

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

Кафедра общей физики
Лаборатория молекулярной физики

Лабораторная работа № 3

Определение
коэффициента
внутреннего трения и
средней длины свободного
пробега молекул воздуха

Ярославль
2007

Оглавление

1. Литература	3
2. Вопросы для подготовки к работе	3
3. Краткая теория	3
4. Описание установки и метода измерений	5
5. Выполнение работы и обработка результатов	6
Задание 1.	6
Задание 2.	7
Задание 3.	8
Задание 4.	8
6. Контрольные вопросы	9
7. Содержание отчета	9

Лабораторная работа № 3

Определение коэффициента внутреннего трения и средней длины свободного пробега молекул воздуха

Цель работы:

- изучение одного из методов определения вязкости газов,
- расчет средней длины свободного пробега молекул воздуха,
- сравнение результатов эксперимента с теорией.

Приборы и принадлежности: аспиратор, манометр, капилляр, мерный сосуд, штатив, фильтр, соединительные шланги, дистиллированная вода, секундомер.

1. Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 3. М., 2004.
2. Гершензон Е.М. и др. Молекулярная физика. М., 2000.

2. Вопросы для подготовки к работе

1. Эффективный диаметр и длина свободного пробега молекул. Внутреннее трение в газах.
2. Расчетная формула для коэффициента внутреннего трения; изменение величин, входящих в нее.
3. Расчетная формула для длины свободного пробега молекул.

3. Краткая теория

Для определения коэффициента внутреннего трения (вязкости) в данной работе используется метод истечения воздуха через капилляр. Известно, что скорости движения бесконечно тонких цилиндрических слоев газа, расположенных на различных расстояниях от оси капилляра, различны. В случае ламинарного (слоистого) течения скорости по сечению капилляра распределены по параболическому закону.

Если считать, что для слоя, прилегающего к стенкам капилляра, имеет место явление прилипания, скорость этого слоя равна нулю. Наибольшая скорость будет на осевой линии капилляра. Вследствие различных скоростей слоев между ними возникают силы внутреннего трения.

При установившемся движении сила вязкости, действующая на элементарный цилиндрический объем и приложенная к боковой поверхности цилиндра, уравнивается разностью сил давления, действующих на основание цилиндра.

На концах капилляра при протекании через него воздуха будет существовать разность давлений: давление на входе больше давления на выходе.

При установившемся течении воздуха эта разность давлений будет неизменной, так как в этом случае параметры, характеризующие движение — скорость, давление в различных точках потока, — не меняются с течением времени и являются функциями только координат. Такое течение называется **стационарным**.

Для случая установившегося ламинарного течения вязкой сжимаемой жидкости по капилляру радиусом r справедлива формула Пуазейля:

$$V = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2) \tau}{8 \ell \eta}, \quad (3.1)$$

где V — объем, протекающий через сечение капилляра за время τ , η — коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость) исследуемой среды, $(p_1 - p_2)$ — разность давления в начале и конце капилляра, ℓ — его длина.

Так как в отличие от жидкостей, практически не сжимаемых, газы обладают значительной сжимаемостью, закон Пуазейля в такой форме записи, строго говоря, неприменим к газам. Лишь при малых разностях давлений, когда $(p_1 - p_2) = \Delta p \ll p_2$ и, соответственно, при малых скоростях течения газа, сжимаемостью последнего можно пренебречь и применить к нему формулу Пуазейля.

При больших перепадах давления вследствие значительной сжимаемости газа разность давлений, приходящаяся на единицу длины капилляра, не будет постоянной, то есть вдоль оси капилляра будет существовать градиент давления. Поэтому в этих условиях формулу (3.1) можно применять только к бесконечно малому участку длины капилляра.

В работе измерения проводятся при небольших разностях давлений на концах капилляра, и для расчета вязкости воздуха используется ука-

4. Описание установки и метода измерений

званная выше формула. Выразим из нее η :

$$\eta = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2) \tau}{8 \ell V}. \quad (3.2)$$

Разность давлений на концах капилляра измеряют манометром:

$$p_1 - p_2 = \rho g \Delta h,$$

где ρ — плотность жидкости в манометре,
 g — ускорение свободного падения,
 Δh — разность уровней жидкости в манометре.

