

## Лабораторная работа № 21

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ВОЗДУХА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ.

**Принадлежности:** лабораторная установка.

**Цель работы:**

1. Определение коэффициента внутреннего трения воздуха при различных температурах.
2. Определение средней длины свободного пробега молекул в воздухе.

**Введение.**

Если в текущей жидкости (газе) соседние слои имеют различную скорость, то между ними возникает сила внутреннего (вязкого) трения, определяемая законом Ньютона

$$|f| = \eta \frac{|dv/dx|}{dx} \Delta S$$

где  $\eta$  – коэффициент внутреннего трения (или коэффициент вязкости),  $dv/dx$  – градиент скорости – это вектор, который направлен в сторону наибо́льшего возрастания скорости слоев текущей жидкости,  $\Delta S$  – элементарная площадка на поверхности соприкосновения слоев, перпендикулярная градиенту скорости. Коэффициент внутреннего трения является важной характеристикой жидкости(газа), зависящей от ее природы, так и от температуры.

Коэффициент внутреннего трения газа измеряют различными способами. В данной работе применяется метод, основанный на использовании закона Пуазейля, сущность которого заключается в следующем. При ламинарном течении жидкости по трубе круглого сечения, как показали Пуазейль и Стокс, объем протекшей жидкости за время  $\tau$  равен

$$\eta = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2) \tau}{8LV} \qquad \eta = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2)}{8LG} \qquad (1)$$

где  $p_1 - p_2 = \rho_B g (h_1 - h_2)$  – разность давлений воздуха на входе и выходе из капилляра,

$(h_1 - h_2)$  – разность уровней воды в манометре;

$r$  – радиус капилляра;

$L$  – длина капилляра;

$V$  – объём воздуха, протекающего через капилляр за время  $\tau$  при данной температуре.

$\rho_B$  – плотность воды при температуре и давлении в лаборатории.

Эта формула справедлива не только для капельных жидкостей, но и для **плотных** газов (когда  $\lambda \ll r$  – радиуса трубки), если им обеспечен ламинарный режим течения. Предполагается, что в трубке достаточной длины и малого радиуса (капилляре) при условиях близких к нормальным, газ течет *ламинарно*.

Средней длиной пробега молекул в газе  $\bar{\lambda}$  называется среднее расстояние, которое пролетает молекула от одного столкновения до следующего. Она зависит от условий, при которых находится газ, и от свойств молекул следующим образом

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{эфф} n}, \quad (2)$$

$\sigma_{эфф}$  – эффективное сечение молекул;  $n$  – число молекул газа в единице объёма (концентрация). Площадь сечения сферы ограждения молекул по большому кругу называется эффективным сечением молекулы при рассеянии ее на других молекулах. Эффективное сечение  $\sigma = \pi d^2$ , где  $d$  – диаметр молекулы.

Согласно молекулярно-кинетической теории газа тепловое хаотическое движение молекул газа является причиной так называемых *явлений переноса*, к которым, в частности, относится *внутреннее трение (или вязкость)*.

Дальнейшие рассуждения и выводы относятся к *плотным газам*, в которых длина свободного пробега молекул намного меньше характерного размера сосуда, в нашем случае длина пробега меньше радиуса капилляра. Из теории получается не только ньютоновский закон внутреннего трения, но и *коэффициент внутреннего трения*  $\eta$ , который выражается следующей формулой:

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \bar{v} \cdot \bar{\lambda} \quad (3)$$

где  $\bar{\lambda}$  – средняя длина свободного пробега молекул в газе,

$\bar{v}$  – средняя скорость теплового движения молекул,

$\rho$  – плотность газа при данных условиях.

Формула (2) дает возможность определить длину свободного пробега

молекул газа, если предварительно измерен коэффициент внутреннего трения и рассчитана средняя скорость молекул и плотность по известным формулам молекулярно-кинетической теории идеального газа.

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\mu\pi}}, \quad \rho = \frac{\mu p}{RT} \quad (4)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура,  $p$  – давление,  $\mu$  – молярная масса газа. В этом случае

$$\bar{\lambda} = \frac{3\eta}{\vartheta\rho} \quad (5)$$

Из соотношений (2)-(3) следует

$$\eta = 0.39 \cdot \frac{m_0}{\sigma_{эфф}} \sqrt{\frac{R \cdot T}{\mu}}. \quad (6)$$

Если в данном диапазоне температур и давлений воздух можно приближённо считать идеальным газом, то эффективное сечение молекул остаётся постоянной величиной

и, следовательно, можно записать

$$\eta = const \cdot \sqrt{T}. \quad (7)$$

В работе предлагается проверить зависимость (7).

