

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Московский энергетический институт
(технический университет)
Волжский филиал

Кафедра общетехнических дисциплин

В.П.Мельников, С.В.Кулешина

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по курсу
«Физика. Основы молекулярной физики»

Лабораторная работа № 11.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ
И СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА
МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА**

Л
УДК 532

Рецензент:

Петухов И.М., кандидат технических наук, доцент кафедры СД

В. П. Мельников, С. В. Кулешина,

Лабораторный практикум по курсу «Физика. Основы молекулярной физики».
Лабораторная работа № 11. Определение коэффициента внутреннего трения и
средней длины свободного пробега молекул воздуха.

При выполнении лабораторной работы студенты экспериментально определяют коэффициент трения жидкости по методу Стокса, заполняют таблицу результатов измерений.

Л
УДК 532

© В.П.Мельников
С.В.Кулешина

Лабораторная работа № 11

Определение коэффициента внутреннего трения и средней длины свободного пробега молекул воздуха

1. Цель работы.

Экспериментальное определение коэффициента внутреннего трения воздуха, определение средней длины пробега молекул воздуха.

2. Теоретические основы работы.

Для определения коэффициента внутреннего трения воздуха в лабораторной работе используется метод, основанный на истечении воздуха через капилляр. Этот метод носит название метода Пуазейля.

Рассмотрим ламинарное течение воздуха в капилляре (рис 2.1). Течение называют ламинарным, или слоистым, если поток представляет собой совокупность слоёв, перемещающихся друг относительно друга без перемешивания. Наличие внутреннего трения приводит к возникновению градиента скорости упорядоченного движения dv/dr . Из условия симметрии очевидно, что скорость зависит от расстояния r между рассматриваемой точкой и осью капилляра.

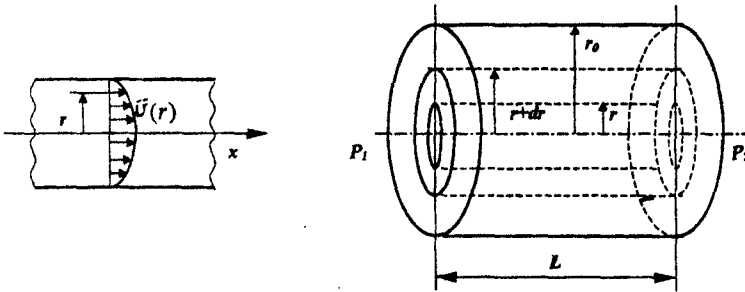


Рис. 2.1

Вырежем мысленно в газе цилиндрический слой (рис 2.2) внутренним радиусом r и внешним радиусом $r+dr$. На этот слой со стороны более быстрых слоёв по закону Ньютона для внутреннего трения действует ускоряющая сила:

$$F(r) = \eta \left| \frac{dv}{dr} \right| S, \quad (2.1)$$

где

S – площадь боковой поверхности цилиндра $S = 2\pi rL$

Со стороны более медленных слоёв, прилегающих к выбранному, действует «замедляющая» сила $F(r+dr)$, причём силы $F(r)$ и $F(r+dr)$ направлены в

противоположные стороны, результирующая сила, действующая на выбранный слой, может быть найдена с использованием соотношения

$$F(r + dr) \approx F(r) + dF,$$

тогда

$$F(r) - F(r + dr) = -dF. \quad (2.2)$$

Опуская знаки модуля и подставив значение S из (2.1) получим:

$$dF = -2\pi\eta L d \left| r \frac{dv}{dr} \right| \quad (2.3)$$

Градиент упорядоченной скорости $dv/dr < 0$ самая большая скорость на оси симметрии (рис 2.2), поэтому сила dF – положительная. Эта сила при стационарном течении воздуха равна силе dF' , действующей на слой из-за разности давлений $p_1 - p_2$.

$$dF' = (p_1 - p_2) \cdot dS = (p_1 - p_2) \cdot 2\pi r \cdot dr. \quad (2.4)$$

Путём математических преобразований из (2.3) и (2.4) получим зависимость упорядоченной скорости $U(r)$:

$$U = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} (r_0^2 - r^2). \quad (2.5)$$

Из выбранного нами слоя (рис 2.2) за время τ вытечет объём газа $dV = U\tau 2\pi r dr$. Используя соотношение 2.5, получим

$$dV = \frac{\pi(p_1 - p_2)\tau}{2\eta L} (r_0^2 r - r^3) dr. \quad (2.6)$$

Проинтегрируем 2.5 по всей площади поперечного сечения капилляра от $r=0$ до $r=r_0$:

$$V = \frac{\pi(p_1 - p_2)\tau}{2\eta L} \int_0^{r_0} (r_0^2 r - r^3) dr = \frac{\pi(p_1 - p_2)}{8\eta L} r_0^4 \tau. \quad (2.7)$$

