

ФИЗИКА МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания к лабораторным работам № 6 и 7
по физике для студентов I и II курсов всех технических
специальностей

УДК 539.19(07)
Ф 503

Составители:

канд. физ.-мат. наук, доцент *С. А. Погожих*
ассистент *М. Р. Мирсияпов*

Рецензент д-р физ.-мат. наук, профессор *А. А. Штыгашев*

Разработка и изготовление лабораторных установок:
Д. С. Курдюмов, А. В. Морозов, А. А. Шевченко, П. А. Крапивко

Методические указания содержат описание лабораторных работ по молекулярной физике, выполняемых на модульном учебном комплексе МУК-МФТ. Состоит из введения, описания учебного комплекса, описания лабораторных работ и справочных сведений. Предназначено для студентов НГТУ всех технических специальностей.

© Новосибирский государственный
технический университет, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Описание модульного учебного комплекса МУК-МФТ	5
2. Лабораторная работа № 6. Определение отношения теплоемкостей газа C_p/C_V методом Клемана–Дезорма	7
3. Лабораторная работа № 7. Определение вязкости воздуха методом истечения из капилляра	15
Библиографический список	26

ВВЕДЕНИЕ

В работе содержится описание лабораторной установки модульного и учебного комплекса МУК-МФТ и описание лабораторных работ по молекулярной физике и термодинамике, которые выполняются на этой установке. Подробно рассмотрено устройство установки, органы управления и особенности эксплуатации. В описании лабораторных работ приведены теоретические обоснования методов измерений, порядок выполнения работ и контрольные вопросы для их защиты. Описания содержат в основном достаточные теоретические сведения, однако для более углубленного изучения необходимо воспользоваться литературой, приведенной в конце работы.

1. ОПИСАНИЕ МОДУЛЬНОГО УЧЕБНОГО КОМПЛЕКСА МУК-МФТ

Модульный учебный комплекс МУК-МФТ предназначен для выполнения лабораторных работ по молекулярной физике. Непосредственно описываемые работы выполняются с использованием блока БЛТ2, который состоит из двух конструктивно обособленных модулей – электронного блока и измерительной камеры (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Блок БЛТ2

Электронный блок включает в себя измеритель давления, секундомер, компрессор, схему управления и памяти.

Измерительная камера состоит из воздушной цилиндрической камеры, датчика давления, двух длинных капилляров, трех механических клапанов, электромагнитного клапана.

Основные характеристики прибора:

- напряжение питания электронного блока – 220 В;
- диапазон изменения давления ± 4 кПа;
- диапазоны измерения давления – не более 6,6 кПа;
- объём измерительной камеры 20,5 литра.

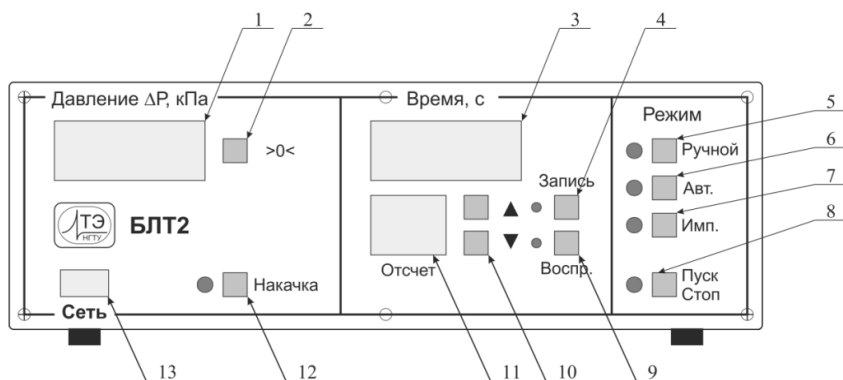


Рис. 1.2. Органы управления электронным блоком

На передней панели электронного блока БЛТ2 (рис. 1.2) расположены органы управления: 1 – индикатор давления; 2 – кнопка коррекции нуля; 3 – секундомер; 4 – кнопка «Запись»; 5 – кнопка выбора режима «Ручной»; 6 – кнопка выбора режима «Автоматический»; 7 – кнопка выбора режима «Импульсный»; 8 – кнопка выбора «Пуск/Стоп»; 9 – кнопка «Воспроизведение»; 10 – кнопки выбора отсчетов; 11 – индикатор выбора отсчетов; 12 – кнопка включения компрессора «Накачка»; 13 – кнопка выключателя «Сеть».