Тогда расчетная формула принимает следующий вид:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \rho g \Delta h \tau}{8 \ell V}. \quad (3.3)$$

4. Описание установки и метода измерений

Для определения коэффициента внутреннего трения воздуха используется установка, показанная на рисунке 4.1.

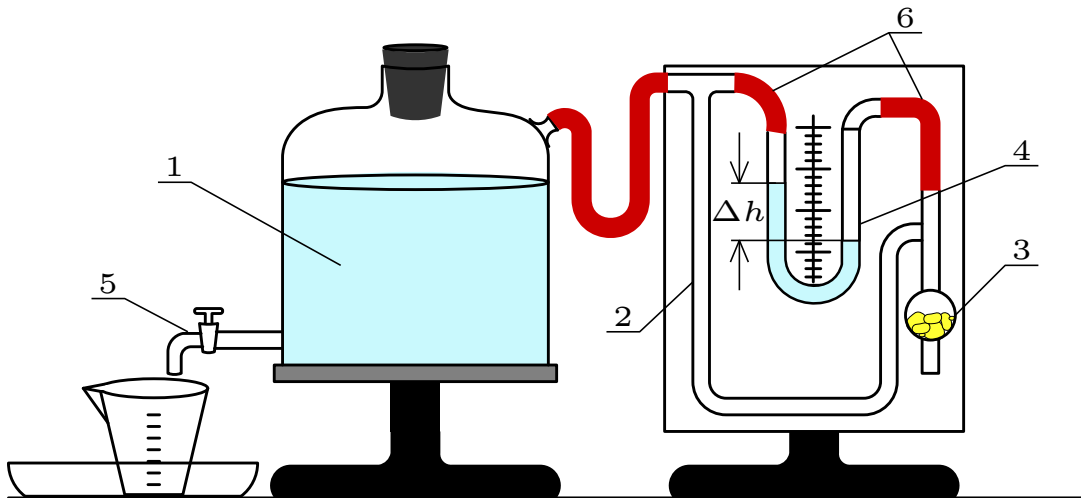


Рис. 4.1.

1 — аспиратор, 2 — трубка с капилляром внутри, 3 — фильтр, 4 — манометр,
5 — кран аспиратора, 6 — соединительные трубки.

Когда кран аспиратора открыт и из него выливается вода, давление в аспираторе становится немного меньше атмосферного, и через капилляр 2 в него поступает воздух через осушительный фильтр 3.

Разность уровней жидкости Δh измеряется манометром 4. Длина ℓ и радиус капилляра r могут быть измерены непосредственно. В данной установке $\ell = 26,1$ см; $r = 0,43$ мм. **Объем воздуха V** , прошедшего через капилляр за время τ , **равен объему воды**, вылившейся из аспиратора за то же время.

Рекомендуется следующий **порядок выполнения работы**:

1. Перед опытом аспиратор должен быть наполнен водой на $2/3$ объема.
2. Открывают кран 5, выпуская вначале воду в кристаллизатор. Выжидают несколько минут, пока установится стационарное течение, и разность уровней в манометре будет постоянной.
3. Подставляют одной рукой мерный сосуд (мензурку на 500 см³), а другой рукой включают секундомер. После того, как вытечет 300 мл воды, выключают секундомер, снимают показания (время истечения τ).
4. Опыт повторяют не менее 3 раз с одним и тем же объемом и примерно одинаковых давлениях ($p_1 - p_2$).

Указание: если время истечения одного и того же объема воды определяется при нескольких отличающихся разностях давлений — усреднять это время нельзя. В этом случае η рассчитывают 3 раза и затем находят $\eta_{\text{ср}}$.

5. Выполнение работы и обработка результатов

Задание 1. Определение коэффициента внутреннего трения воздуха.

Ряд величин в расчетной формуле (3.3) не меняется в условиях опыта. Выделите эти величины в постоянный множитель и рассчитайте один раз.