Из последнего соотношения получим формулу Пуазейля:

$$V = \frac{1}{8} \frac{\pi r_0^4}{\eta L} (p_1 - p_2) \tau \quad (2.8)$$

Из формулы Пуазейля выразим коэффициент внутреннего трения (вязкость) воздуха:

$$\eta = \frac{\pi_0^4 (p_1 - p_2) \tau}{8LV} \quad (2.9)$$

где

V – объём воздуха, протекающего через капилляр

τ – время истечения данного объёма воздуха

Методами молекулярно-кинетической теории идеального газа получено следующее выражение для коэффициента внутреннего трения:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle \quad (2.10)$$

Здесь $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$ – средняя скорость теплового движения молекул идеального газа;

μ – молярная масса; T – температура; R – универсальная газовая постоянная.

$\langle l \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул, вычисляемая по формуле:

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{эфф} \cdot n} \quad (2.11)$$

$\sigma_{эфф}$ – эффективное сечение соударения молекул;

n – число молекул газа в единице объёма (концентрация);

ρ – плотность газа.

3. Описание экспериментальной установки.

Экспериментальная установка (рис 3.1) состоит из приборного модуля №1 и функционального модуля №11. На передней панели функционального модуля расположен крепёжный винт 1, табличка с названием работы 2, клапан K2 перепуска воды из вспомогательного бачка в мерную ёмкость, клапан K1 подачи воздуха в мерную ёмкость для перепуска воды из этой ёмкости во вспомогательную, водяной U-манометр 3 и уровнемер с измерительными шкалами 4

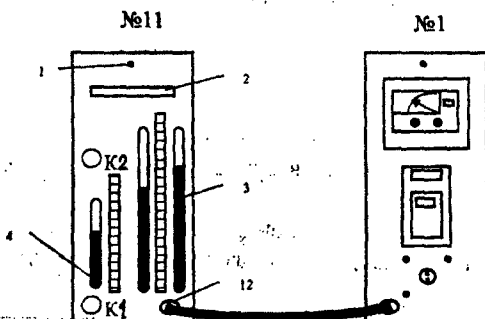


Рис 3.1

Схема установки (рис 3.2) включает капилляр 1, соединённый одним концом через систему пневмопровода с мерной ёмкостью 2 и U-манометром 3. Другой конец

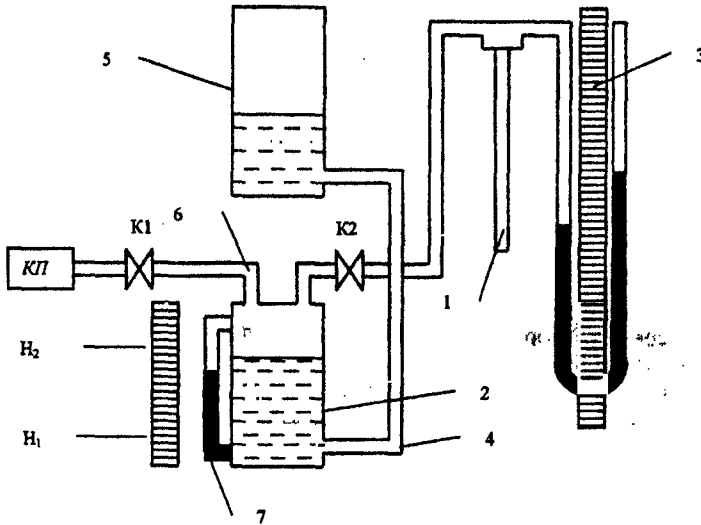


Рис 3.2

капилляра сообщается с атмосферой. Мерная ёмкость 2 соединена резиновой трубкой 4 со вспомогательным сосудом 5, в котором находится вода. С помощью резиновой трубки 6 мерная ёмкость соединена с микрокомпрессором приборного модуля. При закрытом клапане K1 и открытом (нажатом) клапане K2 вода из вспомогательной ёмкости 5 через трубку протекает в мерную ёмкость 2. При этом вода вытесняет воздух из мерной ёмкости через капилляр в атмосферу. Объём воздуха, протёкшего через капилляр, определяется по изменению уровня воды в мерной ёмкости. Так как сечение капилляра мало, то возникает разность давления воздуха на его концах, которая измеряется водяным U-манометром.

$$p_1 - p_2 = \rho_g \cdot g(h_1 - h_2), \quad (3.1)$$

где

ρ_g — плотность воды, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$

g — ускорение силы тяжести $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$

$h_1 - h_2$ — разность уровней воды в манометре, м

Время истечения заданного объёма воздуха из мерной ёмкости измеряется с помощью секундомера.