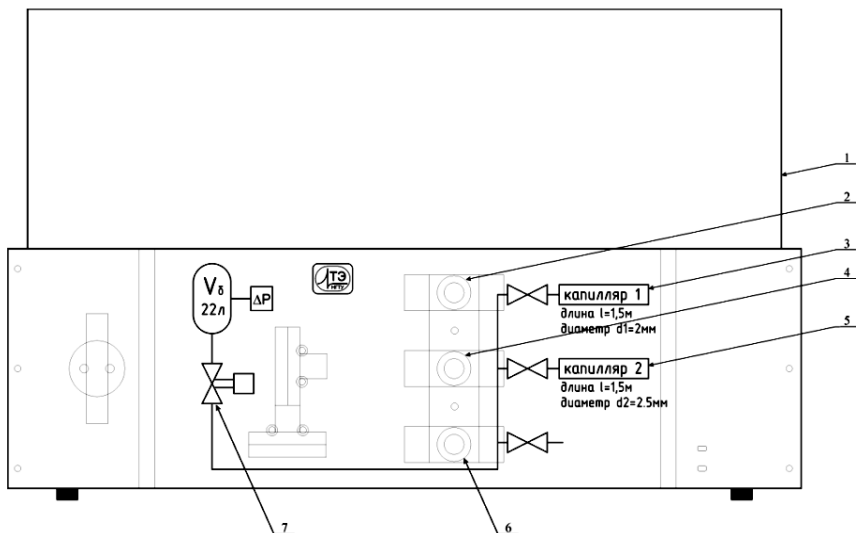


Рис. 1.3. Измерительная камера

На рис. 1.3 представлена измерительная камера с органами управления: 1 – измерительная камера; 2 – вентиль для соединения капилляра 1; 3 – капилляр 1; 4 – вентиль для соединения капилляра 2; 5 – капилляр 2; 6 – вентиль для выравнивания давления в камере с атмосферным; 7 – электромагнитный клапан.

Давление воздуха в камере контролируется дифференциальным датчиком давления, соединенным с камерой трубкой.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Определение отношения теплоемкостей газа C_p/C_V методом Клемана–Дезорма

Цель работы: экспериментальное определение отношения теплоемкостей $\gamma = C_p / C_V$ для воздуха и сравнение с теоретическим значением.

Приборы и принадлежности: электронный блок БЛТ2; измерительная камера для БЛТ2.

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Теплоемкостью тела C называется отношение $\frac{dQ}{dT}$, где dQ – количество теплоты, сообщенное телу в каком-то процессе, а dT – изменение температуры тела, вызванное этим процессом.

Молярная теплоемкость C_M – теплоемкость одного моля вещества. Один *моль* – это количество вещества системы, в которой содержится столько же структурных элементов (атомов для атомарного вещества, молекул для вещества с молекулярной структурой), сколько их содержится в 12 г изотопа углерода C^{12} . Число частиц в одном моле вещества известно – это число Авогадро: $6,022 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$ (точное значение приведено в справочных сведениях). **Удельная теплоемкость** c – теплоемкость единицы массы данного вещества. Между молярной и удельной теплоемкостью существует связь:

$$C_M = \mu c, \quad (2.1)$$

где C_M – молярная теплоемкость; c – удельная теплоемкость; μ – молярная масса.

Как правило, теплоемкость зависит от температуры, но для ряда процессов в широком диапазоне температур эти изменения столь невелики, что, например, удельную теплоемкость можно характеризовать как количество теплоты, необходимое для нагревания единицы массы вещества на один градус, которое можно записать в виде

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}.$$

Под теплоемкостью в дальнейшем будем подразумевать молярную теплоемкость C_M . У газов характерными величинами являются C_p и C_V – молярные теплоемкости при постоянном давлении и объеме соответственно. Для идеальных газов справедливо уравнение Майера:

$$C_p = C_V + R, \quad (2.2)$$

где $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ – универсальная газовая постоянная. Молекулярно-кинетическая теория устанавливает следующее соотношение для C_V :

$$C_V = \frac{i}{2} R, \quad (2.3)$$

где i – число степеней свободы молекул. Из уравнений (2.2) и (2.3) имеем:

$$\frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \quad (2.4)$$

Это отношение называется показателем адиабаты и обозначается γ (для воздуха при $i = 5$ $\gamma = 1,4$).

Адиабатическим называется процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой ($dQ = 0$). К таким процессам можно отнести все быстротекущие процессы. При этом изменяются все три параметра газа (давление, температура и объем или плотность), уравнение Менделеева–Клапейрона выполняется в каждой точке адиабатического процесса, так как описывает состояние газа, но непригодно для описания зависимости. Зависимости между парами термодинамических параметров описывает уравнение Пуассона, они могут быть отражены на графиках ($p-V$, $V-T$ или $p-T$):

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (2.5)$$

или

$$p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T = \text{const}, \quad (2.6)$$

или

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}. \quad (2.7)$$

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Метод Клемана–Дезорма состоит в следующем. Пусть сначала в баллоне атмосферное давление p_0 . Накачаем в баллон небольшое количество воздуха (сожмем его) и отсечем баллон от атмосферы. Давление в баллоне стало больше – некоторая величина p . Это давление будет некоторое время понижаться из-за охлаждения нагретого при закачивании воздуха – процесс 0–1–2 адиабатный (рис. 2.1). Через несколько минут температура в баллоне и окружающего воздуха сравняются и установится давление $p_1 = p_0 + \Delta p_1$, где Δp_1 – дифференциальное давление в точке 3 (разность давлений в баллоне и окружающего воздуха). Назовем это состояние состоянием I.