### Описание экспериментальной установки.

На Рис.1 и Рис.2 представлена передняя панель и схема экспериментальной установки для измерения коэффициента внутреннего трения воздуха.

Микрокомпрессор 1 прокачивает воздух через ротаметр 2 и затем направляется в медный термостат (цилиндрическая трубка) 3, внутри которой находится капилляр 4. Внутри медного термостата находится спай термопары 5, измеряющей температуру воздуха протекающего через капилляр 4 в атмосферу. Термоэлектроды 7 соединены с измерителем температуры 8. Перепад давления на капилляре измеряется  $U$  – манометром 6. Медный термостат 3 находится в керамическом цилиндре, на внешней поверхности которого находится электрический нагреватель 9, соединённый с регулятором мощности 10.



На передней панели находится тумблер включения питания установки 11, тумблер 12 включения нагревателя 9, регулятор температуры воздуха 10, протекающего через капилляр 4, измеритель температуры нагретого воздуха 13, измеритель объёмного расхода воздуха 2, протекающего через капилляр 4 (ротаметр), U – манометр 6. для измерения перепада давления воздуха на капилляре, тумблер 14 включения компрессора 1, тумблер 15 включения вентилятора.

**Внимание!** Перед выполнением работы тщательно ознакомьтесь с порядком работы. Заранее подготовьте таблицу. Конструктивные особенности лабораторной установки не позволяют быстро охладить воздух в баллоне. ИЗМЕРЕНИЯ МОЖНО ПРОВЕСТИ ТОЛЬКО ОДИН РАЗ ЗА ЗАНЯТИЕ!

### **Измерения.**

1. Включить электропитание установки тумблером 11 рис.1.
2. Включить компрессор 1 рис.2 тумблером 14, измеритель температуры 8 тумблером 13.
3. Включить питание регулятора температуры 10 тумблером 12 и нажатием клавиши 16.
4. Повернуть со щелчком ручку 17 регулятора температуры по часовой стрелке и установить до красной метки.
5. По показаниям температуры 8 наблюдать ее увеличение до  $200^{\circ}\text{C}$ .
6. Записать в таблицу показания ротаметра 2 в столбец « деление шкалы ротаметра» при температуре  $200^{\circ}\text{C}$ . Тщательно по нижним точкам менисков уровня жидкости отсчитать величины положений уровней жидкости  $h_1$  в правом колене манометра 6 и  $h_2$  - в левом колене. Записать показания температур 8 (красные цифры).
8. Выключить регулятор температур. Включить вентилятор 15. Внимательно следить за показаниями ротаметра 2, когда показания ротаметра изменятся на одно деление, записать в таблицу значения  $h_1$ ,  $h_2$  при соответствующей температуре  $t^{\circ}\text{C}$ .
9. Повторить пункт 8 при каждом изменении показаний ротаметра на одно деление (не менее 6-7 измерений).

10. По окончании эксперимента выключить вентилятор, измеритель температур.

### Обработка результатов измерений

1. Для каждой температуры рассчитать разность давлений  $\Delta p = \rho_v g(h_2 - h_1)$ ,  $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$  - плотность воды, значение  $(h_2 - h_1)$  записать в системе СИ.
2. Используя градуировочный график ротаметра определить расход воздуха  $G$ , данные записать в соответствующую колонку таблицы №1.
3. Из формулы (1) определить коэффициент внутреннего трения воздуха  $\eta$ . Значения записать в таблицу №2. Сравнить с табличным значением.
4. Построить график зависимости  $\eta$  от  $\sqrt{T}$ . Температуру перевести в Кельвины.
5. Из формулы (6) определить эффективное сечение соударения молекул, величину  $\frac{\eta}{\sqrt{T}}$ , найти из графика. Молярная масса воздуха  $\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ , универсальная газовая постоянная  $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ , масса молекулы  $m = \frac{\mu}{N_A}$ , постоянная Авогадро  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .
6. Определить диаметр молекулы по формуле  $d = \sqrt{\frac{\sigma}{\pi}}$ .
7. По формуле (2) определить длину свободного пробега  $\lambda$ , где  $n = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ 1/м}^3$ .
8. По формуле (3) определить среднюю скорость теплового движения молекул и сравнить значением полученным по формуле  $\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\mu\pi}}$  с
9. Определить плотность воздуха в лаборатории по формуле  $\rho = \frac{\mu P}{RT}$  где  $P$  - атмосферное давление воздуха.
10. Написать заключение о проведенной работе.