Поскольку разность давлений на концах капилляра в момент включения секундомера и в момент его выключения различна, то необходимо взять среднюю

разность давлений за время проведения опыта. Для линейной зависимости $\Delta p = f(\tau)$

$$(p_1 - p_2)_{\text{ф}} = \frac{\Delta h_n + \Delta h_k}{2} \cdot \rho_w \cdot g \quad (3.2)$$

где $\Delta h_n, \Delta h_k$ - разность уровней воды в манометре на начало и конец опыта. Для определения средней длины свободного пробега молекул воздуха используется соотношение

$$(l) = 1,88 \left(\frac{\eta}{p_0} \right) \cdot \sqrt{\frac{RT}{\mu}} \quad (3.3)$$

где

p_0 - атмосферное давление, Па;
 T - температура воздуха, К;
 μ - молярная масса воздуха кг·моль⁻¹.

4. Данные установки и таблица результатов измерений.

Длина капилляра $L=70$ мм; радиус капилляра $r_0=0,45$ мм; молярная масса воздуха $\mu=0,029$ кг·моль⁻¹; атмосферное давление $p_{\text{атм}} = \quad$ Па; температура воздуха $T=K$; объём воды между двумя мерными ёмкостями $V=S \cdot H=10^3$ м³; универсальная газовая постоянная $R=8,31$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹.

Таблица №1.

№	$\Delta h_n, \text{мм}$	$\Delta h_k, \text{мм}$	$\tau, \text{с}$	$\Delta p_{\text{ф}}, \text{Па}$	$\eta, \text{Па·с}$

5. Порядок выполнения работы.

1. Проверить соединение штуцера 12 пневмопровода функционального модуля со штуцером компрессора приборного модуля.
2. Включить электропитание приборного модуля тумблером «Сеть», компрессор – тумблером «Микрокомпрессор».
3. Нажать клавишу клапана К1 и установить уровень воды в мерной ёмкости на отметке уровнемера около 170 мл.
4. Нажать клавишу клапана К2 и в момент прохождения уровня воды в мерной ёмкости нижней отметки уровнемера H_1 включить секундомер, произвести

- отсчёт разности уровней жидкости в водяном U-манометре Δh_n . Результат записать в таблицу №1.
5. В момент прохождения уровня воды в мерной ёмкости верхней отметки уровнемера H_2 выключить секундомер и произвести отсчёт разности уровней жидкости в манометре Δh_k . Результат записать в таблицу. Отпустить клапан К2.
 6. Пункты 2+5 повторить 3 раза.
 7. По барометру определить давление воздуха в лаборатории; по термометру определить температуру воздуха.

6.Обработка результатов измерений.

1. По формуле (3.2) рассчитать среднее значение разности давлений на концах капилляра – $(p_1 - p_2)_{cp}$ для каждого опыта.
2. Рассчитать коэффициент внутреннего трения воздуха по формуле (2.9) и среднюю длину свободного пробега молекул воздуха по формуле (3.3).
3. Определить среднее значение из 3х замеров.
4. Рассчитать погрешность измерения коэффициента внутреннего трения воздуха

$$\Delta\eta = \eta \sqrt{\frac{(\Delta h_n)^2 + (\Delta h_k)^2}{\Delta h_{cp}}}$$

$$\text{где } \Delta h_{cp} = \frac{\Delta h_n + \Delta h_k}{2}$$

$\Delta h_n = \Delta h_k = 2\text{мм}$ - погрешность измерения разностей уровней воды в манометре.

5. Записать результаты с учётом погрешности.

Контрольные вопросы

1. Что такое внутреннее трение газа?
2. Закон Ньютона для внутреннего трения?
3. Что такое коэффициент внутреннего трения? Единицы измерения?
4. Формула Пуазейля?
5. Что такое длина свободного пробега молекулы?
6. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона)?
7. Как определить η методом молекулярно-кинетической теории?
8. Что такое ламинарное течение?

Литература

1. *Савельев И.В.* Общий курс физики. Т. 1. Механика и молекулярная физика. М.: Наука. 1986. с. 195-406.
2. *Детлав А.А.* Курс физика. Т. 1. М.: Высшая школа. 1973. с. 219-231, 347.

Содержание

Цель работы. Теоретические основы работы.	2
Описание экспериментальной установки.	4
Данные установки и таблица результатов измерений.	6
Порядок выполнения работы.	6
Обработка результатов измерений.	7
Контрольные вопросы.	7
Литература	8

Лабораторный практикум
по курсу “Физика. Основы молекулярной физики”

Лабораторная работа № 11
Определение коэффициента внутреннего трения
и средней длины свободного пробега молекул воздуха

В.П.Мельников, С.В.Кулешина

Редактор Г.П.Халдеева
Компьютерная верстка Т.К.Вдовенко

Подписано в печать 05.06.00 Формат 60х90 $\frac{1}{16}$.
Усл. печ. л.04. Тираж 50 экз. Заказ 5.

Издатель: ВФ МЭИ, 404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69
Отпечатано: ВФ МЭИ, 404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69