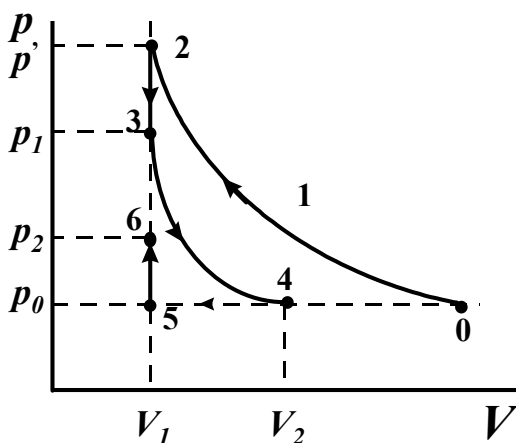


Рис. 2.1. Графическое изображение процессов

Состояние I: T_1 , p_1 , где T_1 – абсолютная комнатная температура, а p_1 – давление в баллоне:

$$p_1 = p_0 + \Delta p_1. \quad (2.8)$$

Соединим баллон с атмосферой, при этом воздух расширится. Как только давление в баллоне станет равным атмосферному (слышен характерный звук выходящего воздуха), снова изолируем баллон. При условии быстрого расширения процесс пройдет без теплообмена

с окружающей средой и его можно считать адиабатическим. Теперь давление в баллоне атмосферное p_0 , температура $T_2 < T_1$ (воздух охладится при расширении, совершая адиабатически работу против внешних сил – атмосферного давления). Это состояние назовем состоянием **II**. На графике (рис. 2.1) оно отражено точкой 4.

Состояние **II**: T_2, p_0 .

Оставшийся охлажденный воздух вследствие теплообмена с окружающей средой через стенки баллона будет нагреваться при постоянном объеме. Давление при этом будет расти. Рост давления прекратится, когда температура воздуха в баллоне сравняется с комнатной (процесс 5–6), обычно это занимает несколько минут. Это состояние назовем состоянием **III**. На графике (рис. 2.1) оно отражено точкой 6.

Состояние **III**: T_1, p_2 . Ясно, что

$$p_2 = p_0 + \Delta p_2, \quad (2.9)$$

где Δp_2 – дифференциальное давление в состоянии **III**.

К процессу перехода газа из состояния **I** в состояние **II** применимо уравнение Пуассона в форме (2.6):

$$\frac{T_1^\gamma}{p_1^{\gamma-1}} = \frac{T_2^\gamma}{p_0^{\gamma-1}}.$$

Подставив значение p_1 из (2.8), получим:

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^\gamma = \left(\frac{p_0 + \Delta p_1}{p_0}\right)^{\gamma-1} \quad \text{или} \quad \left(1 + \frac{\Delta T}{T_2}\right)^\gamma = \left(1 + \frac{\Delta p_1}{p_0}\right)^{\gamma-1},$$

где $\Delta T = T_1 - T_2$.

Так как $\Delta T / T_2$ и $\Delta p_1 / p_0$ – малые величины по сравнению с единицей, то, разлагая оба двучлена в ряд Тейлора и ограничиваясь первыми двумя слагаемыми, получим:

$$\left(1 + \gamma \frac{\Delta T}{T_2}\right) = \left(1 + (\gamma - 1) \frac{\Delta p_1}{p_0}\right) \quad \text{или} \quad \Delta p_1 \frac{\gamma - 1}{\gamma} = p_0 \frac{T_1 - T_2}{T_2}. \quad (2.10)$$

Переход газа из состояния II в состояние III произошел без изменения объема, поэтому по закону Шарля $p_2 / T_1 = p_0 / T_2$. Подставляя значение p_2 из (2.9) и решая полученное равенство относительно Δp_2 , имеем:

$$\Delta p_2 = p_0 \frac{T_1 - T_2}{T_2}. \quad (2.11)$$

Сопоставляя уравнения (2.10) и (2.11), приходим к выводу:

$$\Delta p_2 = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \Delta p_1.$$

Отсюда получаем расчетную формулу

$$\gamma = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_2}. \quad (2.12)$$

Все процессы отражены на графике (рис. 2.1) в координатах $p - V$.

1. Кривая 0–1–2 описывает почти адиабатическое сжатие газа (накачивание воздуха в баллон). Объем атмосферного воздуха уменьшается до объема баллона. При этом температура воздуха несколько возрастает.

