

## Лабораторная работа № 4

### Определение коэффициента вязкости воздуха

*Цель работы* вычисление средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекулы азота по коэффициенту внутреннего трения воздуха.

### Теоретическая часть

Заметное отклонение молекул от прямолинейных траекторий при тепловом движении происходит только при их достаточном сближении. Такое взаимодействие между молекулами называется столкновением. Процесс столкновения удобно характеризовать величиной эффективного диаметра молекулы. Под ним понимают минимальное расстояние, на которое могут сблизиться центры двух молекул при их столкновении.

Расстояние, которое проходит молекула между двумя последовательными столкновениями, называют длиной свободного пробега молекулы. Из-за хаотичности движения молекул длина свободного пробега изменяется от столкновения к столкновению, поэтому на практике важно знать среднюю длину свободного пробега молекул  $\langle l \rangle$ .

Молекулярно-кинетическая теория позволила получить формулы, в которых макроскопические параметры газа связаны с его микропараметрами. Пользуясь этими формулами, можно при помощи легко измеряемых макропараметров (давление, температура, коэффициент внутреннего трения) получить интересующие нас микропараметры (размер молекулы, среднюю длину её свободного пробега).

Молекулярно-кинетическая теория устанавливает связь между средней длиной свободного пробега  $\langle l \rangle$ , эффективным диаметром молекул  $d$  и концентрацией молекул в газе  $n$

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}. \quad (1)$$

Внутреннее трение (вязкость) газа характеризуется коэффициентом динамической вязкости  $\eta$ , который зависит от плотности газа  $\rho$ , средней скорости молекул  $\langle v \rangle$  и средней длины свободного пробега  $\langle l \rangle$  следующим образом

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle. \quad (2)$$

Средняя скорость молекул идеального газа может быть вычислена из закона распределения Максвелла

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}, \quad (3)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура,  $M$  – молярная масса газа.

Плотность газа ( $\rho = m/V$ ) можно определить, используя уравнение Менделеева – Клапейрона

$$\rho = \frac{pM}{RT}, \quad (4)$$

где  $p$  – давление газа. Из формул (2), (3) и (4) получим

$$\langle l \rangle = \frac{3\eta}{p} \sqrt{\frac{\pi RT}{8M}}. \quad (5)$$

Если в эксперименте измерить коэффициент вязкости воздуха  $\eta$ , то по формуле (5) легко вычислить среднюю длину свободного пробега молекул  $\langle l \rangle$ , а затем при помощи формулы (1) определить эффективный диаметр молекулы  $\langle d \rangle$ , предварительно выразив концентрацию из формулы

$$p = nkT, \quad (6)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К).

Из формул (1), (5) и (6) получим

$$d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2\pi p \langle l \rangle}}}. \quad (7)$$

При ламинарном протекании газа (или жидкости) через цилиндрическую трубку длиной  $l_K$  и диаметром  $d_K$  объём газа  $V$ , протекающего за время  $\tau$ , зависит от вязкости. Эта зависимость выражается формулой Пуазейля<sup>1</sup>

$$V = \frac{\pi d_K^4 \Delta p \tau}{128 l_K \eta}, \quad (8)$$

---

<sup>1</sup>Пуазейль (Пуазей) (Poiseuille) Жан Луи Мари (1799-1869), французский врач и физик. Труды по физиологии дыхания, динамике кровообращения. Первым применил (1828) ртутный манометр для измерения кровяного давления животных. Экспериментально установил закон истечения жидкости.

где  $\Delta p$  – разность давлений на концах трубки. В данной работе измеряются  $V$ ,  $\Delta p$ ,  $\tau$  и из формулы (8) определяется  $\eta$ .

## Экспериментальная часть

### Описание установки

Для определения коэффициента внутреннего трения воздуха используется установка, внешний вид которой показан на рис. 1.

