

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 13.03.2023 10:45:42

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb1755d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

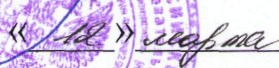
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра физики

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор –  
проректор по учебной работе

 Е.А. Кудряшов

«» 2012 г.



### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ВОЗДУХА, ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА И ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА**

Методические указания к выполнению лабораторной  
работы №22 по разделу “Механика и молекулярная физика”

Курск 2012 г.

УДК 534.2

Составители: В.М. Полунин, Л.И. Рослякова

Рецензент

Кандидат физ.-мат. наук, доцент Г.Т. Сычев

**Определение коэффициента внутреннего трения воздуха, длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха** : методические указания к лабораторной работе № 22 по разделу “Механика и молекулярная физика” / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.М. Полунин, Л.И. Рослякова Курск, 2012. 9 с.: ил. 3, табл. 1. Библиогр.: 4 назв.

Методические указания соответствуют требованиям Государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (2010 год) и рабочих учебных планов технических специальностей ЮЗГУ.

Предназначены для студентов технических специальностей.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60 x 84 1/16.  
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж экз. Заказ . Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## Лабораторная работа № 22

## Определение коэффициента внутреннего трения воздуха, длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха

Цель работы: определить молекулярно-кинетические параметры молекул идеального газа с помощью косвенных измерений.

Приборы и принадлежности: сосуд с краном и капилляром, мензурка, стакан, секундомер, термометр, барометр.

### ВВЕДЕНИЕ

#### *1. Явления переноса. Молекулярно-кинетические параметры идеального газа*

Согласно положениям кинетической теории газов, последние состоят из большого количества хаотически движущихся молекул. В результате этого беспорядочного движения молекулы переносят из одних точек пространства в другие свою массу, количество движения, энергию. Это приводит к возникновению некоторых явлений, называемых явлениями переноса. К ним относятся:

- 1) диффузия, обусловленная переносом массы молекул;
- 2) внутреннее трение или вязкость, обусловленное переносом количества движения молекул;
- 3) теплопроводность, обусловленная переносом энергии молекул.

Рассмотрим явление внутреннего трения или вязкости. Опытным путем была определена формула для силы внутреннего трения, возникающего между двумя слоями, находящимися друг от друга на расстоянии  $dz$  и движущимися вдоль оси  $x$  со скоростью  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$ , отличающимися на  $d\vartheta$  (рис.1).

$$F = -\eta \frac{d\vartheta}{dx} \cdot S, \quad (1)$$

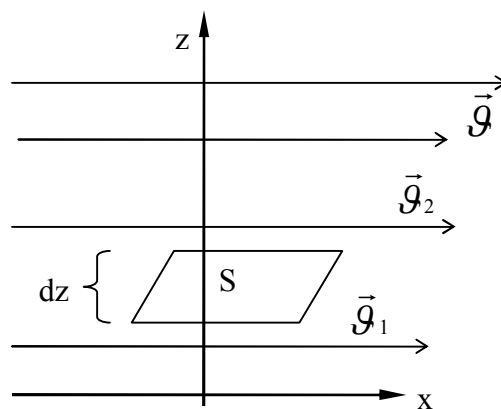


Рис. 1

где  $F$  – сила внутреннего трения;  $S$  - площадь слоев;  $\eta$  – коэффициент сдвиговой вязкости.

Величина  $\frac{d\vartheta}{dz}$  называется градиентом скорости и показывает быстроту изменения скорости при переходе от слоя к слою в перпендикулярном скорости направлении. Знак "-" показывает, что сила  $F$  направлена в сторону уменьшения скорости.

Формула (1) справедлива для движущихся слоев как жидкости, так и газа, однако причины вязкого трения в газах и жидкостях существенно различны. Так в жидкостях молекулы находятся на более близком расстоянии, чем в газах, и силы молекулярного сцепления в них больше. Поэтому вязкость в жидкостях объясняется, в основном, влиянием этих сил. Один быстрее движущийся слой жидкости как бы прилипает к другому, более медленному, и увлекает его, а сам несколько притормаживается.

В газах также имеет место это явление. Однако в газах молекулярные расстояния больше, силы сцепления меньше, хаотическое движение больше. Поэтому более существенным для газов является перенос количества движения молекулами из более быстрого слоя в более медленный слой. В результате медленный слой обогащается быстрыми молекулами и ускоряется, а быстрый слой обедняется быстрыми молекулами и замедляется.

Кинетическая теория газов с учетом распределения Максвелла молекул по скоростям дает следующее выражение для коэффициента вязкости:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle u \rangle, \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность газа;

$\langle \lambda \rangle$  - средняя длина свободного пробега молекул;

$\langle u \rangle$  - средняя арифметическая скорость движения молекул.