2. Когда в закрытом баллоне происходит установление комнатной температуры, объем газа не меняется. Этот процесс (участок 2–3) – процесс изохорического охлаждения газа.

3. По адиабате 3–4 происходит адиабатическое расширение газа при сообщении баллона с атмосферой. Объем газа увеличивается от V_1 до V_2 , давление падает до атмосферного, температура понижается.

4. Участок 5–6 соответствует изохорному нагреванию газа. В этом процессе участвует только часть газа, оставшаяся в баллоне объемом V_1 , что на графике выглядит в виде обособленного отрезка.

Недостатком данного метода является то, что процесс быстрого расширения газа в ходе эксперимента не является чисто адиабатическим ввиду теплообмена через стенку сосуда в процессе расширения. Поэтому расширение нужно делать как можно быстрее, увеличивая диаметр расширительного клапана.

Воздух состоит в основном из двухатомных газов – кислорода и азота. Основная примесь одноатомного газа аргона составляет чуть менее одного процента, содержание остальных газов (водяные пары, углекислый газ и др.) несущественно. Поэтому для теоретического расчета C_p / C_V можно брать число степеней свободы, соответствующее двухатомному газу, $i = 5$. В любом случае погрешность, вносимая в расчет C_p / C_V примесными газами, меньше, чем погрешность самого метода.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Все измерения проводятся при помощи блока для определения термодинамических характеристик воздуха БЛТ2.

Измерения показателя адиабаты производятся в импульсном режиме «Имп.». Ниже представлен алгоритм работы блока БЛТ2 (см. рис. 1.2) в этом режиме.

1. После нажатия кнопки коррекции нуля баллон соединяется с атмосферой, и значение дифференциального манометра сбрасывается на нуль. После отпускания кнопки баллон отсекается от атмосферы.

2. После нажатия кнопки «Накачка» компрессор нагнетает воздух в баллон. При повторном нажатии нагнетание прекращается, баллон отсечен от атмосферы. При достижении предельного давления (чуть больше 6 кПа) нагнетание прекращается автоматически.

3. После нажатия кнопки «Пуск» открывается клапан, соединяющий баллон с атмосферой, и воздух выходит из баллона. После отпускания кнопки «Пуск» клапан закрывается.

4. После повторного нажатия кнопки «Пуск» прибор переходит в режим ожидания и он снова готов к измерениям.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Используя материал первого раздела «Описание модульного учебного комплекса МУК-МФТ», изучите установку и органы управления (см. рис. 1.2 и 1.3).

2. Нажмите кнопку 7 выбора режима «Имп.». Откройте вентиль 6 (повернув против часовой стрелке) для выравнивания давления в камере с атмосферным. Остальные вентили должны быть также открыты. Правильное положение ручек вентилях указано на рис. 2.2.

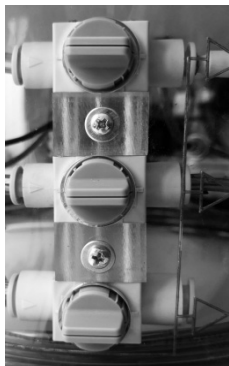


Рис. 2.2. Положение ручек вентиля

3. Нажмите кнопку 2 коррекции нуля и немного подержите, чтобы давление успело выровняться с атмосферным. В дальнейшем при выполнении работы эту кнопку нажимать не требуется.

4. Нажмите кнопку 12 включения компрессора «Накачка». После завершения накачки компрессор автоматически выключится. Возможен вариант, когда нагнетание останавливается на заданном давлении, меньшем максимального. Выждите 2-3 минуты, пока установится постоянное дифференциальное давление Δp_1 (состояние I). Внесите это показание в таблицу.

5. Нажмите кнопку 8 «Пуск» и удерживайте ее, пока значение давления в камере не сравняется с атмосферным – дифференциальное давление станет равным нулю. После этого сразу же отпустите кнопку, отсекая баллон от атмосферы (состояние II).

6. Выждите 2-3 минуты для достижения состояния III, при котором установится постоянное дифференциальное давление Δp_2 . Внесите это показание в таблицу.

7. Для выхода в режим ожидания (для дальнейшего выполнения работы) нажмите повторно кнопку «Пуск».

Таблица измерений

№ п/п	Δp_1 (кПа)	Δp_2 (кПа)	γ
1			
2			
и т. д.			
			$\bar{\gamma} = \frac{\sum \gamma_i}{N}$

8. Проведите еще 9-10 серий измерений, занесите данные в таблицу. Обнулять прибор в этом случае не надо, лучше накачивать от текущего давления в баллоне.

9. Рассчитайте значение показателя адиабаты для каждого случая по рабочей формуле (2.12).

10. Рассчитайте среднее значение показателя адиабаты и найдите его случайную погрешность.