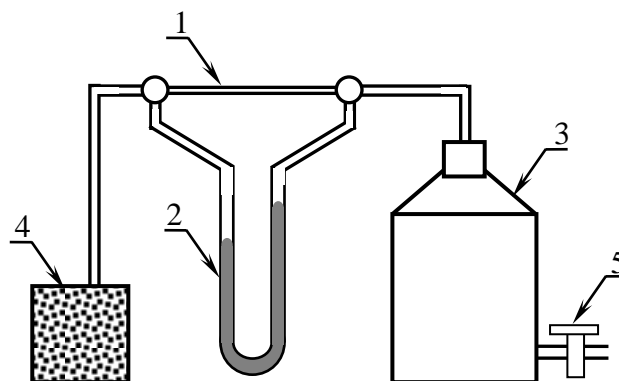


Рис. 1. Схема установки

Капилляр (1) длиной  $l_K$  и диаметром  $d_K$ , к концам которого подключен манометр (2), соединен одним концом с аспиратором (3), а другим с осушителем (4). Когда из аспиратора выливается вода, давление в нём понижается, и через капилляр течет воздух, который засасывается через осушительный фильтр (4) с хлоридом кальция  $\text{CaCl}_2$ . Вследствие внутреннего трения давления на концах капилляра неодинаковы. Разность этих давлений  $\Delta p$  измеряется манометром. Объём  $V$  воздуха, прошедшего за время  $\tau$  через капилляр, равен объёму вытекшей из аспиратора воды и определяется по его шкале в литрах. Экспериментальная установка представлена на рис. 2.

### Выполнение работы

1. По приборам лаборатории определить температуру воздуха в аудитории  $t_k$  и атмосферное давление  $p_{am}$ . Результаты записать.
2. Заполнить аспиратор водой так, чтобы её уровень был выше нулевого деления шкалы аспиратора.
3. Открыть кран (5) и выждать некоторое время, пока установится стационарное течение (при этом разность уровней жидкости в манометре будет постоянной). Записать эту разность уровней  $\Delta h_1$  (это и последующие значения заносятся в таблицу).
4. Когда уровень воды достигнет нулевого деления на шкале аспиратора, включить секундомер. После того как вытечет объём воды  $V$  (значение задаёт преподаватель), выключить секундомер (кран (5) не закрывать) и вновь записать разность

уровней жидкости в манометре  $\Delta h_2$ . Теперь закрыть кран (5). Записать показание секундомера. Опыт повторить пять раз.

№	$\tau, \text{с}$	$\Delta h_1, \text{м}$	$\Delta h_2, \text{м}$	$\Delta h, \text{м}$	$V, \text{м}^3$	$\Delta p, \text{Па}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$
1							
2							
3							
4							
5							

5. Для нахождения разности давлений на концах капилляра следует воспользоваться известной формулой  $\Delta p = \rho_{жс} g \langle \Delta h \rangle$ , где  $\rho_{жс}$  – плотность жидкости в манометре (жидкость, используемая в манометре, указана на установке),  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения,  $\langle \Delta h \rangle = (\Delta h_1 + \Delta h_2) / 2$ .

6. Вычислить вязкость воздуха  $\eta$  для пяти измерений и среднее значение вязкости воздуха  $\langle \eta \rangle$ .

Длина капилляра  $l_K$  и его диаметр  $d_K$  указаны на установке.

7. Вычислить, используя ранее рассчитанное значение  $\langle \eta \rangle$ .