Таблица №1

Длина капилляра  $L=40$  мм.

Диаметр капилляра  $d=1$  мм.

Начальная температура  $t=$

№	$h_1, \text{см}$	$h_2, \text{см}$	$h_2 - h_1, \text{м}$	$t^0, \text{C}$	Деления шкалы ротаметра	$G, 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	$\rho g(h_2 - h_1), \text{Па}$

Таблица №2

№	$T, \text{K}$	$\sqrt{T}$	$\eta, \text{Па} \cdot \text{с}$

### Контрольные вопросы.

1. Напишите формулу Ньютона для силы вязкого трения и поясните значение всех входящих в нее величин. Дайте определение коэффициента вязкости, выведите его размерность.
2. Что называется коэффициентом вязкости, каков его физический смысл?
3. При каких условиях выполняется закон Пуазейля?
4. Что называют средней длиной свободного пробега. Как зависит средняя длина свободного пробега молекул от температуры газа, давления?
5. Как зависит коэффициент внутреннего трения в газах от температуры.
6. Поясните формулы (4).



7. Что называют эффективным сечением молекулы? Как определить диаметр молекулы?
8. Каков механизм внутреннего трения в жидкостях, чем он отличается от газов?
9. Что показывает ротаметр? Почему при понижении температуры показания ротаметра увеличиваются?
10. Какую роль играет микропроцессор?
11. Поясните метод измерения температуры

**Рекомендуемый библиографический список**

3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. Механика и молекулярная физика. СПб.: Лань, 2005.
4. Стрелков С.П. Механика. СПб.: изд. Лань, 2005.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1. Механика. М.: Физматлит, 2006.

Рис. 2.

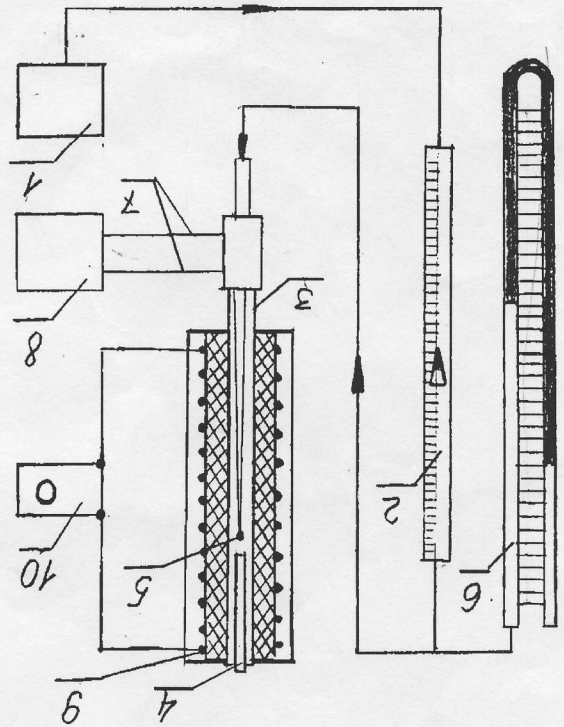
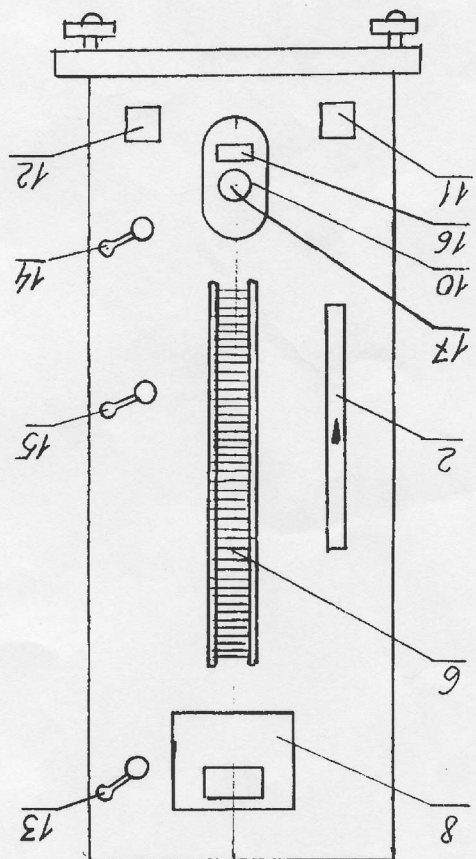


Рис. 1





Градуировочный график ротаметра