11. Окончательный результат запишите в виде

$$\gamma = \bar{\gamma} \pm \Delta\gamma.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое теплоемкость? Каков ее физический смысл? Почему она зависит от процесса, в котором участвует газ?

2. Что такое количество вещества? В каких единицах оно измеряется?

3. Почему $C_p > C_V$? Докажите уравнение Майера.

4. Почему при адиабатическом расширении воздух охладился?

5. Почему процесс перехода газа из состояния **I** в состояние **II** – адиабатический, а из **II** в **III** – считается изохорическим процессом (т. е. теплообмен с окружающей средой происходит)?

6. Выведите уравнение Пуассона (соотношения (2.5)–(2.7)).

7. Выведите формулу (2.12).

8. Постройте p – T - и V – T -диаграммы воздуха для процессов, происходящих в данной работе.

9. Сравните полученное вами значение адиабаты γ с теоретическим значением. Чем объясняются имеющиеся расхождения?

10. Объясните, какие источники погрешностей обусловлены конструкцией прибора и методикой измерения?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Определение вязкости воздуха методом истечения из капилляра

Цель работы: изучение явления вязкости газов и одного из методов определения коэффициента вязкости газов.

Задачи

1. Изучить метод определения коэффициента динамической вязкости, основанный на истечении газа из капилляра.

2. Определить по полученным данным коэффициент динамической вязкости воздуха.

3. Определить по полученным данным длины свободного пробега молекул.

4. Определить по полученным данным число Рейнольдса.

Приборы и принадлежности: электронный блок БЛТ2; измерительная камера для БЛТ2.

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Основное положение молекулярно-кинетической теории сводится к тому, что молекулы газа движутся хаотически. Скорость движения молекул определяет тепловое состояние газа. В процессе своего движения молекулы соударяются друг с другом и со стенками сосуда. Траектория движения частиц является зигзагообразной, состоящей из отдельных прямолинейных отрезков пути (между соударениями). **Средней длиной свободного пробега молекулы λ** называется среднее расстояние, проходимое молекулой между последовательными столкновениями её с другими молекулами.

Рассмотрим направленное движение газа по трубе круглого сечения. Молекулы газа участвуют одновременно в двух движениях: хаотическом тепловом и направленном. Молекулы, оказавшиеся вблизи стенки, сталкиваются со стенкой, теряют свою энергию и замедляются. За счет теплового движения они переходят в близлежащие слои газа и замедляют их. Вследствие этого скорости направленного движения молекул оказываются различными в разных точках поперечного сечения трубы. С наибольшей скоростью движение совершается в средней части сечения трубы (рис. 3.1), а по мере приближения к стенкам скорость убывает.

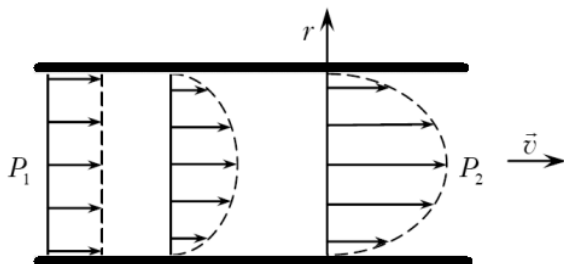


Рис. 3.1. Скорость движения

Весь поток газа можно мысленно разбить на слои цилиндрической формы, движущиеся с различными скоростями. В результате столкновения молекулы обмениваются импульсами. Это приводит к возникновению между слоями, испытывающими относительное перемещение, **силы внутреннего трения** или **вязкости**. Сила внутреннего трения возникает в результате переноса импульса молекулами между слоями, направлена по касательной к границе между слоями. Молекулы стремятся уравнивать скорости движения разных слоев.

Сила внутреннего трения между слоями равна:

$$F = \eta \frac{dv}{dx} S_{\text{сл}},$$

где $S_{\text{сл}}$ – площади соприкосновения слоев; v – скорость направленного движения газа; $\left(\frac{dv}{dx}\right)$ – градиент скорости; η – коэффициент пропорциональности, зависящий от рода газа (жидкости), от температуры среды и называемый **коэффициентом динамической вязкости**, или **динамической вязкостью**.

Коэффициент динамической вязкости численно равен силе внутреннего трения, действующей на единичные площади соприкосновения параллельно движущихся слоев газа (жидкости) при единичном градиенте скорости между ними. Единицей вязкости в СИ является паскаль-секунда ($\text{Па} \cdot \text{с}$).

При **ламинарном течении** поток газа движется слоями, не перемешивающимися друг с другом, и в пределах слоя скорость направленного движения остается постоянной. Для цилиндрической трубы круглого сечения на некотором расстоянии от конца трубы устанавливается стационарное **распределение скоростей v по параболическому закону**:

$$v = \frac{\Delta p}{4\eta L} (R_{\text{T}}^2 - r^2),$$

где Δp – перепад давления на концах трубы; L – длина трубы; R_{T} – радиус трубы; r – радиальная координата.