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

где  $R$  - универсальная газовая универсальная;

$\mu$  - масса киломоля газа.

Молекулы газа, находясь в состоянии хаотического теплового движения, непрерывно сталкиваются друг с другом. Между двумя

последовательными столкновениями молекулы проходят некоторый путь, который называется длиной свободного пробега. В общем случае длина пути между последовательными столкновениями различна, но так как мы имеем дело с огромным числом молекул и они находятся в беспорядочном движении, то можно говорить о средней длине свободного пробега молекул.

Минимальное расстояние, на которое сближаются центры двух молекул при столкновении, называется эффективным диаметром молекулы.

В данной работе требуется определить для частиц воздуха среднюю длину свободного пробега  $\lambda$ , среднюю арифметическую скорость теплового движения  $\langle u \rangle$ , эффективный диаметр  $d$  и коэффициент сдвиговой вязкости  $\eta$ .

Если найти способ определения коэффициента вязкости  $\eta$ , то из формулы (2) можно найти  $\langle \lambda \rangle$ :

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle u \rangle}. \quad (4)$$

Плотность газа выразим из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$\rho = \frac{p}{RT} \cdot \mu. \quad (5)$$

Подставляя (5) и (3) в (4), получим:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{2p} \sqrt{\frac{\pi RT}{2\mu}}, \quad (6)$$

где  $p$  - атмосферное давление.

Эффективный диаметр молекул связан с длиной свободного пробега следующим соотношением:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}, \quad (7)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана.

С учетом этого эффективный диаметр молекул можно определить по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\lambda p}}. \quad (8)$$

## 2. Определение коэффициента вязкости методом Пуазейля

Метод основан на медленном ламинарном течении газа или

жидкости в тонком капилляре (ламинарным или слоистым называется течение, если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними).

Рассмотрим капилляр радиусом  $R$  и длиной  $l$ . В газе (жидкости) мысленно выделим цилиндрический слой радиусом  $r$  и толщиной  $dr$  (рис. 2). Сила вязкого трения, действующая на боковую поверхность этого слоя, согласно формуле (1) равна:

$$F = -\eta \frac{d\vartheta}{dr} \cdot S = -\eta \cdot 2\pi r l \frac{d\vartheta}{dr}.$$

Для установившегося медленного ламинарного течения газа (жидкости) сила внутреннего трения, действующая на боковую поверхность цилиндра, уравновешивается силой давления, действующей на его основание:

$$-\eta 2\pi r l \frac{d\vartheta}{dr} = \Delta p \pi r^2, \quad (9)$$

где  $\Delta p$  - разность давлений на концах капилляра.

Из уравнения (9) получаем:

$$d\vartheta = -\frac{\Delta p}{2\eta l} r dr. \quad (10)$$

После интегрирования уравнения (10), полагая, что у стенок имеет место прилипание жидкости (газа), то есть скорость на расстоянии  $R$  от оси равна нулю, получаем:

$$\vartheta = \frac{\Delta p}{4\eta l} (R^2 - r^2).$$

Отсюда видно, что скорости частиц в поперечном сечении капилляра распределяются по параболическому закону, причем вершина параболы лежит на оси трубы (рис. 2).

За время  $\tau$  через капилляр пройдет объем газа (жидкости)

$$V = \int_0^R \vartheta \cdot \tau \cdot 2\pi r dr = \frac{2\pi \Delta p \tau}{4\eta l} \int_0^R r (R^2 - r^2) dr = \frac{\pi \Delta p \tau}{2\eta l} \left[ \frac{r^2 R^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_0^R =$$

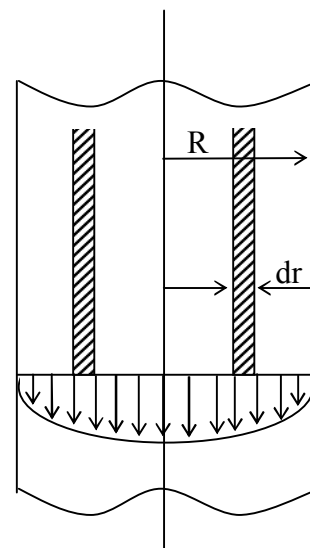


Рис.2

$$= \frac{\pi R^4 \Delta p \tau}{8 \eta \ell}.$$

Откуда вязкость

$$\eta = \frac{\pi R^4 \tau}{8 V \ell} \Delta p. \quad (11)$$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Установка для определения коэффициента вязкости состоит из сосуда 1, пробки с капилляром 2, крана 3, шкалы 4 (рис. 3). В сосуд налита вода. При закрытом кране давление воздуха над водой внутри сосуда равно атмосферному и суммарное давление, оказываемое воздухом и водой на отверстие крана внутри сосуда больше атмосферного давления. Поэтому, как только мы открываем кран, вода начнет вытекать струйкой из сосуда.