Определите среднюю

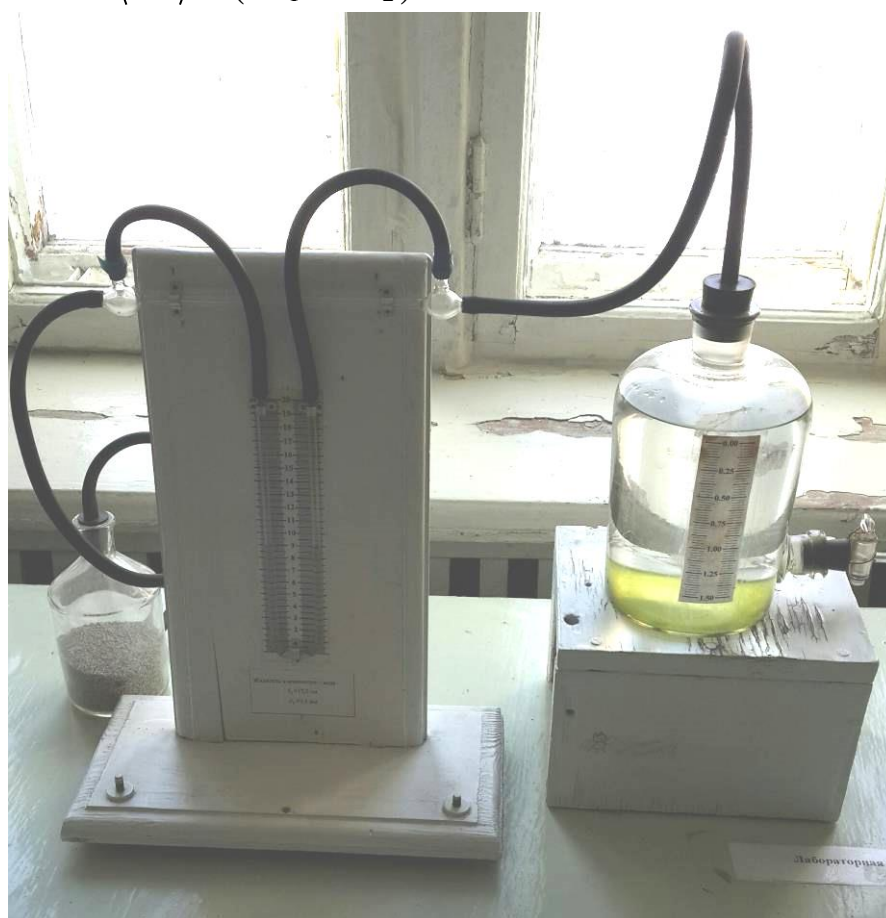


Рис. 2. Экспериментальная установка

длину свободного пробега  $\langle l \rangle$  и эффективный диаметр  $\langle d \rangle$  молекулы азота, который составляет 78,1% воздуха. Принять за давление и температуру в расчётных формулах атмосферное давление и температуру в аудитории.

8. Рассчитать абсолютную  $\Delta\langle\eta\rangle$  и относительную  $\varepsilon_{\langle\eta\rangle}$  погрешности определения вязкости воздуха, записать окончательный результат.
9. Сравнить полученные результаты  $\langle\eta\rangle$ ,  $\langle l \rangle$  и  $\langle d \rangle$  с табличными значениями.

### Контрольные вопросы

1. Что называют средней длиной свободного пробега и эффективным диаметром молекул газа?
2. Объяснить молекулярно-кинетический механизм вязкости газов.
3. Как зависят средняя длина свободного пробега и эффективный диаметр молекул газа от температуры?

### Литература

1. Лабораторный практикум по физике / Под ред. Ахматова Д.С. М. 1980.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. – 5-е изд. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.
3. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика.– СПб. Лань, 2008. — 480 с.
4. Физические величины Справочник / Под ред. И. К. Кикоина.– М. Атомиздат, 1976.

**Лабораторная работа № 4. Лист отчёта**  
**Определение коэффициента вязкости воздуха**

Выполнил студент \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_  
 Проверил \_\_\_\_\_  
 Показания сняты \_\_\_\_\_  
 Зачтено \_\_\_\_\_

Погрешности измерительных приборов  $\alpha =$  \_\_\_\_\_

Измерительный прибор	$\omega$ – цена деления	$\Delta_{\text{окр}}$ – округления	$\Delta_{\text{пр}}$ – приборная	$\Delta_{\text{суб}}$ – субъективная	Единицы измерения
Комнатный термометр					
Барометр					
Секундомер					
Жидкостный манометр					
Шкала аспиратора					

**Результаты измерений**

Величина	Значение		Абсолютная погрешность	Единицы измерения	Относительная погрешность
$t_k =$		$\pm$			
$p_{\text{ат}} =$		$\pm$			

№	$\tau$ , с	$\Delta h_1$ , м	$\Delta h_2$ , м	$V$ , м <sup>3</sup>
1				
2				
3				
4				
5				

**Константы и параметры установки**

Величина	Значение		Абсолютная погрешность	Единицы измерения	Относительная погрешность
$\rho_{\text{ж}} =$		$\pm$			
$d_k =$		$\pm$			
$l_k =$		$\pm$			
$g =$		$\pm$			

Формулы для расчёта косвенных измерений

Промежуточные расчёты

№	$\langle \Delta h \rangle$ , м	$\Delta p$ , Па	$\eta$ , Па·с
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			

Ответ:

Величина	Значение		Абсолютная погрешность	Единицы измерения	Относительная погрешность
$\eta =$		$\pm$			
$\langle d \rangle =$		$\pm$			
$\langle l \rangle =$		$\pm$			
Табличные значения					
$\eta_T =$		$\pm$			
$d_T =$		$\pm$			
$\langle l \rangle_T =$		$\pm$			

Интервалы сравнений