Если газ считать идеальным, то из молекулярно-кинетической теории можно получить выражение для коэффициента динамической вязкости:

$$\eta = \frac{1}{3} \lambda v_{\text{ар}} \rho, \quad (3.1)$$

где $v_{\text{ар}}$ – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул, равная

$$v_{\text{ар}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}, \quad (3.2)$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура газа; M – молярная масса газа.

Объем газа, протекающего через поперечное сечение трубы в единицу времени, называется **расходом Q** . При ламинарном течении газа по цилиндрической трубе круглого сечения расход можно определить по **формуле Пуазеля**:

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{\pi R_T^4 \Delta p}{8 \eta L}. \quad (3.3)$$

Если перепад давления увеличивается, скорость течения растет, и движение газа из ламинарного переходит в **турбулентное**, при котором скорости частиц изменяются беспорядочным образом, слои перемешиваются, образуются завихрения (рис. 3.2).

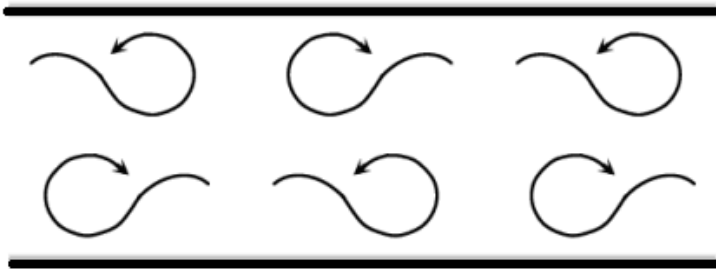


Рис. 3.2. Турбулентное течение

Для оценки изменения характера движения газа (жидкости) используют безразмерную величину, называемую **числом Рейнольдса**:

$$Re = \frac{\rho v_{\text{ср}} D}{\eta} = \frac{v_{\text{ср}} D}{\nu}, \quad (3.4)$$

где ρ – плотность среды; $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость течения; D – характеристический размер (например, диаметр трубы); $\nu = \eta/\rho$ – коэффициент кинематической вязкости.

По формуле (3.3) можно выразить среднюю скорость течения газа:

$$v_{\text{ср}} = \frac{Q}{S} = \frac{R_{\text{т}}^2 \Delta p}{8\eta L},$$

где S – площадь поперечного сечения трубы.

Тогда число Рейнольдса для случая цилиндрической трубы можно рассчитать по формуле

$$Re = \frac{\rho R_{\text{т}}^3 \Delta p}{4\eta^2 L}. \quad (3.5)$$

При движении газа в круглой трубе течение является ламинарным, если $Re < 1000$.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрим экспериментальную установку, состоящую из баллона объемом V_0 , к которому через клапан подсоединен капилляр. В баллон заканчивается воздух, затем открывается кран, и воздух из баллона вытекает через капилляр в атмосферу. При этом давление в баллоне уменьшается.

Перепад давления будет зависеть от времени истечения воздуха из капилляра:

$$\Delta p = \Delta p_0 e^{-t/\tau}, \quad (3.6)$$

где p_0 – перепад давления в начальный момент времени $t = 0$; τ – **время релаксации**, т. е. время, за которое начальный перепад давления убывает в e раз.

Продифференцировав это уравнение по времени, получим:

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = \frac{d}{dt}(\Delta p_0 e^{-t/\tau}) = -\frac{1}{\tau} \Delta p_0 e^{-t/\tau} = -\frac{\Delta p}{\tau}. \quad (3.7)$$

Логарифмируя (3.6), получим уравнение

$$\ln(\Delta p) = \ln(\Delta p_0) - \frac{t}{\tau}, \quad (3.8)$$

из которого следует, что график зависимости (рис. 3.3, б) $\ln(\Delta p)$ от t – прямая линия.

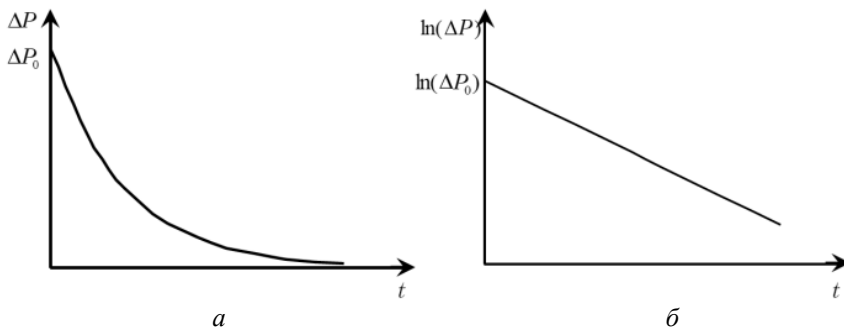


Рис. 3.3. Графики зависимости:

$a - \Delta P$ от t ; $б - \ln(\Delta P)$ от t

Истечение воздуха из баллона через капилляр можно рассматривать как процесс изотермического расширения газа с постоянной массой. Тогда согласно уравнению Менделеева–Клапейрона: $pV = \text{const}$. Продифференцировав это уравнение по времени, преобразовав формулу Пуазейля и выразив η , получаем рабочую формулу:

$$1) \quad pV = \text{const};$$

$$2) \quad \frac{dp}{dt} V + \frac{dV}{dt} p = 0,$$

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{dp}{dt} \frac{V}{p};$$

$$3) -\frac{d(p-p_0)}{dt} \frac{V}{p} = \frac{\pi R_T^4}{8L\eta} (p-p_0) = \alpha(p-p_0);$$

$$4) -\frac{d(p-p_0)}{p-p_0} = \alpha \frac{p}{V} dt,$$

$$-\int \frac{d(p-p_0)}{p-p_0} = \int \alpha \frac{p}{V} dt;$$

$$5) \ln \frac{(p_1-p_0)}{p-p_0} = \alpha \frac{p_1}{V} t;$$

$$6) \ln \frac{\Delta p_0}{\Delta p} = \alpha \frac{p_1}{V} t;$$

$$7) \Delta p = \Delta p_0 e^{-\alpha \frac{p_1}{V} t};$$

$$8) \ln \Delta p = \ln \Delta p_0 - \alpha \frac{p_1}{V} t;$$

$$9) \frac{\Delta \ln \Delta p}{\Delta t} = -\alpha \frac{p_1}{V} = -\frac{\pi R_T^4 p_1}{8LV\eta};$$

$$10) \frac{1}{\eta} = -\frac{8\Delta \ln \Delta p LV}{\Delta t \pi R_T^4 p_1};$$

$$11) \eta = -\frac{\pi R^4 p_1}{8LV \left(\frac{\Delta \ln \Delta p}{\Delta t} \right)}.$$

Поскольку можно принять $p_1 \approx p_{\text{атм}}$ и $V \approx V_0$ (итоговая ошибка не более 20 %), то:

$$\eta = - \frac{\pi R_{\text{т}}^4 p_{\text{атм}}}{8 L V_0 \left(\frac{\Delta \ln \Delta p}{\Delta t} \right)}. \quad (3.9)$$

Полученная рабочая формула верна только для ламинарного течения газа. Если на графике зависимости $\ln(\Delta p)$ от t наблюдается излом, то это означает, что при высоких перепадах Δp режим течения является турбулентным (участок *a* на рис. 3.4). Поэтому в дальнейших расчетах следует использовать только данные участка *в* (рис. 3.4).

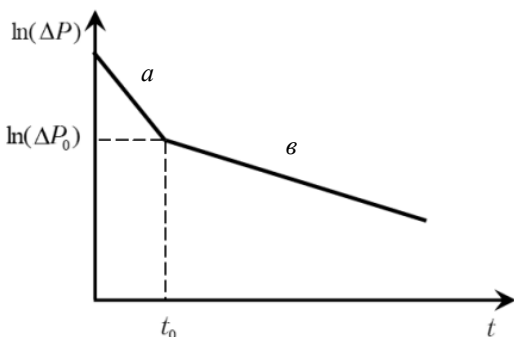


Рис. 3.4. График зависимости $\ln(\Delta p)$ от времени t

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Измерения показателя адиабаты производятся в автоматическом режиме «Авт.». Ниже представлен алгоритм работы электронного блока БЛТ2 в этом режиме.

1. После нажатия кнопки «Пуск» (см. рис. 1.2 и 1.3) записывается в память начальное значения давления, и открывается ЭМ клапан.
2. Через каждые 0,3 кПа происходит запись очередных отсчетов давления и времени в автоматическом режиме.
3. После повторного нажатия кнопки «Пуск» прибор переходит в режим ожидания.

4. Просмотр отсчетов записей осуществляется в режиме ожидания. Для начала просмотра нажмите кнопку 9 «Воспроизведение». С помощью кнопок выбора отсчетов 10 и индикатора 11 осуществляется просмотр записей.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Используя материал раздела «Описание модульного учебного комплекса МУК-МФТ», изучите установку и органы управления (см. рис. 1.2 и 1.3).

2. Нажмите кнопку 6 выбора режима «Авт.». Откройте вентиль 6 (повернув против часовой стрелки) для выравнивания давления в камере с атмосферным. Остальные вентили должны быть также закрыты. Правильное положение ручек вентиля указано на рис. 3.5.

3. Нажмите кнопку 2 коррекции нуля и немного подержите, чтобы давление успело выровняться с атмосферным. В дальнейшем при выполнении работы эту кнопку нажимать не требуется.