Проведите измерение времени истечения τ и разности уровней в манометре не менее трех раз. Результаты для каждого измерения занесите в таблицу:

5. Выполнение работы и обработка результатов

№ опыта	$\ell \cdot 10^{-2}, \text{ м}$	$r \cdot 10^{-4}, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	$\Delta h, \text{ м}$	$p_1 - p_2 = \rho g \Delta h, \text{ Па}$	$\eta, \text{ Па} \cdot \text{ с}$	$\Delta \eta, \text{ Па} \cdot \text{ с}$	$\frac{(\Delta \eta)^2}{(\text{Па} \cdot \text{ с})^2}$
1	26,1	4,3						
2	26,1	4,3						
3	26,1	4,3						
⋮	26,1	4,3						
Сумма	X	X	X	X	X		X	
Среднее	X	X	X	X	X		X	X

После обработки результатов измерений сравните полученное значение η воздуха с табличным.

Задание 2. Расчет средней длины свободного пробега молекул воздуха.

По известному коэффициенту вязкости, среднюю длину свободного пробега молекул воздуха можно рассчитать из следующего соотношения:

$$\bar{\lambda} = 1,86 \frac{\eta}{P} \sqrt{\frac{RT}{M}}, \quad (5.4)$$

где P — атмосферное давление, R — универсальная газовая постоянная, M — масса моля воздуха ($29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль), T — комнатная температура в кельвинах.

В задании требуется вывести выражение (5.4) для длины свободного пробега молекул воздуха и рассчитать λ по среднему значению $\eta_{\text{ср}}$. Для вывода использовать теоретическое выражение для вязкости газа:

$$\eta = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{\lambda} \rho,$$

где \bar{v} — средняя арифметическая скорость ($\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$), ρ — плотность газа, которую можно выразить из уравнения состояния идеального газа ($PV = \frac{m}{\mu} RT$).

Сравните полученное значение λ с табличным.

Задание 3. Расчет коэффициента кинематической вязкости.

Определенный в первом задании коэффициент внутреннего трения называется также динамической вязкостью. Наряду с ним существует коэффициент кинематической вязкости:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho},$$

где ρ — плотность жидкости или газа.

По известному η и табличному значению плотности воздуха ρ рассчитайте коэффициент кинематической вязкости (для $\eta_{\text{ср}}$).

Задание 4. Расчет числа Рейнольдса.

Для проверки ламинарности течения воздуха в капилляре следует рассчитать число Рейнольдса:

$$Re = \frac{ur\rho}{\eta}, \quad (5.5)$$

где r — радиус капилляра; ρ — плотность воздуха при температуре опыта и данном атмосферном давлении; u — средняя скорость течения воздуха в капилляре, рассчитываемая через сечение капилляра S и время истечения τ .

$$u = \frac{V}{S\tau},$$

где S — площадь сечения капилляра, $S = \pi r^2$; V — объем воздуха, прошедшего через капилляр.

С учетом вышесказанного для числа Рейнольдса можно получить расчетное соотношение:

$$Re = \frac{V\rho}{\pi r\eta\tau}. \quad (5.6)$$

Плотность воздуха ρ в условиях опыта можно рассчитать из уравнения Клапейрона-Менделеева.

Рассчитанное по среднему значению $\eta_{\text{ср}}$ число Рейнольдса нужно проанализировать. При $Re < 10^3$ в условиях опыта течение можно считать ламинарным.

6. Контрольные вопросы

1. Физический смысл коэффициента вязкости, единицы измерения, зависимость его от параметров состояния.
2. Понятие средней длины свободного пробега молекул, выражение для её расчета в кинетической теории, зависимость от рода газа и параметров состояния.
3. Вывод формулы (5.4) для расчета длины свободного пробега молекул λ .
4. Почему, несмотря на истечение воды из аспиратора, с некоторого момента устанавливается постоянная разность давлений $\Delta p = (p_1 - p_2)$ в манометре?
5. Сущность метода измерения η и вывод расчетной формулы. В каких условиях она применима?
6. Можно ли в качестве манометрической жидкости в данной работе использовать ртуть?

7. Содержание отчета

Название работы, цель, приборы и принадлежности, расчетные формулы, таблица наблюдений и вычислений, результаты работы, краткие выводы с анализом результатов.