Со временем давление воздуха внутри сосуда будет уменьшаться, т. к. диаметр капилляра 2 много меньше диаметра отверстия крана 3 и за одно и тоже время объем вытекшей воды больше объема воздуха, зашедшего через капилляр 2. В результате наступает момент, когда суммарное давление воздуха и воды в сосуде на отверстие крана становится равным атмосферному. В этот момент времени вода начнет вытекать каплями. На концах капилляра 2 установится постоянная разность давлений

$$\Delta p = p_{\text{атм}} - p_1 = \rho g h_1,$$

где  $\rho$  - плотность воды;

$h_1$  - высота столба воды в сосуде;

$p_1$  - давление воздуха внутри сосуда.

При этом в капилляре 2 будет наблюдаться ламинарное течение воздуха (рис.2) и объем газа, протекшего через капилляр 2, будет равен объему воды, вытекшей каплями из сосуда. Таким образом,

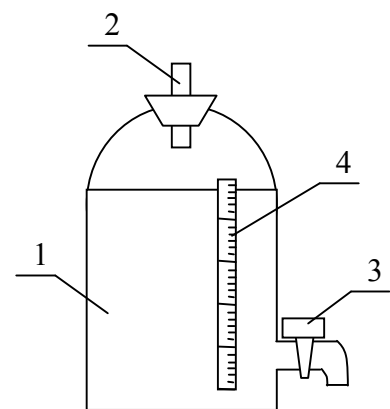


Рис.3

определив с помощью мензурки объем воды, вытекшей каплями из сосуда за определенное время  $\tau$ , можно по формуле (11) рассчитать коэффициент вязкости воздуха, а затем по формулам (6) и (8) определить длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул воздуха.

За разность давления на концах капилляра можно принять среднюю разность в начале и в конце опыта:

$$\Delta p = \frac{h_1 + h_2}{2} \rho g, \quad (12)$$

где  $h_2$  - высота столба воды в сосуде в конце опыта.

Радиус капилляра  $R$  и его длина  $\ell$  заданы.

### ЗАДАНИЕ

1. Измерить температуру  $T$  и атмосферное давление  $p$ .
2. Подставив стакан под отверстие в сосуде, полностью открыть кран.
3. Когда вода начнет вытекать каплями, подставить мензурку вместо стакана, включить секундомер и отметить уровень жидкости  $h_1$  в этот момент времени.
4. Набрав в мензурку 50-70 см<sup>3</sup> воды, снова отметить уровень  $h_2$  воды и остановить секундомер.
5. Повторить опыт 3 раза.
6. Произвести расчеты величины средней арифметической скорости молекул  $\langle u \rangle$  по формуле (3), разности давлений  $\Delta p$  на концах капилляра по формуле (12), коэффициента вязкости по формуле (11), средней длины свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$  по формуле (7) и эффективного диаметра молекул воздуха  $d$  по формуле (8). Расчет всех величин произвести для каждого опыта в отдельности.
7. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 1.
8. Сравнить значения эффективного диаметра молекул воздуха, полученного экспериментально, с теоретическими значениями диаметров молекул азота и кислорода. Сделать выводы.



Таблица 1.

№	$h_1,$ $10^{-3}$ м	$h_2,$ $10^{-3}$ м	$V,$ $10^{-6}$ м <sup>3</sup>	$\tau,$ с	$\langle u \rangle,$ м/с	$\Delta p,$ Па	$\eta,$ Па·с	$\lambda,$ $10^{-6}$ м	$d,$ $10^{-10}$ м
1									
2									
3									
среднее									

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие явления переноса в газах вы знаете? В чем отличие внутреннего трения в газах от внутреннего трения в жидкостях?
2. Что такое средняя длина свободного пробега молекул и эффективный диаметр молекул? Выведите формулу для подсчета длины свободного пробега.
3. Получите формулу для подсчета коэффициента внутреннего трения в газах методом Пуазейля.
4. Опишите установку и методику выполнения работы.

### Список рекомендуемой литературы

1. Бордовский, Г.А. Курс физики в 3 кн. Кн. 1. Физические основы механики: Учебник / Г.А.Бордовский, С.В.Борисенко, Ю.А.Гороховский. – М.: Высш. шк., 2004. – 423 с.
2. Савельев, И.В. Курс физики: Учебное пособие в 3-х тт. Т.1 Механика. Молекулярная физика / И.В.Савельев. – СПб: Из-во «Лань», 2007. – 352 с.
3. Федосеев В.Б. Физика: Учебник / В.Б.Федосеев. – Ростов н/Д: Феникс, 2009. – 669 с.
4. Гладун, А.Д. Лабораторный практикум по общей физике. Т.1 Термодинамика и молекулярная физика / Под ред. А.Д.Гладуна. – М.: МФТИ, 2003. – 308 с.