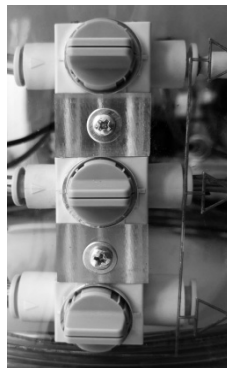


Рис. 3.5. Положение ручек вентиля

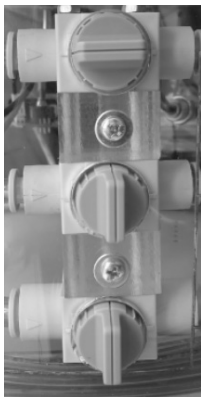


Рис. 3.6. Положение ручек вентиля для подключения первого капилляра

4. Нажмите кнопку 12 включения компрессора «Накачка». После завершения накачки компрессор автоматически выключится. Возможен вариант, когда нагнетание останавливается на заданном давлении, меньшем максимального. Выждите 2-3 минуты, пока установится постоянное дифференциальное давление Δp_0 .

5. Подключите вентилем 2 первый капилляр (открыв против часовой стрелки). Остальные вентили должны быть закрыты (повернув по часовой стрелке). Правильное положение ручек вентиля указано на рис. 3.6.

6. Нажмите кнопку 8 «Пуск». Выждите 2 мин. Нажмите повторно кнопку «Пуск».

7. Для просмотра результатов измерения нажмите кнопку «Воспроизведение». Затем стрелками выберете требуемый отсчет. Индикаторы 1 и 3

покажут значения давления и время соответственно для выбранного отсчета.

8. Постройте график зависимости $\ln(\Delta p)$ от t и аппроксимируйте его прямой линией. Взяв две удаленные точки на аппроксимирующей прямой линии, рассчитайте угловой коэффициент $\frac{\Delta \ln \Delta p}{\Delta t}$.

9. Вычислите коэффициент динамической вязкости по формуле (3.9). Радиус капилляра, его длина и объем баллона указаны на установке. Атмосферное давление принять равным 10^5 Па.

10. Вычислите коэффициент кинематической вязкости $\nu = \eta/\rho$, выбрав плотность воздуха из таблицы.

Соотношение температуры, плотности и динамической вязкости

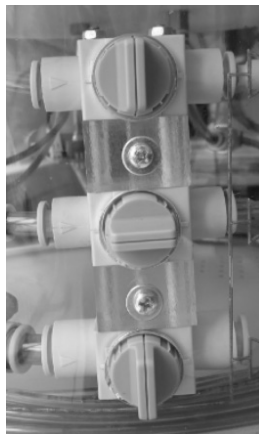
Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Динамическая вязкость, 10^{-5} Па·с
0	1,293	1,71
5	1,269	1,73
10	1,247	1,76
15	1,225	1,80
20	1,204	1,82
25	1,184	1,85
30	1,165	1,86
40	1,127	1,87
50	1,109	1,95
60	1,060	1,97
70	1,029	2,03
80	0,9996	2,07
90	0,9721	2,14
100	0,9461	2,17

11. Вычислите число Рейнольдса, используя формулу (3.5).

12. Вычислите, используя формулу (3.1), среднюю длину свободного пробега молекул.

13. Подключите вентилем 4 второй капилляр. Правильное положение ручек вентиля указано на рис. 3.7. Проведите аналогичные опыты и вычисления пп. 1–12.

Рис. 3.7. Положение ручек вентиля для подключения второго капилляра



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем обусловлено появление сил вязкости в идеальном газе?
2. Что такое средняя длина свободного пробега молекулы? Зависят ли средняя длина свободного пробега и эффективный диаметр молекул от давления, температуры, плотности газа, концентрации частиц?
3. Почему внутреннее трение называют явлением переноса?
4. Градиент какой величины определяет силу вязкого трения в газе?
5. По какой формуле можно рассчитать силу вязкого трения в газе?
6. От каких параметров газа зависит его коэффициент вязкости?
7. В чем различие между ламинарным и турбулентным течением жидкости?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Механика и термодинамика. Методические указания к вводному занятию и к лабораторным работам № 0 – 6 по физике для студентов I курса всех факультетов // А.В. Баранов, А.М. Погорельский, В.В. Христофоров, Б.Л. Паклин, Д.Д. Березиков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012.

2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. [В 4 т.]. Т. 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика: учебное пособие / И.В. Савельев; под общ. ред. И.В. Савельева. – 2-е изд., стер. – Москва: КНОРУС, 2012. – 528 с.

3. *Трофимова Т.И.* Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – Изд. 18-е, перераб. и доп. – Москва: Академия, 2010. – 560 с.

ФИЗИКА
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания

Редактор *Л.Н. Ветчакова*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 14.10.2022. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Уч.-изд. л. 1,62. Печ. л. 1,75. Изд. № 186. Заказ № 269. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20