,1	92,9	96,7	0,40	4,00	7,60	11,2
2	70,0	74,0	77,9	81,8	85,7	89,5	93,3	97,0	0,70	4,40	8,00	11,6
3	70,4	74,4	78,3	82,2	86,1	89,9	93,7	97,4	1,10	4,80	8,70	11,9
4	70,8	74,8	78,7	82,6	86,5	90,3	94,1	97,8	1,80	5,10	9,10	12,3
5	71,2	75,2	79,1	83,0	86,9	90,7	94,4	98,2	1,90	5,50	9,40	12,6
6	71,6	75,6	79,5	83,4	87,2	91,0	94,8	98,5	2,20	5,80	9,60	13,0
7	72,0	76,0	79,9	83,8	87,6	91,4	95,2	98,9	2,60	6,20	9,80	13,3
8	72,4	76,3	80,3	84,2	88,0	91,8	95,6	99,3	2,90	6,60	10,2	13,7
9	72,8	76,7	80,7	84,5	88,4	92,2	95,9	99,6	3,30	6,90	10,5	14,1

Таблица 11

Теплопроводность λ чистых металлов
при различной температуре

Металл	t , °С	λ	
		Вт/(м·К)	ккал/(м·ч·°С)
Алюминий	-100	209	180
	0	209	180
	100	207	178
Железо	20	73,3	63,0
	100	67,5	58,0
Медь электротехническая	-180	488,5	420,0
	0	395,4	340,0
	100	392	337
	800	367,5	316,0
Олово	-100	74,4	64,0
	0	66,1	56,8
	100	59,3	51,0

Таблица 12

**Коэффициенты Стюдента для доверительной вероятности P
при различных количествах измерений**

№ п.п. \ P	0,5	0,9	0,95	0,99
2	1,60	6,31	12,7	63,7
3	0,82	2,92	4,30	9,92
4	0,77	2,35	3,16	5,94
5	0,74	2,13	2,78	4,60
6	0,73	2,02	2,67	4,03
7	0,72	1,94	2,45	3,71
8	0,71	1,89	2,36	3,50
9	0,71	1,86	2,31	3,36
10	0,70	1,83	2,26	3,25
15	0,69	1,76	2,14	2,98
20	0,69	1,73	2,09	2,86
∞	0,68	1,65	1,96	2,59

Замечание: При $n \rightarrow \infty$ приведены значения коэффициентов λ_P .

Таблица 13

Предельные значения погрешностей приборов

Приборы и меры	Значение предела	Предельная погрешность
Линейки металлические	150, 300, 500 мм	0,1 мм
>> >>	1000 мм	0,2 мм
>> деревянные	200, 250, 300 мм	0,1 мм
>> >>	400, 500, 1000 мм	0,5 мм
>> пластмассовые	200, 250, 300 мм	1 мм
Гири для техн. анализа	10, 20, 50, 100 мг	1 мг
>>	200 мг	2 мг
>>	500 мг	4 мг
>>	1 г	6 мг
>>	2 г	8 мг
>>	5 г	12 мг
Мензурки 2-го класса	100, 200 см ³	5 см ³
Штангенциркули		
с ценой деления 0,1 мм	0–155 мм	0,1 мм
>> 0,05 мм	0–200; 0–250; 0–350 мм	0,05 мм
Микрометры 0,01 мм	0,25, 25–50 мм	4 мкм
Индикаторы 0,01 мм	0–2 мм	12 мкм
>>	0–5 мм	16 мкм
>>	0–10 мм	20 мкм
Весы лабораторные	5–100, 10–200 г	3 цены деления шкалы
Секундомеры технич.	30–60 мин	1,5 цены деления шкалы
>> электромехан.	30 мин	0,5 цены деления шкалы
Термометры стекл.жидк	от –20 ⁰ до 100 ⁰	1 цена деления шкалы

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев, А.Н. Молекулярная физика: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А.Н. Матвеев; МГУ им. М.В. Ломоносова. – 3-е изд. – Москва: ОНИКС: Мир и Образование, 2006. – 360 с.
2. Ташлыкова-Бушкевич, И.И. Физика: учеб. пособие для студ. технических спец. учреждений, обеспечивающих получение высш. образования: в 2 ч. Ч. 1: Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество и магнетизм / И.И. Ташлыкова-Бушкевич. – 2-е изд., испр. – Минск: Выш., 2014. – 303 с.
3. Трофимова, Т.И. Курс физики: учеб. пособие для инженерно-технических спец. высш. учеб. заведений / Т.И. Трофимова. – 13-е изд., стер. – Москва: Академия, 2007. – 558 с.
4. Фриш, С.Э. Курс общей физики: учебник: [в 3 т.] Т. 1 / С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. – Изд. 12-е, стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2007.
5. Макаренко, Г.М. Краткий справочник по общей физике / Г.М. Макаренко, Д.А. Антонович, Н.В. Вабищев. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – 152 с.
6. Курс физики: учебник для вузов в 2 т. / под ред. В.Н. Лозовского. – Спб.: Изд-во «Лань», 2001. – Т. 1. 576 с; Т. 2 – 592 с.
7. Наркевич, И.И. Физика: учебник / И.И. Наркевич, Э.И. Волмянский, С.И. Лобко. – Минск: Новое знание, 2004. – 680 с.

Учебное издание

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
И ТЕРМОДИНАМИКА**

Рабочая тетрадь
для выполнения лабораторных работ

Составители:

АНТОНОВИЧ Дмитрий Анатольевич

САПЕЛКО Татьяна Ивановна

МАЛЫШЕВ Алексей Леонидович

Технический редактор

Г.В. Разбоева

Компьютерный дизайн

Л.И. Ячменёва

Подписано в печать . Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 2,81. Уч.-изд. л. 2,21. Тираж 22 экз. Заказ в/п.

Издатель и полиграфическое исполнение – учреждение образования
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».

Свидетельство о государственной регистрации в качестве издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/255 от 31.03.2014.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».

210038, г. Витебск, Московский проспект, 33.